

Centrales Nucléaires

Centrales et nucléaires thermiques

Chapitre I:

INSTALLATIONS DE CENTRALES A TURBINES A VAPEUR ET DE COGENERATION OU DE THERMIFICATION

I. LES DIFFERENTES FORMES D'ENERGIE:

II. CENTRALES NUCLÉAIRES:

III. CENTRALES THERMIQUES À FLAMME (CTF) :

IV. COGÉNÉRATION:

I. LES DIFFERENTES FORMES D'ENERGIE:

1° / Introduction : Qu'est ce que l'énergie ?

L'énergie est difficile à définir simplement autrement qu'à travers ses **effets** et ses **variations** : pour le transport, pour le chauffage des habitations, pour l'industrie, pour l'éclairage et autres appareils électriques... Un système possède donc de l'énergie s'il est capable de fournir du **travail mécanique** ou son équivalent...

thermique

mécanique

lumineuse

électrique

chimique

Rem : L'unité du SI pour l'énergie est le **joule (J)**. Mais en électricité on utilise aussi le **wattheure (Wh)**, les économistes utilisent plutôt la **tonne d'équivalent pétrole (tep** avec $1\text{tep}=42\text{GJ}$), les médecins nutritionnistes la **calorie (cal** avec $1\text{cal}=4,18\text{J}$)

UNE DÉFINITION DE L'ÉNERGIE (PARMI D'AUTRES)

L'énergie est la grandeur qui permet de caractériser un **changement d'état** dans un système :

- Modification de la température (énergie thermique)
- Modification de la vitesse (énergie cinétique)
- Modification de la composition chimique (énergie chimique, combustion)
- Modification de la composition atomique (énergie nucléaire)

Dans un système clos, **l'énergie se conserve**. On ne peut donc pas « produire » de l'énergie, mais juste la transformer.

Quelles sont les sources d'énergie?

Il existe deux grandes familles de sources d'énergie pour produire l'électricité:

Les énergies non renouvelables :

- L'énergie fissile : l'uranium, un minerai contenu dans le sous-sol de la Terre.
- L'énergie fossile : éléments contenus dans le sous-sol de la Terre tels que le charbon, le fioul (issu du pétrole) et le gaz.

Les énergies renouvelables : ce sont des sources d'énergies que la nature renouvelle en permanence :

- L'énergie hydraulique : La force de l'eau des chutes retenue par des barrages ou celle des marées.
- L'énergie éolienne : La force du vent.
- L'énergie solaire : Les rayons du soleil.
- L'énergie de la géothermie : La chaleur du sous-sol.
- L'énergie de la biomasse : La combustion de la matière organique (plantes, arbres, déchets animaux, agricoles ou urbains).

La turbine (n'existe pas dans toutes les centrales) et l'alternateur sont les éléments indispensables à la production de courant électrique . La partie commune à toutes ces centrales est l'alternateur.

L'électricité : production et emploi

I. L'électricité pour le transport de l'énergie

Electricité = forme intermédiaire d'énergie intéressante car facile à transporter et à distribuer.

Produite principalement par conversion d'énergie mécanique au moyen d'**alternateurs**.

- Turbines hydrauliques dans les barrages
- Turbines d'éoliennes
- Turbines à vapeur ou à gaz :
 - Energie chimique (pétrole, gaz, bois, déchets ...) → énergie thermique
 - Energie nucléaire (uranium) → énergie thermique

L'alternateur

Transforme l'énergie mécanique en électricité

Utilisé dans toutes les centrales électriques quelle que soit la source d'énergie utilisée :

- Eau
- Vent
- Combustible fossile
- Combustible nucléaire

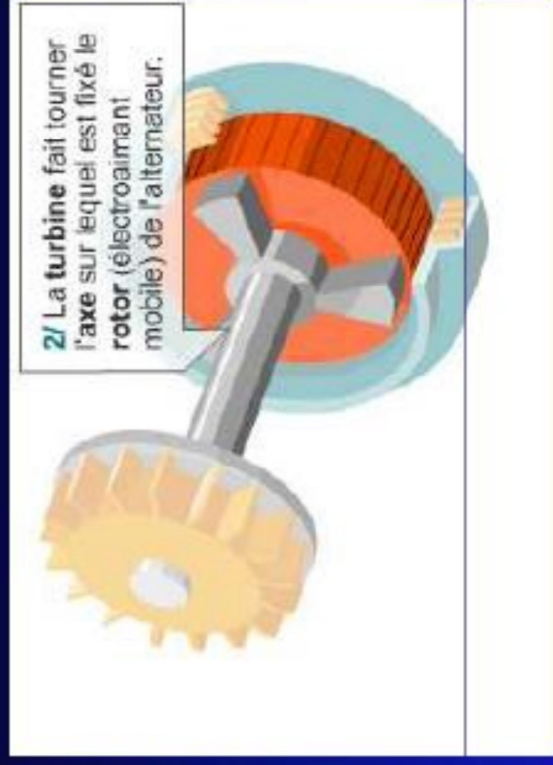
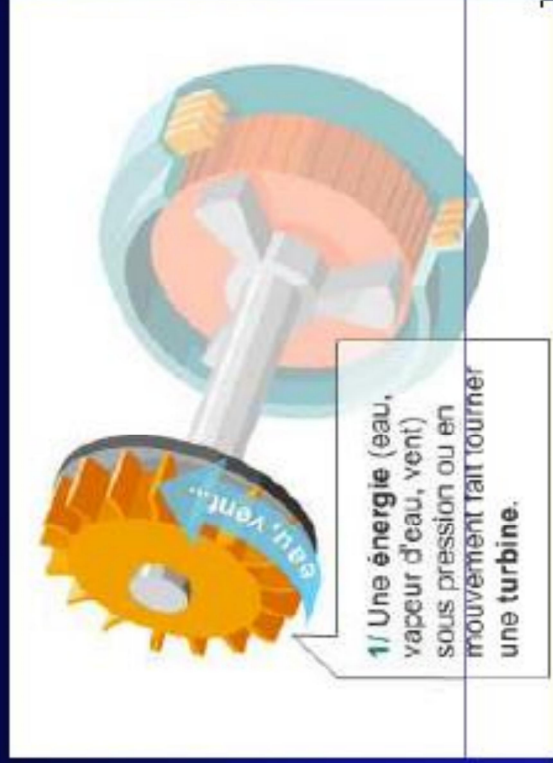
La conversion utilise la loi d'induction de Faraday : « un champ magnétique alternatif ou mobile induit un courant électrique dans un circuit conducteur. »

Alternateur = rotor tournant à l'intérieur d'un stator.

Le rotor (inducteur) est un électro-aimant

Le stator (induit) est un cylindre fixe avec des enroulements en cuivre dans lequel est généré un courant alternatif triphasé suite à la rotation du rotor.

Le couple turboalternateur



Rappel sur les unités : Energie-Puissance

À savoir :

$$P(W) = E(J) / D(s)$$

P : puissance

E : énergie

D : durée

$$\text{Puissance} = \frac{\text{Energie}}{\text{Durée}}$$

Puissance : unité le watt W

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ J} / 1 \text{ S}$$

Energie :

$$1 \text{ joule} = 1 \text{ V} \times 1 \text{ A} \times 1 \text{ s}$$

1 **cal** = 4.18 J \Rightarrow c'est la quantité d'énergie nécessaire pour faire passer 1g d'eau de 24 à 25°C

1 **Wh** = une puissance de 1 W pendant 1h = **3600 J**

1 **kWh** = une puissance de 1000 W pendant 1h = **3.6 MJ**

ou une puissance de 100 W pendant 10h

par convention **1Tep = 11700 kWh**

Combien d'énergie pour faire chauffer 10l d'eau de 14 à 100°C?

Relation utile : $\Delta U (J) = m(g) \cdot C_m(J/g/^\circ C) \cdot \Delta \theta(^\circ C)$

ΔU : variation d'énergie interne de la masse d'eau.

ρ : masse volumique de l'eau

C_m : capacité calorifique massique de l'eau
(4,18 J/g/°C)

$\Delta \theta$: variation de température

<http://www.matton.fr>



$$P(W) = F(N) \cdot V(ms^{-1}) \quad P(W) = C(Nm)\Omega(rds^{-1}) \quad P(W) = U(V) \cdot I(A) \quad E = \int_0^t P(t)dt$$

Rappel sur les unités :

Puissance énergie : attention aux chiffres!

☉ Pour chauffer 10 l d'eau de 0 °C à 100 °C :

4.18 MJ = 1.2 kWh → en 1 h : 1.2kW → en 1 s : 4.2 MW

éolienne : 2 MW,

centrale nucléaire : 1000 MW

puissance mondiale : 3400 GW

Disponibilité de la ressource :

1 MW éolien fournit environ 2 à 4 GWh

1 MW solaire environ 0,8 à 1,5 GWh

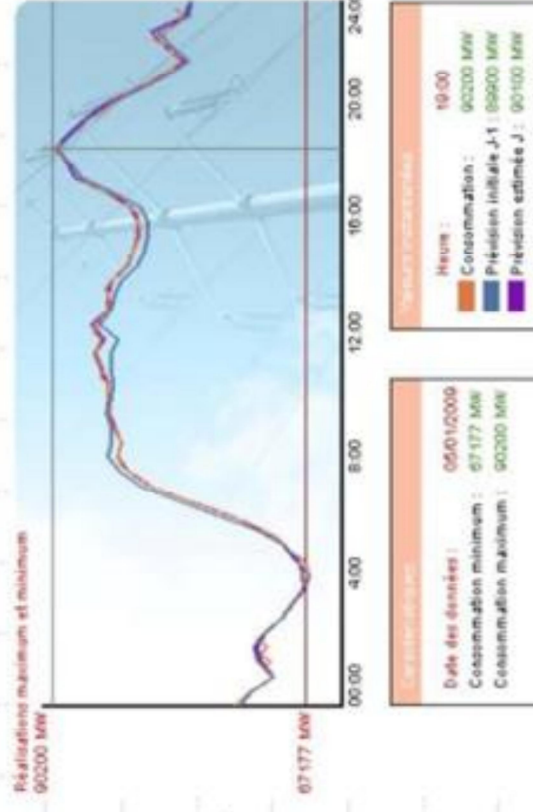
1 MW nucléaire environ 7 GWh

(1 an = 8760 heures)

Prévisions nécessaires

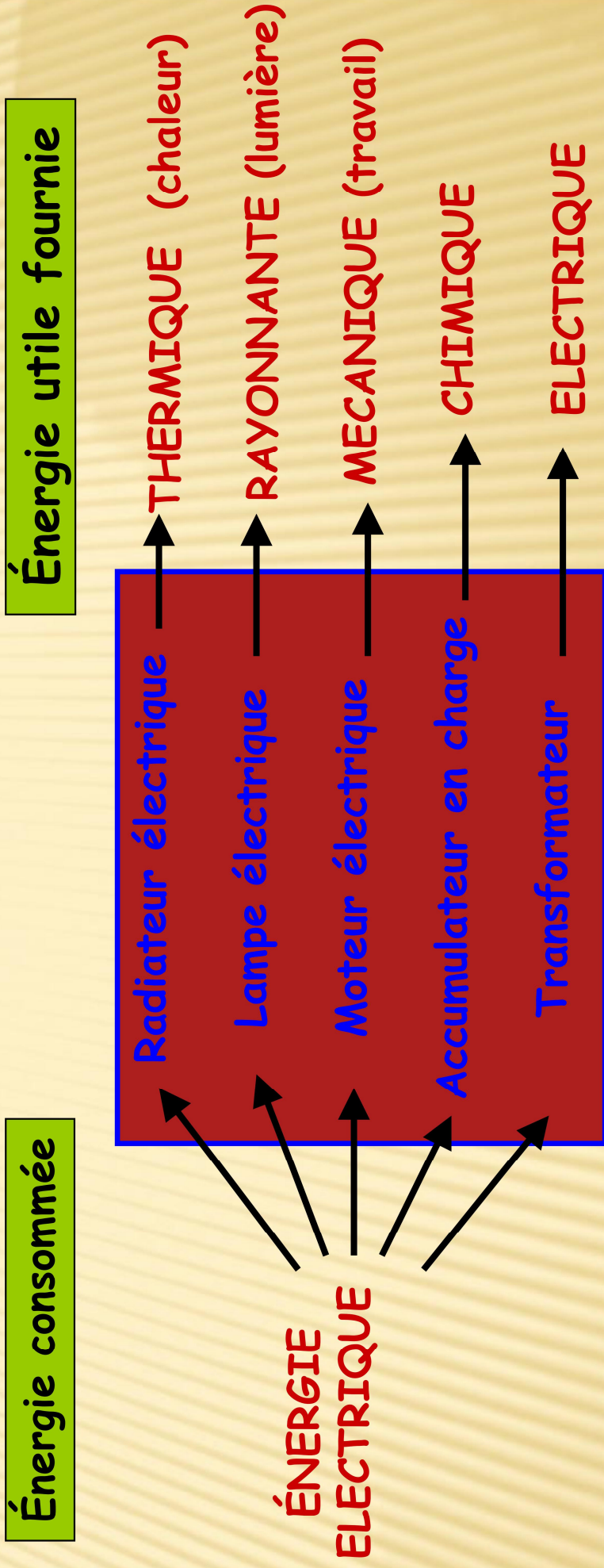
lundi 05/01/2009 à 19h : le pic de consommation a

culminé à 91 200 MW



2° / Transformation d'énergie :

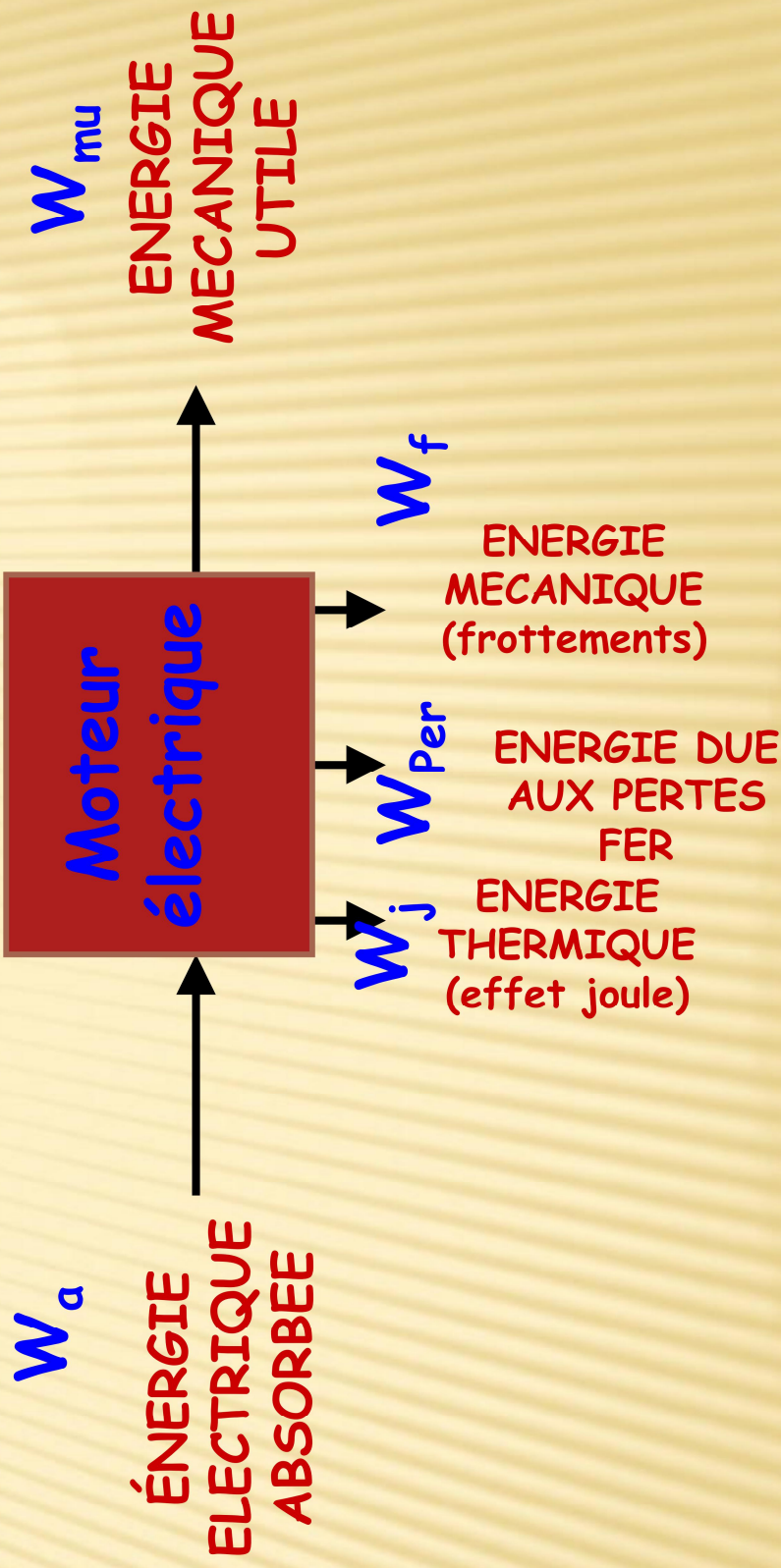
Exemple :



3° / Conservation de l'énergie :

a) Enoncé du principe : l'énergie totale d'un système isolé reste constante.

b) Exemple d'application : moteur électrique



$$W_a = W_j + W_{Per} + W_f + W_{um}$$

c) Rendement η : c'est le rapport entre l'énergie utile en sortie du convertisseur et l'énergie reçue par celui-ci.

$$\eta = W_{\text{utile}} / W_{\text{absorbée}}$$

Rem : Cette grandeur est sans unité, et peut s'exprimer en %.

Exemple : 38% pour une centrale électrique thermique
 40% pour un moteur à essence
 5% pour une ampoule classique

3. Energies renouvelables

Une énergie **renouvelable** est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être **considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme**. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le **Soleil** (rayonnement), mais aussi la **Lune** (marée) et la **Terre** (énergie géothermique).

Aujourd'hui, on assimile souvent par abus de langage les énergies renouvelables aux **énergies propres**.

Les **énergies renouvelables** correspondent aux ressources énergétiques que l'Homme peut exploiter sans provoquer d'épuisement progressif de la planète.

On les oppose aux énergies classiques non renouvelables comme les énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz) et nucléaires radioactives dont l'utilisation provoque des problèmes insolubles (rejets de CO₂, réchauffement climatique, déchets radioactifs...).

Les énergies renouvelables tirent le plus souvent leur l'origine de l'énergie solaire qui est inépuisable et gigantesque :

- Energie hydraulique (c'est bien le soleil qui par évaporation de l'eau permet d'alimenter une rivière équipée d'un barrage 😊)
- Energie biomasse (c'est bien le soleil qui permet la photosynthèse des plantes 😊)
- Energie éolienne (c'est bien le soleil qui permet la formation des vents 😊)
- Energie solaire (c'est bien le soleil qui éclaire les panneaux solaire 😊)

Il existe d'autres énergies renouvelables indépendantes du soleil :

- Courants de marée pouvant actionner des turbines
- Energie géothermique liée à la production de chaleur de la Terre

Energie solaire



Energie hydraulique



Energie éolienne



Energie géothermique

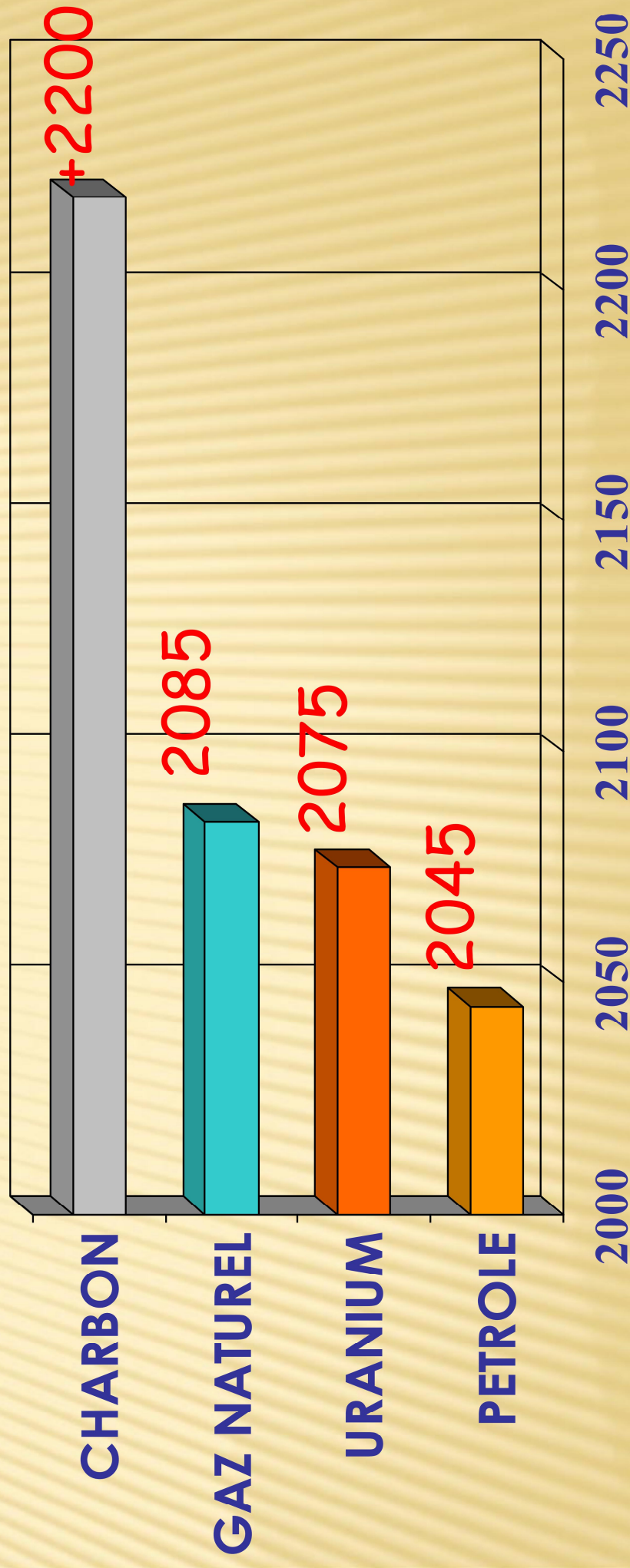


Energie de la biomasse

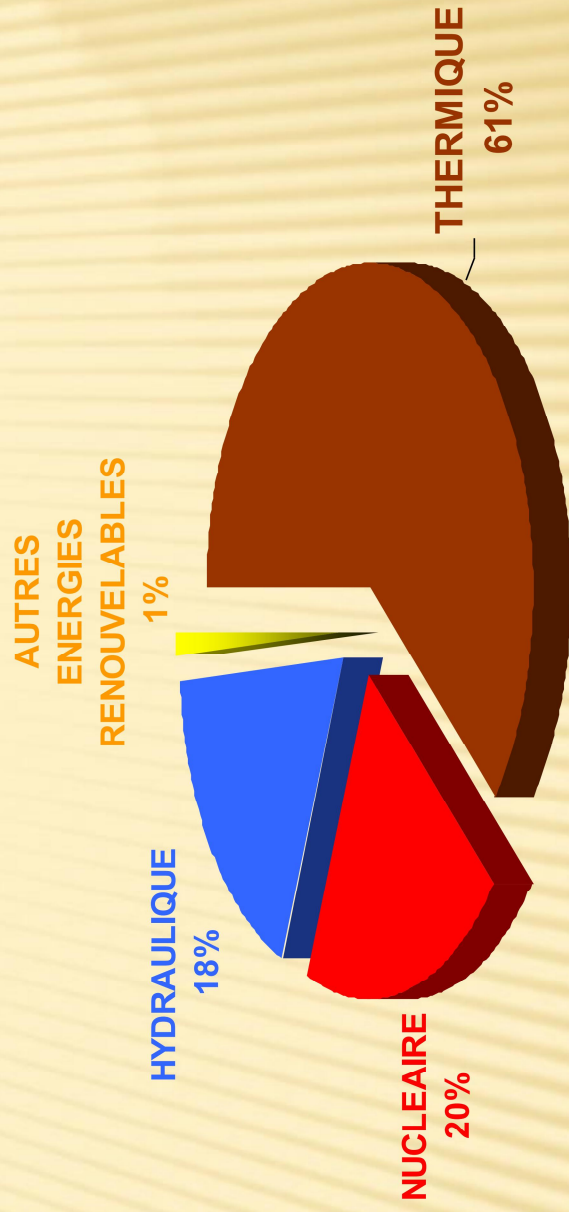


DATES D'ÉPUISEMENT DES RÉSERVES DES ÉNERGIES NON RENOUVELABLES

(PAR RAPPORT À L'ÉVOLUTION ACTUELLE DE LA
CONSOMMATION)

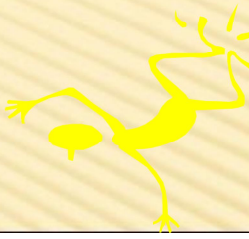


OU EN SOMMES-NOUS AUJOURD'HUI ?



Répartition de la production mondiale d'électricité

AVANTAGES et INCONVÉNIENTS de ces NOUVELLES ÉNERGIES



- ✧ énergies indépendantes des ressources fossiles
- ✧ pas de rejet de substances polluantes
- ✧ possibilité d'avoir de l'électricité en site isolé
- ✧ production d'électricité pour matériel embarqué



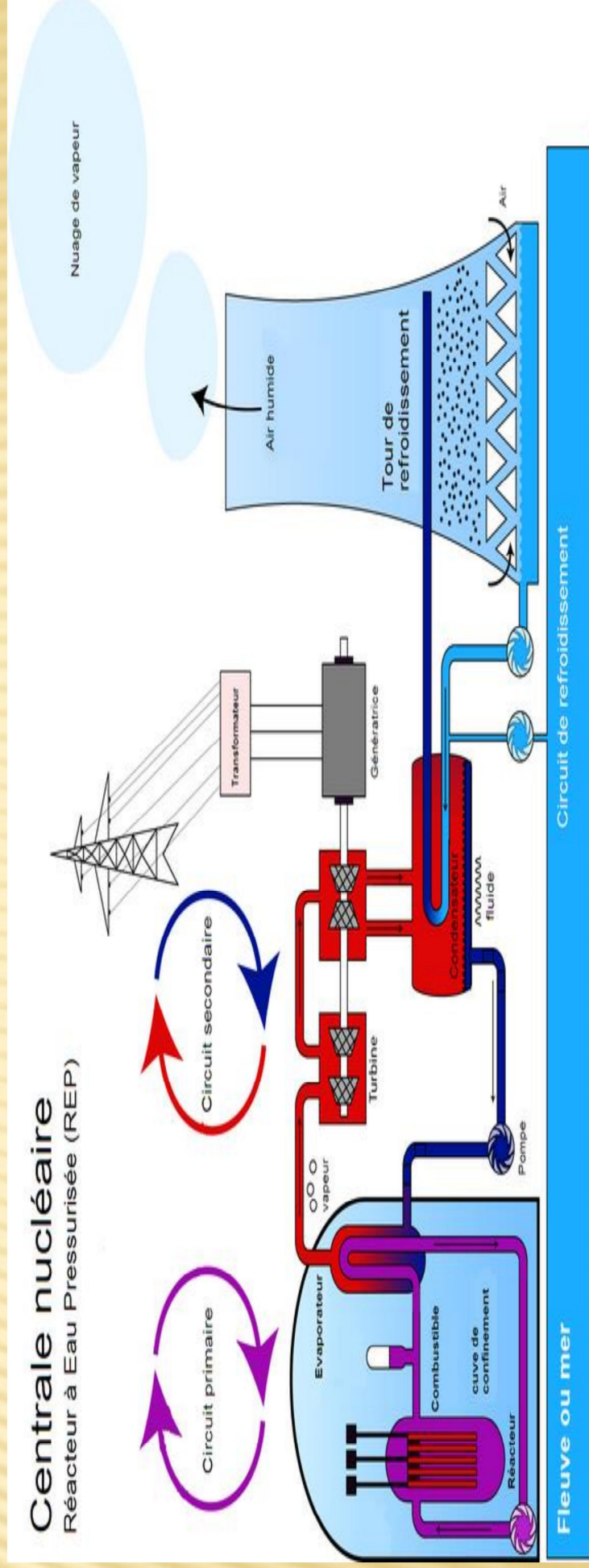
- ✧ coût du kW.h encore trop élevé, rendement faible
- ✧ habitude des sources d'énergies traditionnelles

II) CENTRALES NUCLÉAIRES :

Une **centrale nucléaire** produit de **l'énergie électrique** en utilisant la **fission nucléaire** pour produire la **chaleur** nécessaire à la production de l'électricité. Elle utilise pour cela la chaleur libérée par l'**uranium** qui constitue le "**combustible nucléaire**". L'objectif est de faire chauffer de l'eau afin d'obtenir de la vapeur. La pression de la vapeur permet de faire tourner à grande vitesse une **turbine**, laquelle entraîne un **alternateur** qui produit de l'électricité. (principe similaire à celui d'une centrale thermique)

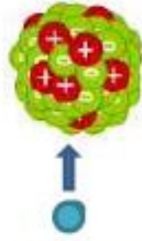
Dans une centrale thermique nucléaire, l'énergie chimique libérée par la fission du combustible est transformée en énergie thermique pour produire de la vapeur d'eau qui entraîne une turbine (énergie mécanique) un alternateur la transforme en énergie électrique.

Dans les centrales nucléaires, le fluide thermodynamique peut être chauffé soit directement dans le réacteur (filière Boiling Water Reactor (BWR) non utilisée en France), soit par un fluide caloporteur intermédiaire qui lui transmet la chaleur du coeur du réacteur nucléaire (filière Réacteur à Eau Pressurisée (REP) ou Pressurized Water Reactor (PWR) utilisée en France).

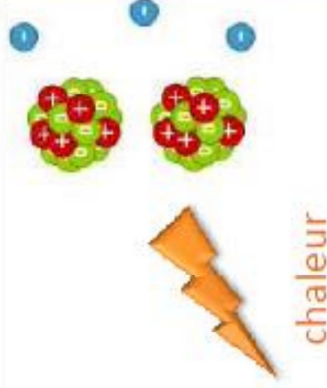


La fission de l'uranium

1/ Un neutron bombarde un noyau d'uranium.

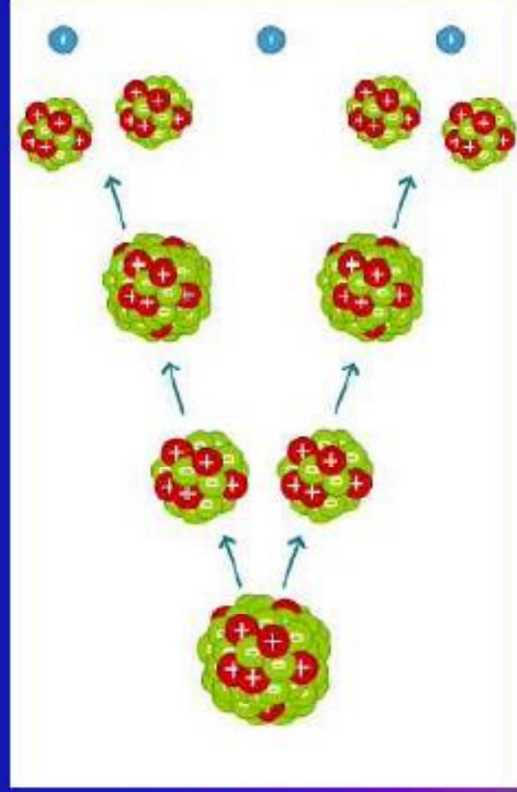
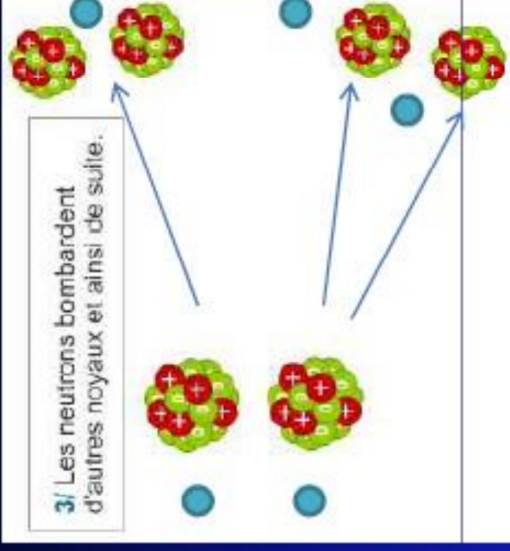


2/ Le noyau se casse en libérant de l'énergie et deux neutrons.



chaleur

3/ Les neutrons bombardent d'autres noyaux et ainsi de suite.

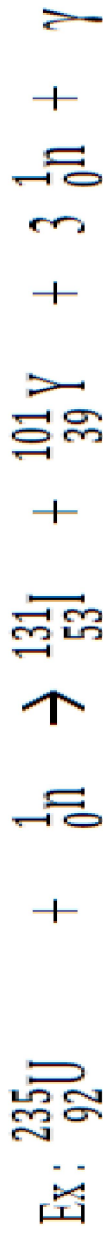


On appelle réaction de fission nucléaire l'éclatement, sous l'impact d'un neutron suffisamment lent, d'un noyau lourd en deux noyaux plus légers avec production de plusieurs neutrons et d'énergie.

Des 2 isotopes de l'uranium, seul l'uranium 235 : $^{235}_{92}\text{U}$ est fissile : il peut se briser en 2 noyaux après collision avec un neutron.

Dans le réacteur nucléaire se produit une réaction en chaîne (voir schéma ci-dessous) : les neutrons libérés lors de la fission provoquent à leur tour de nouvelles fissions avec libération de nouveaux neutrons et ainsi de suite ...

Il existe un très grand nombre de fissions possibles pour l'uranium 235, selon la nature des deux noyaux obtenus.



Uranium 235 neutron iode 131 Yttrium 3 neutrons rayonnement gamma



Les produits de la fission sont en général radioactifs, c'est-à-dire qu'ils se transforment naturellement en d'autres noyaux en émettant des rayonnements.

Quand les particules subatomiques appelées **NEUTRONS** entrent en contact avec les atomes d'uranium, le noyau se fractionne, libérant alors de l'énergie sous forme de chaleur. Cette réaction se produit en permanence dans la nature, mais à un rythme extrêmement lent. Les réacteurs nucléaires accélèrent énormément ce processus en ralentissant les neutrons et en augmentant la probabilité qu'ils heurtent et divisent le noyau des atomes d'uranium. Lors de la fission, le noyau libère d'autres neutrons qui iront heurter et diviser de nouveaux noyaux, provoquant ainsi une réaction en chaîne. C'est la **FISSION NUCLEAIRE**.

Au cœur de chaque réacteur nucléaire se trouvent les **PASTILLES DE COMBUSTIBLE**, grosses comme un ongle. Malgré leur petite taille, ces pastilles permettent de produire des quantités considérables d'énergie.

Les réacteurs nucléaires de l'Ontario utilisent des pastilles de combustible faites d'uranium naturel extrait au Canada même. Ces pastilles sont insérées dans des tubes en alliage de zirconium, métal spécial extrêmement résistant à la corrosion, d'environ 50 cm de longueur. Ces tubes sont ensuite fermés par soudage et regroupés dans ce qu'on appelle une **GRAPPE DE COMBUSTIBLE**. Une seule de ces grappes de 50 cm peut produire assez d'énergie pour alimenter 100 maisons pendant un an.

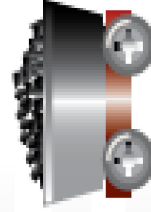


Une simple pastille de combustible nucléaire peut alimenter une maison de taille moyenne pendant six semaines.



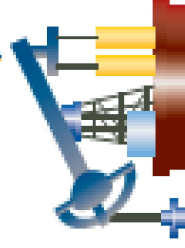
=

1 Pastille
de combustible



807 kg de charbon

ou



677 l de mazout

ou



476 m³
de gaz naturel

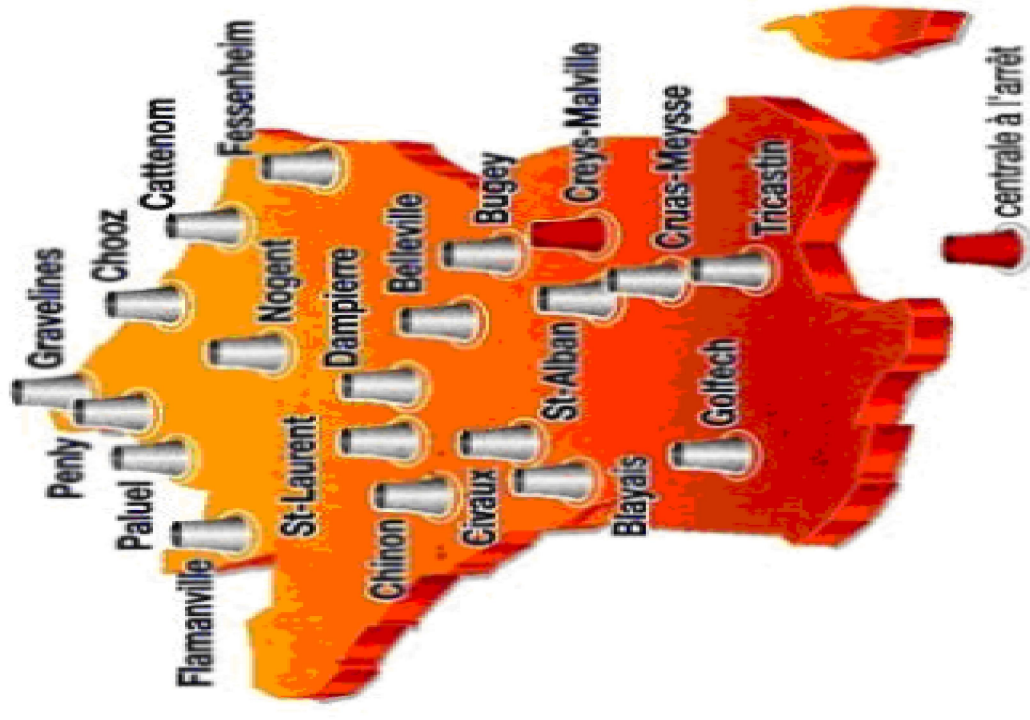
80 % de l'électricité (plus des $\frac{3}{4}$ de l'électricité) utilisée en France est produite à partir de l'énergie nucléaire.

Actuellement, la France compte 19 centres nucléaires de production d'électricité (carte ci-contre).

Dans les centrales, les noyaux d'uranium, combustible fissile, remplacent le combustible fossile.

En se cassant (réaction de fission), ces gros noyaux libèrent de l'énergie nucléaire qui est utilisée pour produire de la vapeur d'eau.

La vapeur d'eau, comme dans une centrale thermique à flamme, peut actionner une turbine qui entraîne à son tour l'alternateur.



Les centrales nucléaires peuvent produire des quantités considérables d'électricité à partir d'une très petite quantité de combustible. Une seule pastille de combustible nucléaire de 2,5 cm produit autant d'énergie que 807 kilogrammes de charbon, 677 litres de mazout ou 476 mètres cubes de gaz naturel.

Comme ces centrales ne brûlent aucun combustible, elles ne génèrent pratiquement pas de smog ni de gaz à effet de serre. En revanche, elles génèrent des déchets nucléaires, qui doivent être traités et stockés avec un soin extrême.

CENTRALE NUCLÉAIRE

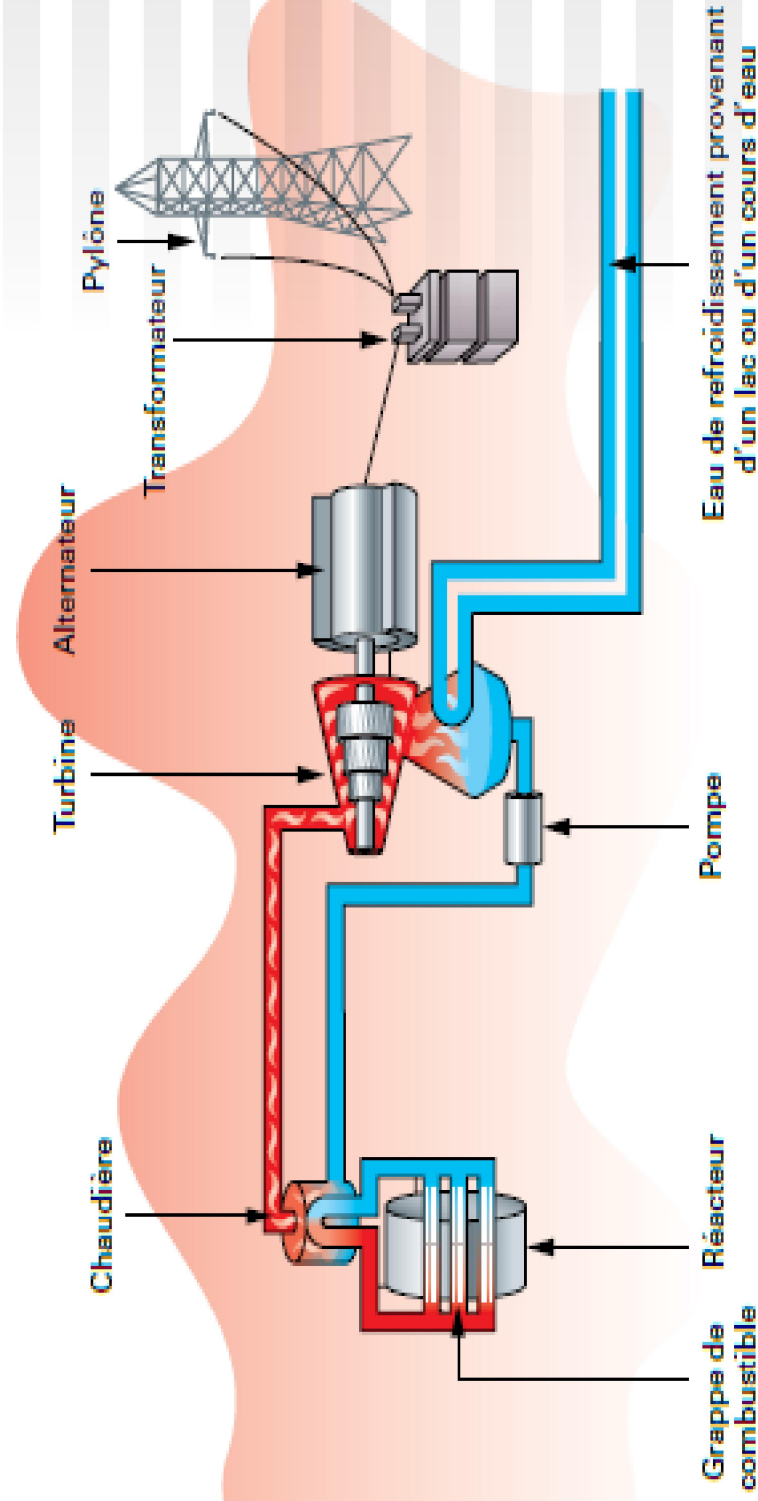


Schéma d'une centrale nucléaire

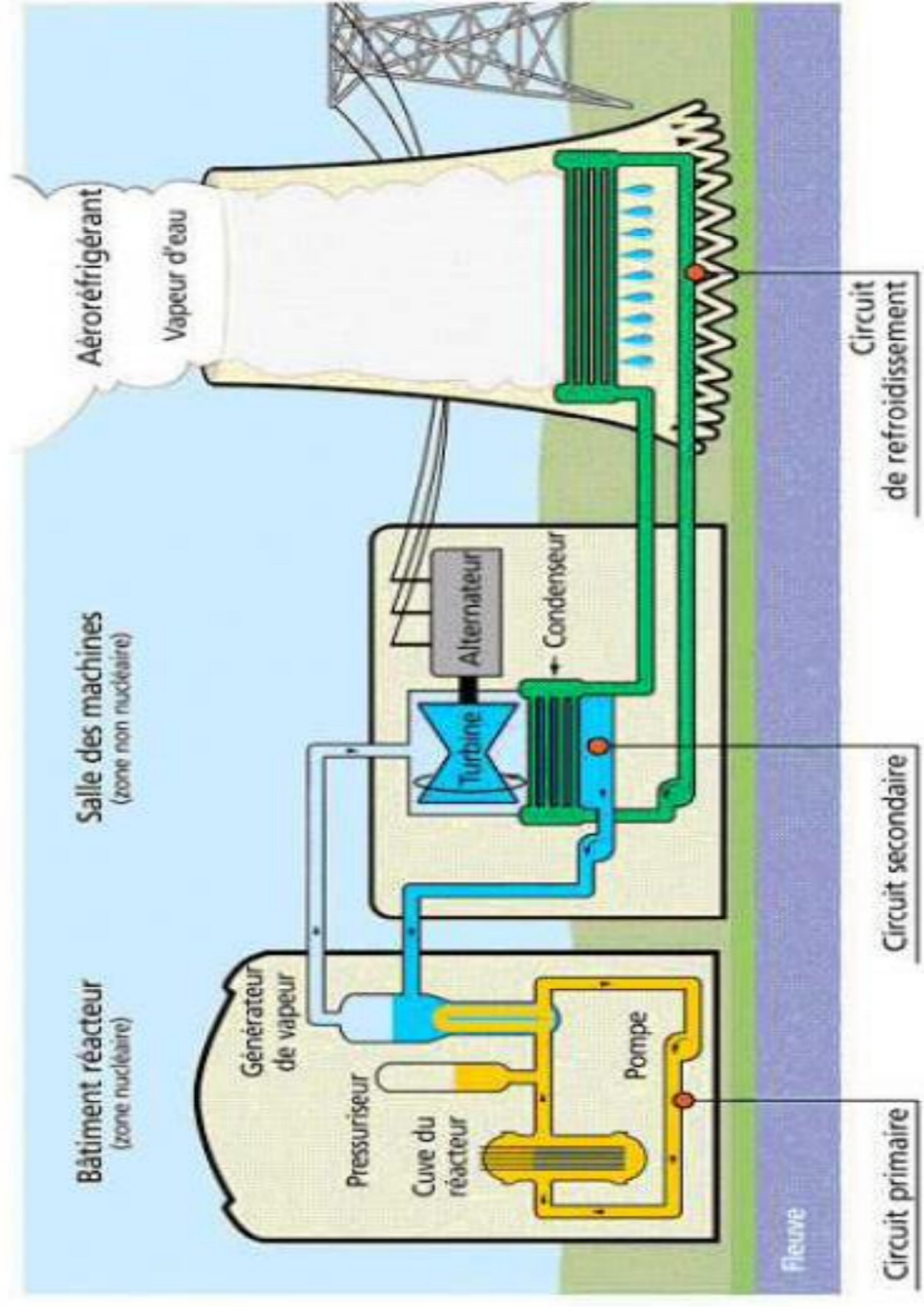
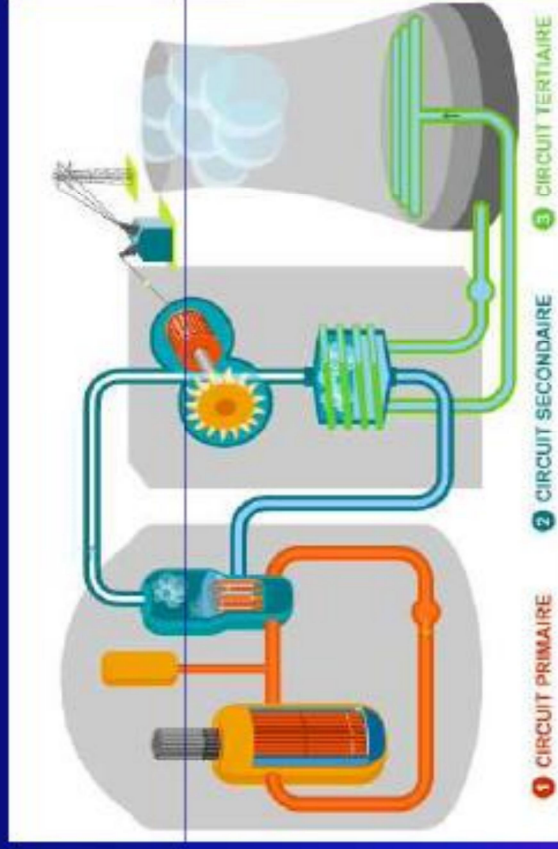


Schéma d'une centrale nucléaire

1. De l'uranium (matière nucléaire fissile) est introduit dans la cuve du réacteur nucléaire. La fission de ces atomes est contrôlée afin de produire une chaleur constante.
2. Un premier circuit d'eau sous pression (en jaune), actionné par une pompe, passe dans le réacteur et y absorbe de la chaleur. Grâce à la pression élevée, l'eau peut atteindre des températures de 300°C tout en restant liquide.
3. Le circuit d'eau sous pression entre en contact avec le générateur de vapeur (en bleu) où plusieurs canalisations s'ouvrent. Sous l'effet de la chaleur, l'eau contenue dans le générateur de vapeur s'évapore dans le tuyau supérieur.
4. La vapeur sous haute pression, en circulant dans la canalisation, entraîne la rotation d'une turbine.
5. La turbine est liée à un alternateur qui, par un mouvement de rotation, transformera cette énergie mécanique en électricité.
6. Après être son passage dans la turbine, la vapeur se retrouve dans un second échangeur de chaleur (en vert). Cet échangeur de chaleur contient de l'eau fraîche provenant directement d'un cours d'eau ou de la mer. Ainsi, la vapeur redevient liquide au contact de cette eau fraîche et est pompée vers le réacteur.
7. L'eau du second échangeur de chaleur, maintenant chaude, est pompée vers une tour de refroidissement avant d'être retournée dans l'environnement.

Centrale nucléaire

Même principe qu'une centrale conventionnelle mais la chaleur est produite par une réaction nucléaire (fission d'atomes d'uranium)



Avantages :

- Pas d'émission de gaz à effet de serre
- Puissance dégagée

Inconvénients :

- Production de déchets radioactifs
- Matière première en quantité limitée
- Importance des dégâts causés en cas d'incident (Tchernobyl 1986)

Exemple 1 : Centrale nucléaire de ST Alban du Rhône (Isère - 50km de Lyon)

Mise en service : 1985

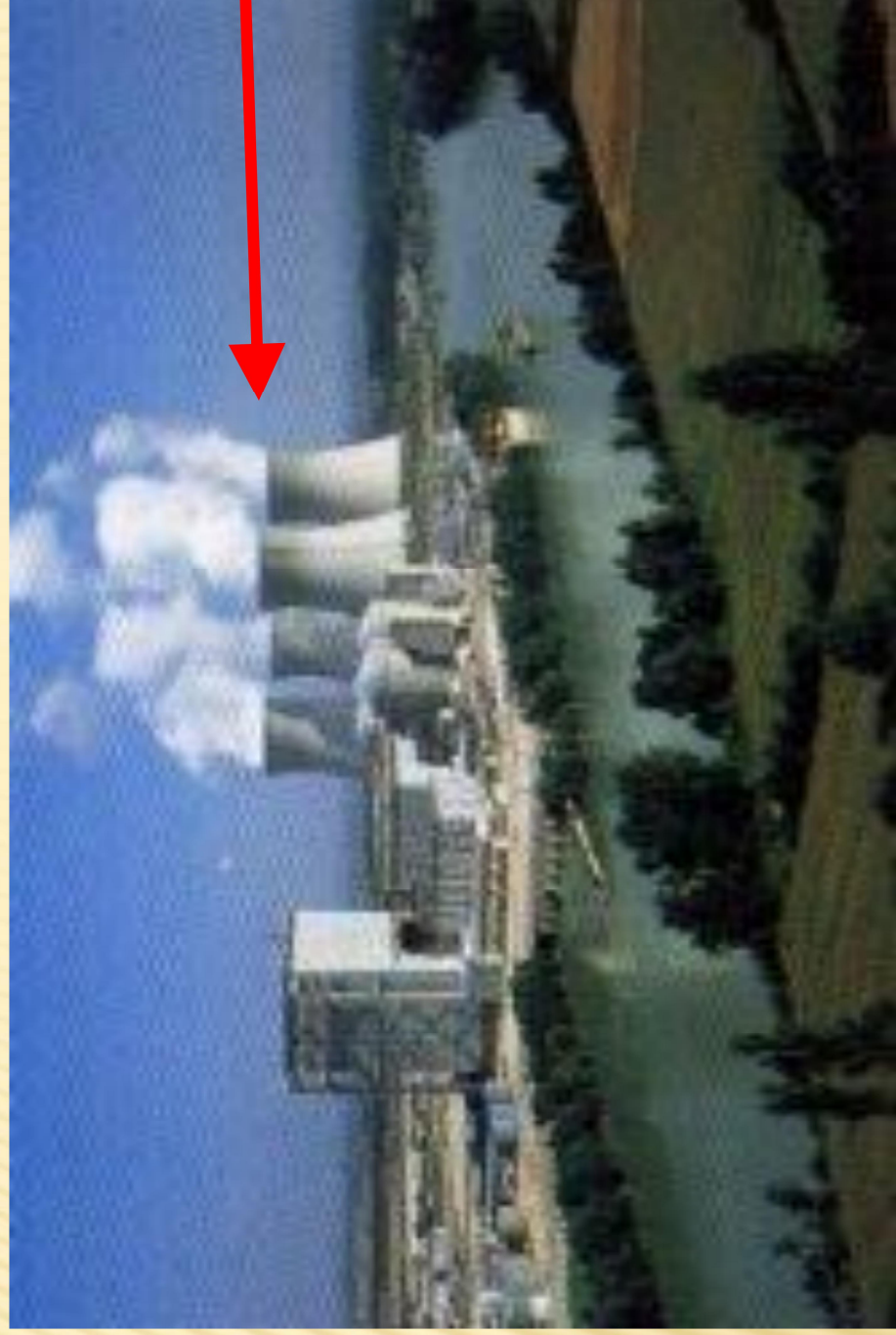


2 réacteurs
de 1300MW

Produit en moyenne par an 16 milliard de kWh soit par an l'énergie consommée par 11 villes comme Lyon.

Exemple 2 : Centrale nucléaire du Bugey à Saint-Vulbas (Ain -30km de Lyon)

Mise en service : 1972



4 réacteurs
de 925MW

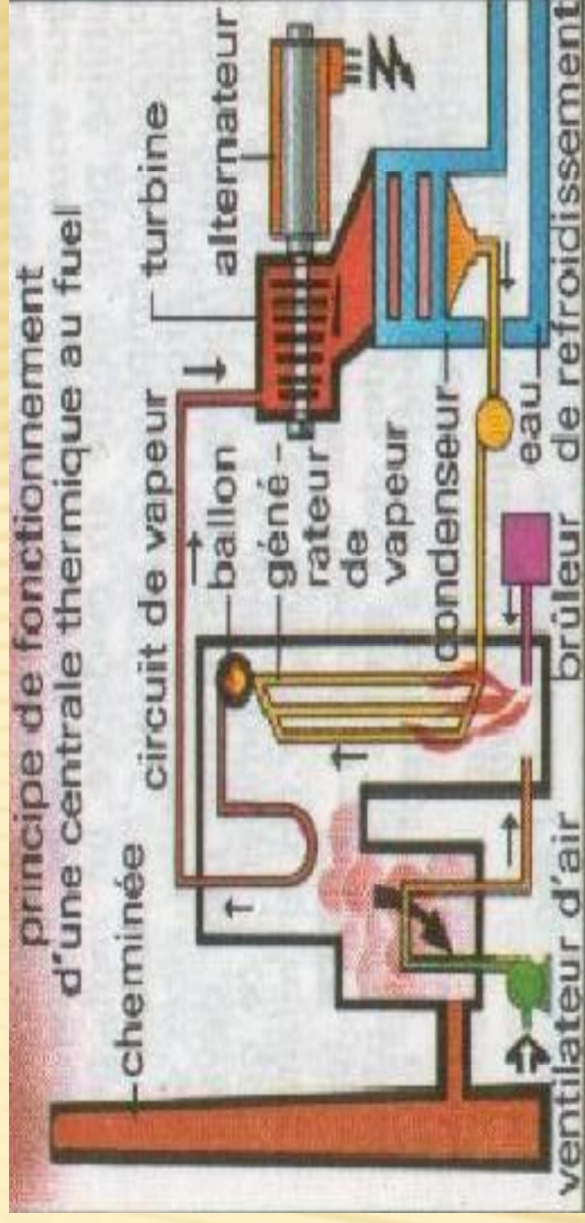
Produit en moyenne par an 25 milliard de kWh soit 40% de la consommation de la région Rhône-alpes.

III) Centrales Thermiques à Flamme (CTF) :

Une centrale thermique à Flamme (classique) produit de l'énergie électrique à partir de l'énergie thermique de combustion de plusieurs milliers de tonnes par jour d'un fossile (charbon, pétrole, gaz), préalablement convertie en énergie mécanique par une turbine à vapeur.

En fonction du combustible utilisé, il y a trois types de CTF:

- les centrales au charbon
- les centrales au fioul
- les centrales au gaz



La réaction de combustion d'un hydrocarbure :

Même s'il n'intervient qu'à hauteur de 5 % dans la production d'électricité en France, le charbon est le combustible fossile le plus utilisé dans les centrales thermiques à flamme dans le monde.

Il est le résultat d'une lente transformation de matière organique végétale en milieu non oxygéné.

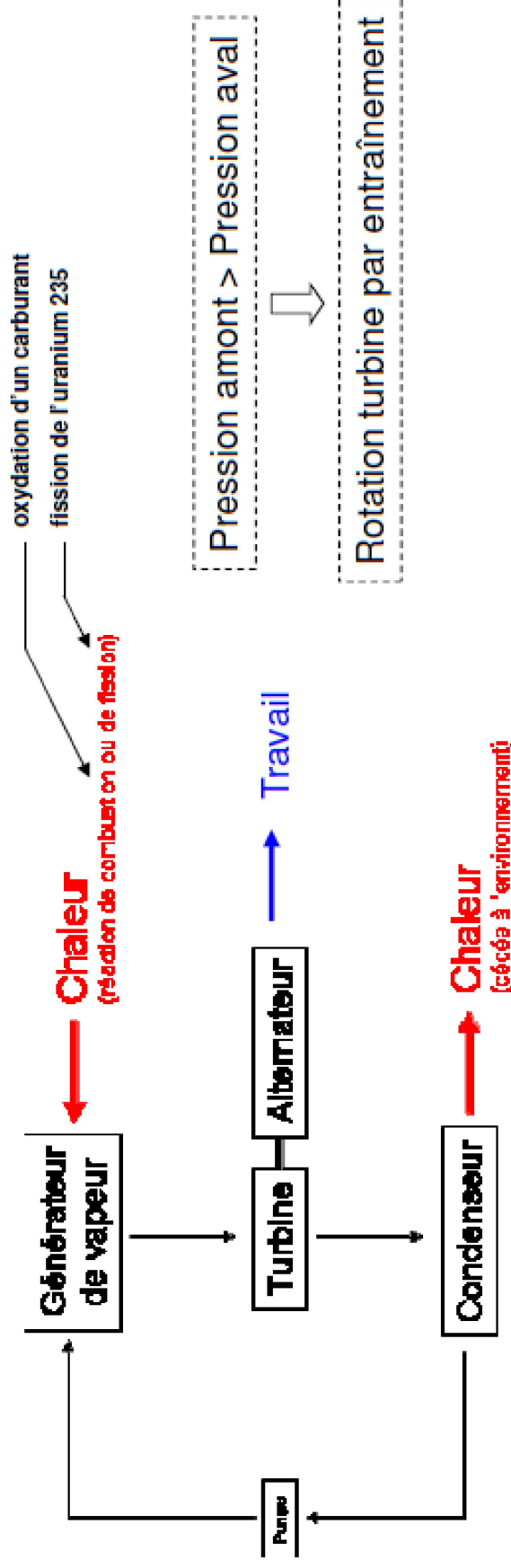
Le charbon utilisé dans les centrales contient environ 70 % de carbone. Ce combustible fossile brûle dans le dioxygène de l'air selon la réaction de combustion : Exemple du charbon.



Dans **une centrale thermique à flamme** (charbon, bois, pétrole), **l'énergie chimique des combustibles** est transformée en **énergie thermique** pour produire de la vapeur d'eau qui entraîne une turbine (**énergie mécanique**). Un alternateur la transforme en **énergie électrique**.

Schéma d'une centrale

Valable pour Centrale Thermique à Flamme ou Centrale Nucléaire

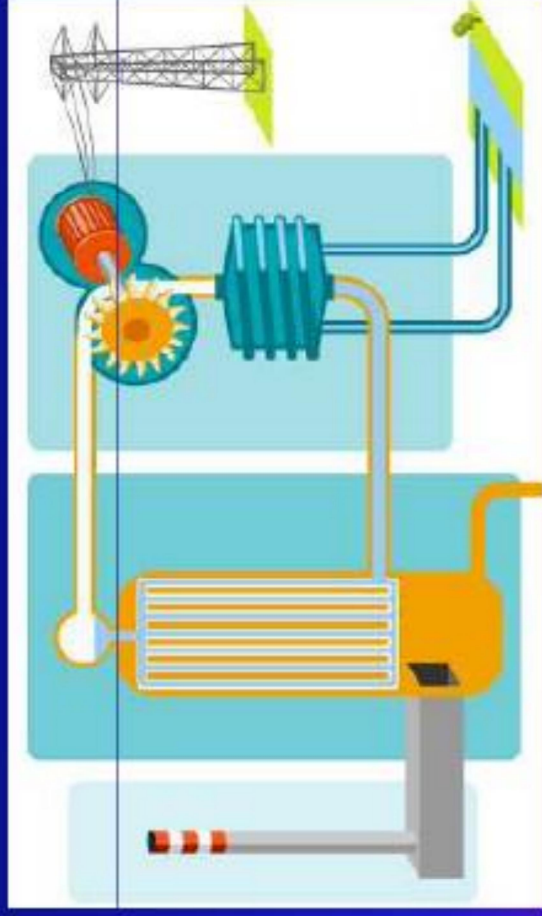


Pression amont de la turbine : fixée par la pompe

Pression aval de la turbine : fixée par l'équilibre Liquide-Vapeur régnant dans le condenseur donc par la température de la source froide (fleuve, atmosphère, ...)

Centrale conventionnelle à chaudière

Une chaudière à charbon, à mazout, à bois ou à gaz chauffe et vaporise de l'eau. Cette vapeur actionne une turbine, qui entraîne un turbo-alternateur. Energie chimique → énergie thermique → énergie mécanique → énergie électrique



Avantages :

- Technologie bien maîtrisée présentant peu de risques

Inconvénients :

- Faible rendement (35%)
- Emission de gaz à effet de serre
- Epuisement des ressources (pétrole, gaz)

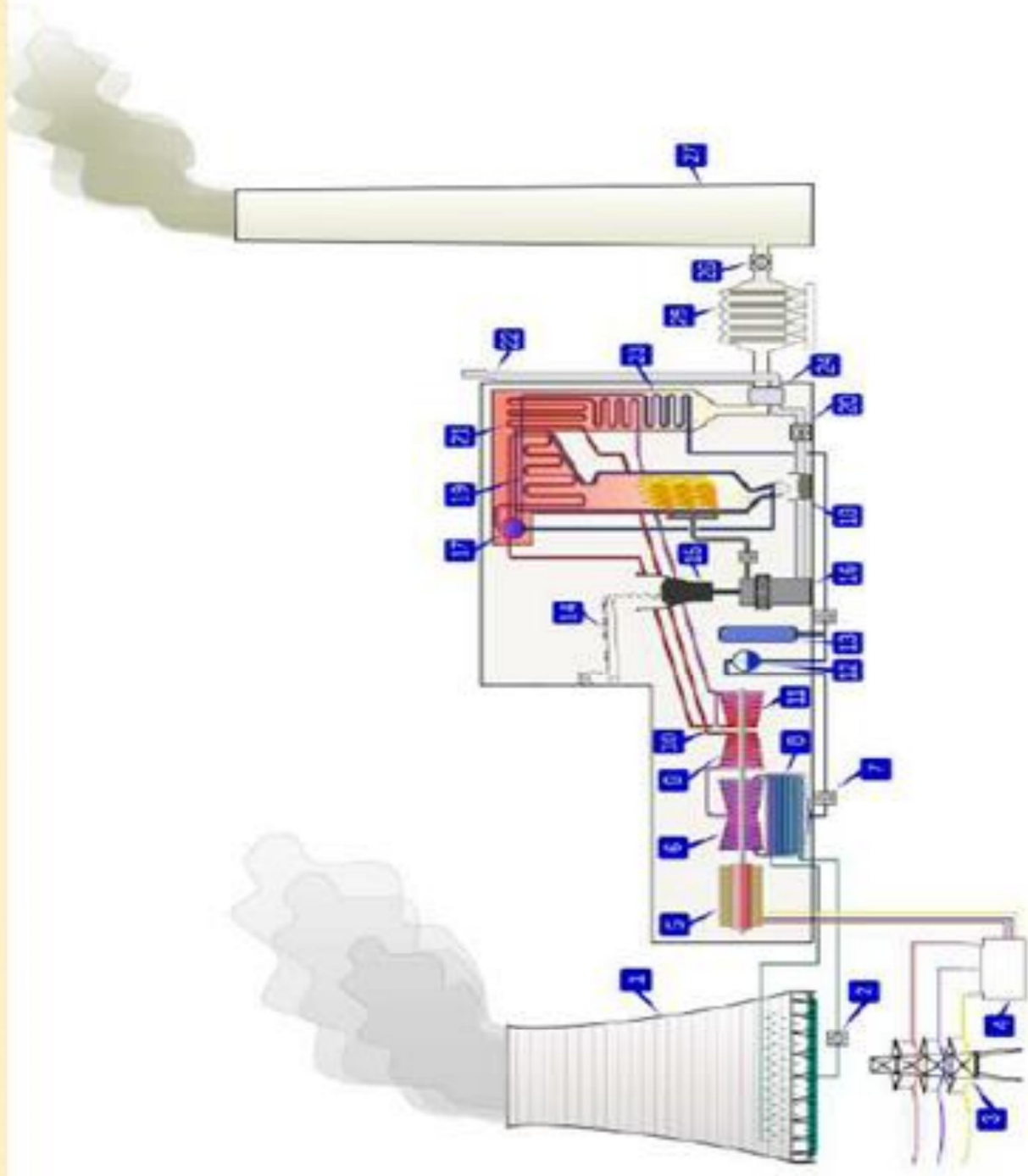


Schéma d'une centrale thermique classique

1. Tour de refroidissement	10. Vanne de contrôle de vapeur	19. Surchauffeur
2. Pompe de la tour de refroidissement	11. Turbine à vapeur (corps haute pression)	20. Ventilateur d'air primaire
3. Ligne de transmission triphasée	12. Bâche alimentaire avec dégazeur	21. Resurchauffeur
4. Transformateur élévateur de tension	13. Préchauffeur d'eau de chaudière	22. Prise d'air de combustion
5. Alternateur	14. Convoyeur à charbon	23. Économiseur
6. Turbine à vapeur (corps basse pression)	15. Trémie à charbon	24. Réchauffeur d'air
7. Pompe d'extraction des condensats	16. Broyeur à charbon	25. Electro-filtre
8. Condenseur	17. Ballon de la chaudière	26. Ventilateur de tirage
9. Turbine à vapeur (corps moyenne pression)	18. Trémie à mâchefers	27. Cheminée

Les centrales au charbon

Les combustibles

Réceptionné, puis stocké, le charbon est ensuite pulvérisé en fines poussières dans des broyeurs, puis mélangé à de l'air réchauffé et injecté dans la chambre de combustion du générateur de vapeur



Parc à charbon



Broyeur

Le charbon



Ce sont essentiellement des combustibles végétaux, soit sous leur forme actuelle (bois, bagasse, etc....) soit sous forme fossile où ils deviennent charbon (les tourbes lignites, houilles et anthracite), ces derniers proviennent de la décomposition de végétaux aux cours des époques géologiques. Plus le combustible est ancien, plus sa teneur en carbone augmente tandis que diminuent ses teneurs en hydrogène et en oxygène, c'est le cas de l'anthracite.

A titre d'exemple, on donne la composition moyenne d'un charbon (matières sèches)

Carbone	: 87%
Hydrogène	: 5,2%
Soufre	: 5,2%
Oxygène	: 5,8%
Azote	: 1,5%

Les centrales thermiques brûlent du **CHARBON**, du **MAZOUT** ou du **GAZ NATUREL** pour produire de l'électricité.

Dans le cas des centrales au charbon, on stocke le combustible en tas immédiatement à l'extérieur pour ensuite l'acheminer par convoyeur à l'intérieur de la centrale, où il est chargé dans un immense pulvérisateur qui le broie en poudre fine. D'immenses ventilateurs soufflent la poudre de charbon dans une chambre de combustion géante où elle brûle en dégageant d'importantes quantités de chaleur. La température de la chambre de combustion peut atteindre plus de 3 000 °C.

La chambre de combustion est entourée de conduites d'eau. La chaleur intense dégagée par la combustion du charbon transforme en vapeur l'eau des conduites. La vapeur est ensuite transférée, sous pression et à haute vitesse, par de gros tuyaux à une turbine dont elle fait tourner les ailettes. À partir de là, le processus est le même que dans une centrale nucléaire ou hydraulique : la turbine fait tourner l'alternateur, qui produit l'électricité.

La vapeur est condensée et retransformée en eau au moyen de l'eau de refroidissement provenant généralement d'un lac ou d'un cours d'eau voisin. L'eau est ensuite pompée et acheminée dans les conduites entourant la chambre de combustion pour reprendre le processus.

CENTRALE THERMIQUE

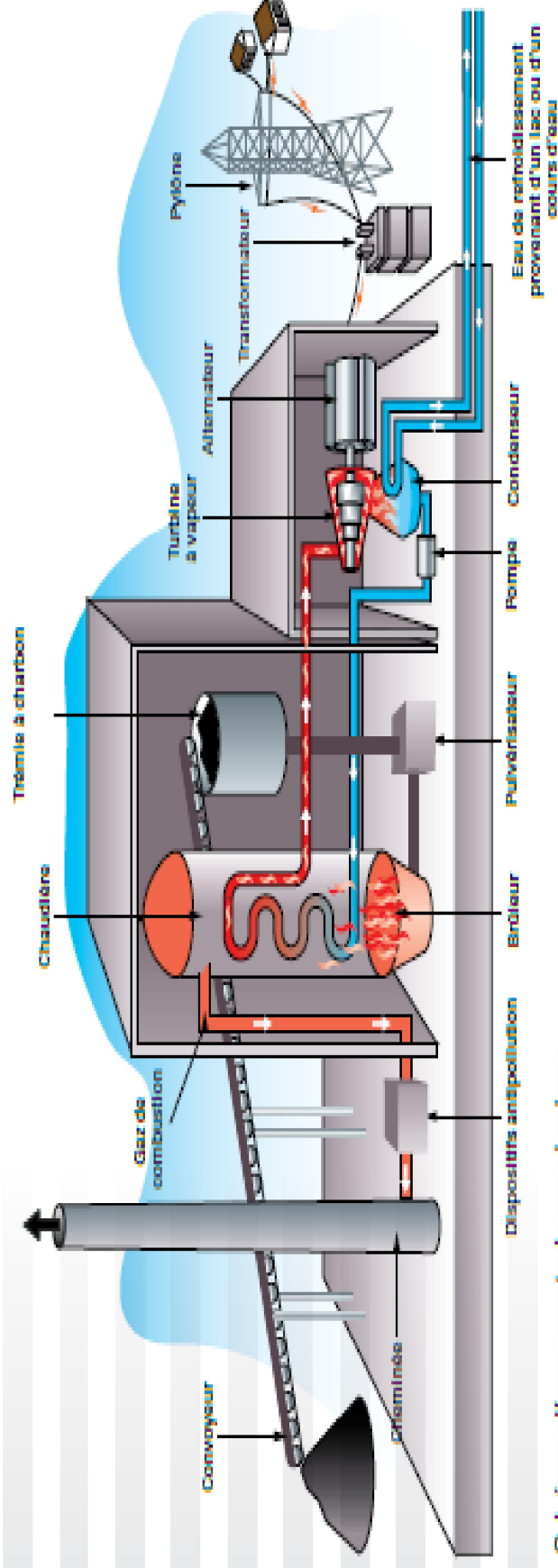
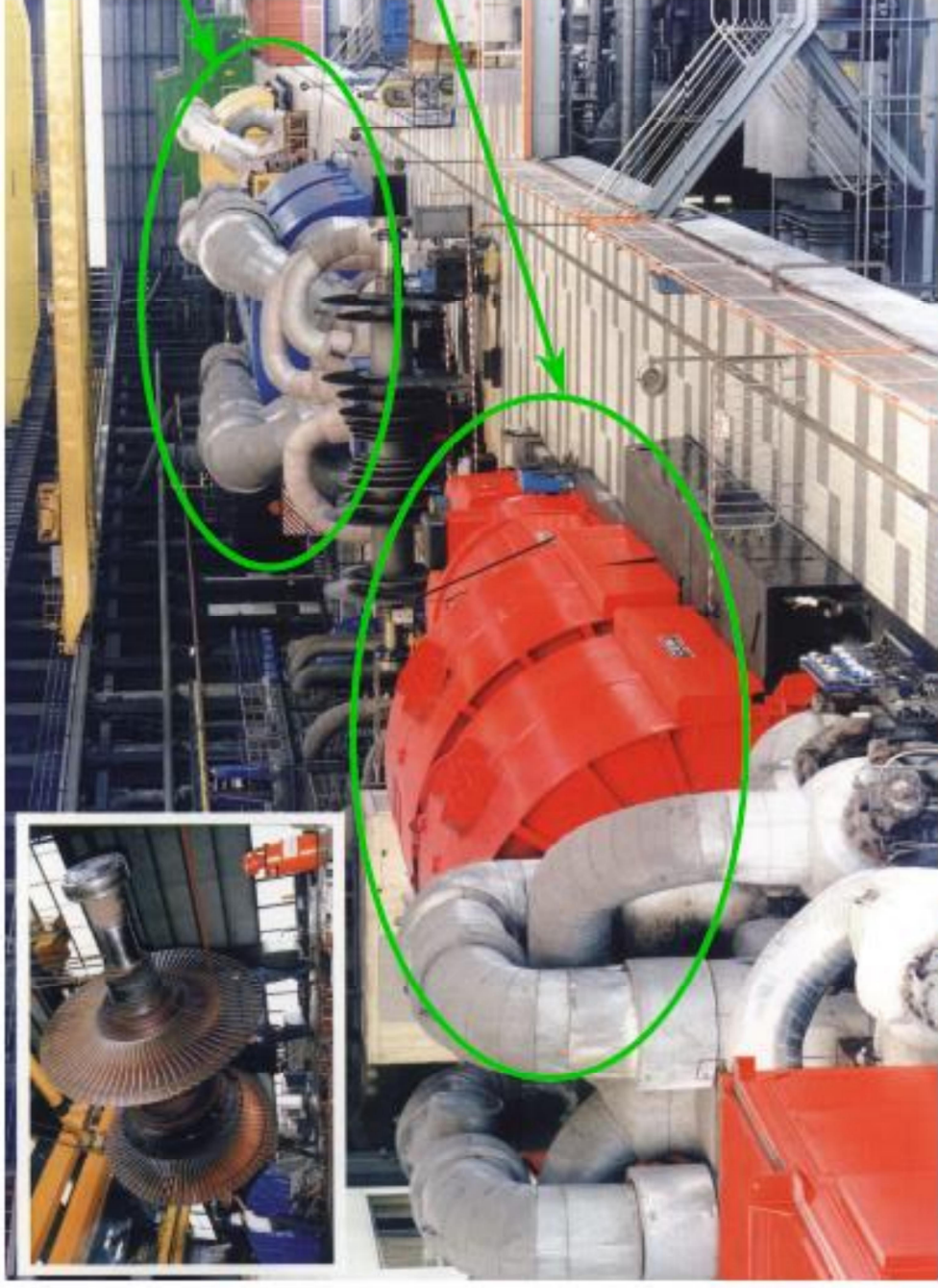


Schéma d'une centrale au charbon

Le groupe turbo-alternateur



Turbine

Alternateur

La vapeur produite dans le générateur de vapeur est envoyée dans le groupe turbo-alternateur.

C'est la détente de la vapeur dans la turbine qui entraîne l'alternateur

Ressources

Le charbon fait partie des **ressources fossiles non renouvelables**. Cependant, c'est le combustible fossile dont les **réserves sont les plus abondantes**, à savoir **230 ans** sur la base de la consommation actuelle. Les réserves sont localisées principalement aux Etats-Unis (28%), en Russie (23%) et en Chine (11%).

En France, où les mines de charbon ne sont plus exploitées, le charbon représente 3,3% du mix électrique, et 38% de la production thermique à combustible fossile.

Pollution

La production d'électricité à partir du charbon est grande émettrice de CO₂. Ainsi en France, en 2012, le charbon (**3,3% de l'électricité produite**) est responsable à lui seul de près de **60% des émissions de CO₂** de l'ensemble de la production électrique. La combustion du charbon émet d'autres polluants : oxydes de soufre (SO₂, SO₃), oxydes d'azote (NOx), cendres et fumées chargées en dioxines, métaux lourds (mercure, arsenic) ou éléments radioactifs (uranium, thorium, radium, radon...). L'extraction du charbon cause des fuites de **méthane**, gaz à effet de serre plus puissant que le CO₂.

Impacts sur la biodiversité et la santé

L'exploitation du charbon est cause d'**accidents de mines** (effondrements, coups de grisou) et de **maladies professionnelles** des mineurs (silicose, cancer du poumon).

Les **cendres** sont les **déchets** produits par la combustion du charbon, stockées à proximité des sites de production. La combustion du charbon concentre dans les cendres la **radioactivité** naturelle du minerai, en la multipliant par 7 à 10. Les cendres volantes se répandent dans les milieux naturels et **contaminent les sols, les eaux de surface, les nappes phréatiques et l'atmosphère par des polluants chimiques ou radiologiques**.

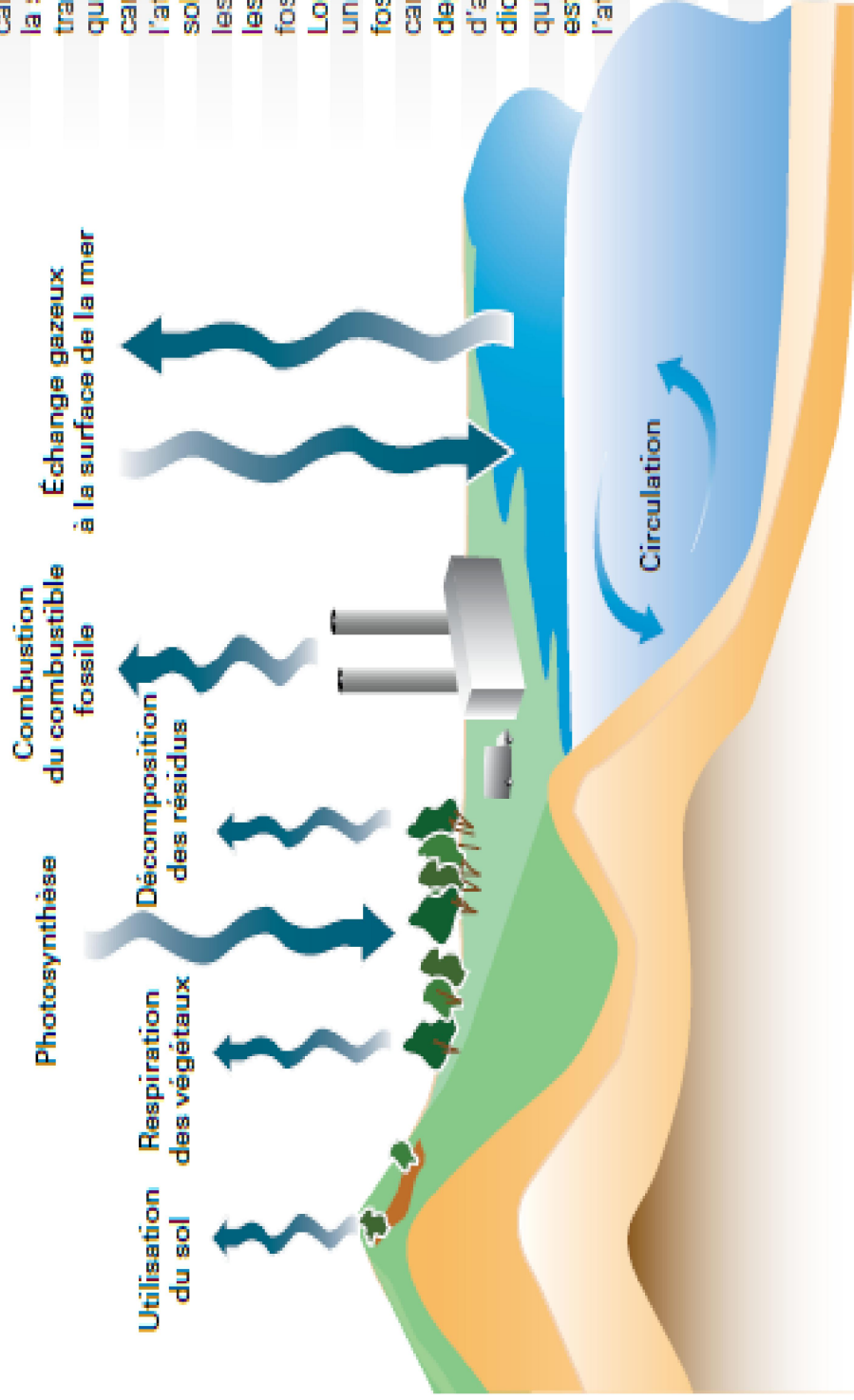
Les radionucléides peuvent ainsi contaminer la **chaîne alimentaire** (animaux broutant l'herbe, fruits et légumes), et **exposer les populations humaines** vivant à proximité ou travaillant sur ces sites (par ingestion, inhalation ou contact cutané).

On appelle cela la « **radioactivité naturelle technologiquement renforcée** ».

L'utilisation de combustible fossile pour produire de l'électricité génère plusieurs sous-produits nocifs pour l'environnement, notamment des gaz comme le **DIOXYDE DE SOUFRE (SO₂)** et les **OXYDES D'AZOTE (NO_x)** à l'origine du smog et des précipitations acides. Certaines centrales au charbon de l'Ontario ont toutefois recours à des technologies spéciales qui réduisent ou éliminent pratiquement ces polluants.

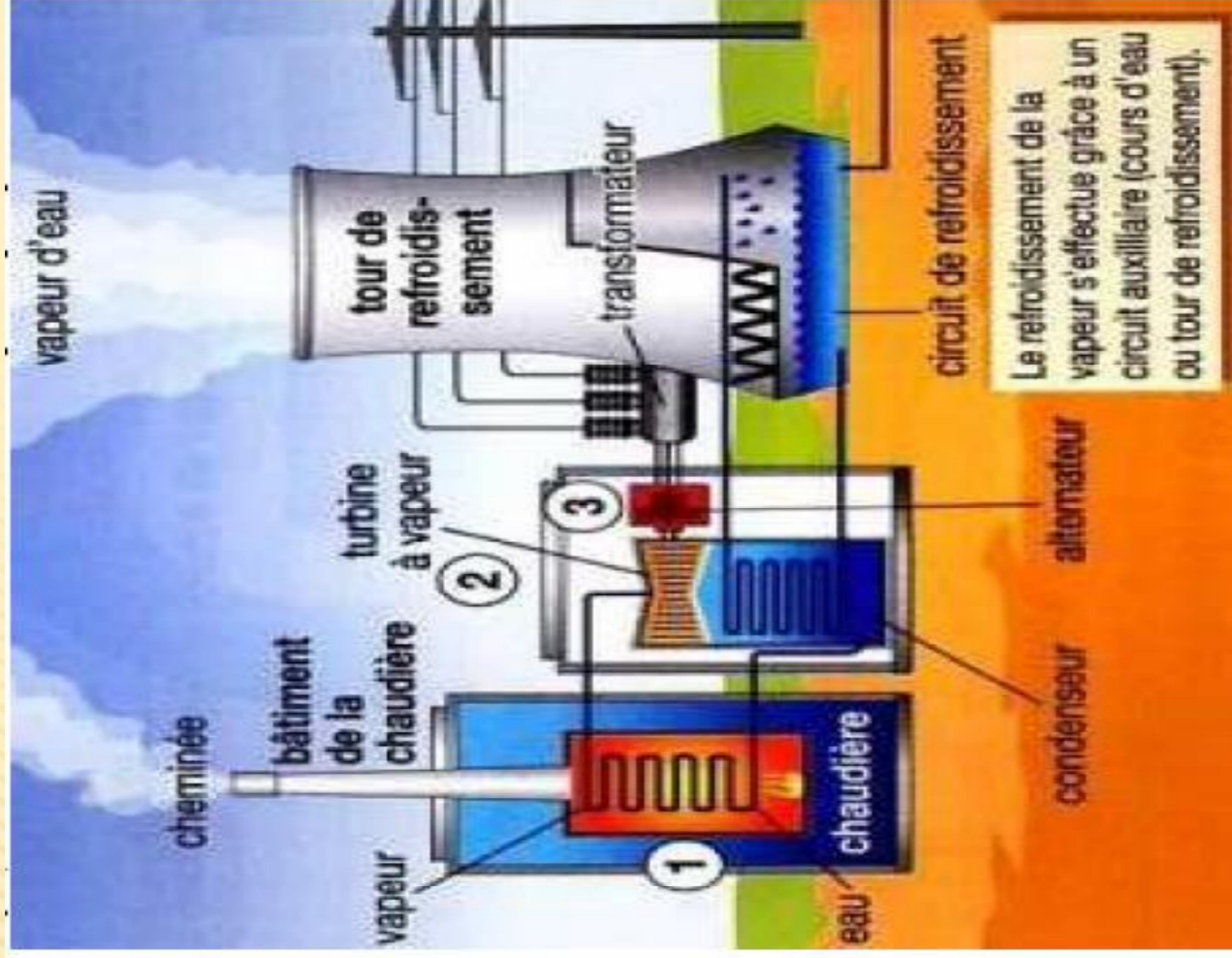
En brûlant, les combustibles fossiles rejettent aussi du **DIOXYDE DE CARBONE (CO₂)**, qui est un **GAZ À EFFET DE SERRE**. Les gaz à effet de serre piègent la chaleur dans l'atmosphère terrestre et peuvent entraîner une élévation de la température à la surface de la Terre. C'est ce que l'on appelle le « réchauffement planétaire ».

LE CYCLE DU CARBONE

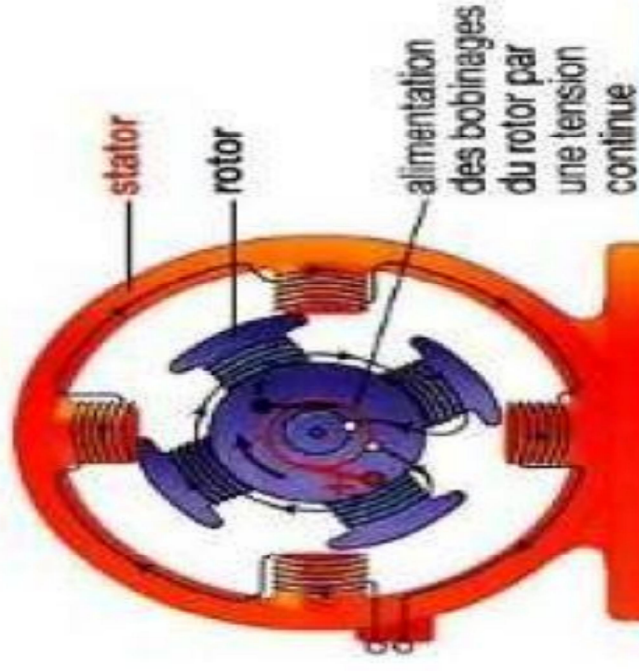


Le cycle du carbone représente la suite des transformations que subit le carbone entre l'atmosphère, le sol, les végétaux, les animaux et les combustibles fossiles. Lorsqu'on brûle un combustible fossile, où le carbone est stocké depuis des millions d'années, le dioxyde de carbone qu'il renferme est libéré dans l'atmosphère.

Exemple : Centrale thermique au charbon à Montceau-les-Mines (sud du Morvan près du Creusot (au sud de Dijon)). Est en fonctionnement restreint, ne pourra plus produire au-delà de 2015.



N°1 : Combustion (pétrole, du gaz ou du charbon)
 N°2 : Vapeur d'eau
 N°3 : Turbine - Altemateur
 N°4 : Système de refroidissement, condensation de la vapeur.

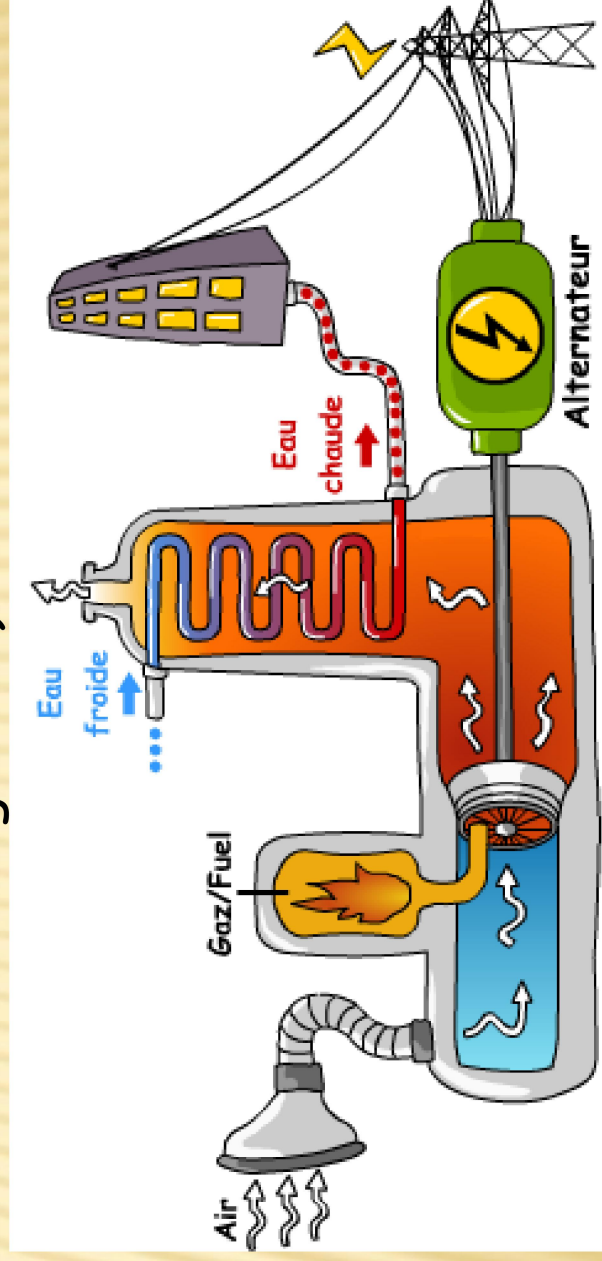


Un altemateur : il permet la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

IV-COGÉNÉRATION :

La **cogénération** consiste à produire en même temps et dans la même installation de **l'énergie thermique** (chaleur) et de **l'énergie mécanique**.

- **énergie thermique** : ⇒ chauffage
 - ⇒ production d'eau chaude par échangeur.
 - **L'énergie mécanique** transformée en **énergie électrique** (alternateur).
Elle est ensuite revendue à EDF ou consommée par l'installation.
- énergie de départ utilisée : gaz naturel, fioul ou toute forme d'énergie locale (géothermie, biomasse) ou liée à la valorisation des déchets (incinération des ordures ménagères...).



Exemple de centrale de cogénération (installation Rosen en Italie) :

Cette centrale est implantée dans une usine chimique (production de chlore, soude caustique, eau oxygénée). En 1997 la centrale de cogénération a été implantée sur le même site. Elle apporte à l'usine :

* Une **puissance électrique** de 356MW pour permettre la continuité de la fourniture électrique en cas de problème sur le réseau électrique national

* Une **puissance thermique** grâce à la production de vapeur surchauffée.

Avantages : rendement très bon (>90%)

≈ 30% à 40% de l'énergie primaire sont transformés en énergie électrique, tandis que 50 à 60% se retrouvent sous forme de chaleur moins d'émission de polluants dans l'atmosphère et limitation d'émission de gaz à effet de serre.

Les limites : problème de proximité entre la centrale de cogénération et les différents lieux où on veut récupérer l'énergie thermique.



Chapitre 2

Cycles des machines à vapeur

Objectifs

A la fin du chapitre, l'étudiant doit être capable de

- Connaitre les éléments d'une machine à vapeur
- Connaitre les différents cycles des machines à vapeur
- Calculer les rendements des différents cycles

I. Introduction

La vapeur a beaucoup d'application tant dans l'industrie que dans la vie courante. Mais nous nous intéresserons à ses applications industrielles plus précisément dans les centrales thermiques.

Les installations industrielles à vapeur sont en générale constituées :

- D'une chaudière (générateur de vapeur) : représente la source chaude de l'installation. Elle a pour rôle la production de la vapeur nécessaire au fonctionnement de l'installation.
 - D'une turbine où la vapeur vient se détendre en cédant une partie de son énergie sous forme de travail.
 - D'un condenseur : représente la source froide de l'installation. Son rôle consiste à :
 - Condenser la vapeur provenant directement de la chaudière
 - Maintenir un niveau assez bas à la sortie de la turbine
 - D'une pompe : son rôle consiste à :
 - Alimenter la chaudière à vapeur
 - Elever la pression de l'eau liquide.
-

II. Principe de fonctionnement d'une centrale thermique

Le processus de production de l'énergie électrique se base sur les conversions successives de différentes formes de l'énergie. Il peut se schématiser de la façon suivante :

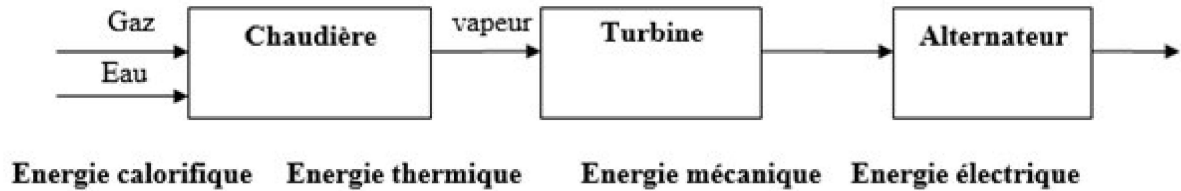


Figure 1:Processus de production de l'électricité

Le principe de fonctionnement du cycle thermique est illustré par la figure 11, l'eau chimiquement pure circule sous une très forte pression dans le générateur de vapeur se transforme sous l'action de la chaleur dégagée par la combustion en vapeur qui atteint une très haute température.

Cette vapeur produite à l'aval de la chaudière se détend progressivement dans la turbine pour être liquéfié dans le condenseur ou la pression décroît tout près du vide absolu.

L'eau condensée récupérée par les pompes est chauffée par les soutirages de vapeur à partir de la turbine et par la chaleur des gaz de la combustion avant d'être réinjectée dans le ballon de la chaudière afin de recommencer le cycle. L'énergie mécanique engendrée par la vapeur dans la turbine se transforme dans l'alternateur en énergie électrique.

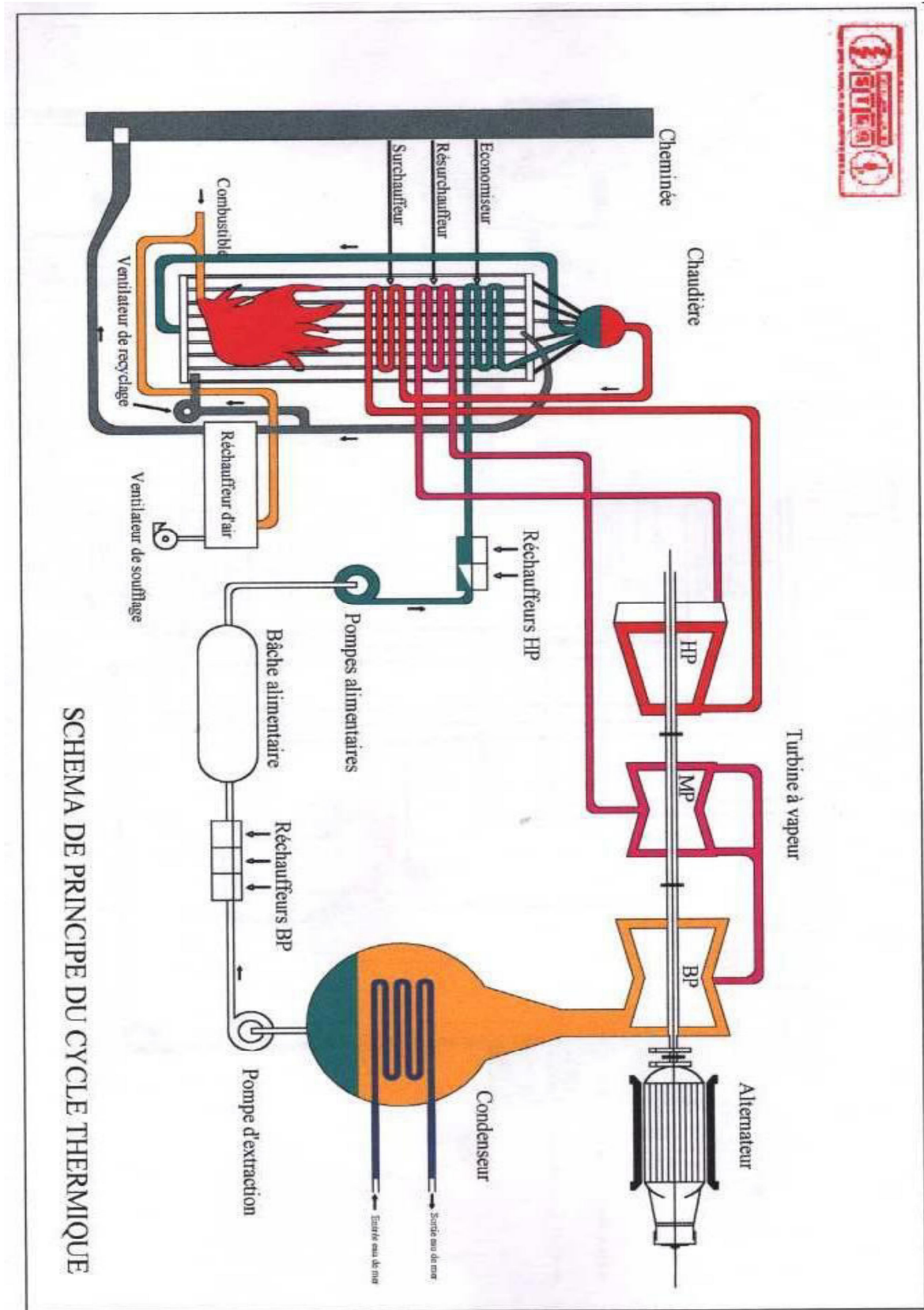


Figure 2: Schéma de principe du cycle thermique

III. Diagramme entropique

Ce diagramme est utilisé principalement pour l'étude des cycles de machines à vapeur. C'est une représentation graphique de toutes les évolutions qu'un fluide peut subir. Ce diagramme est organisé de la manière suivante :

- Sur l'axe des abscisses, on trouve l'entropie massique S exprimée en Kj/Kg.K
- Sur l'axe des ordonnées, on trouve la température T exprimée en $^{\circ}\text{C}$
- Ce diagramme est divisé en trois zones par une courbe dite courbe de saturation au sommet de laquelle se trouve un point critique qui sépare la partie du liquide saturé de celle de la vapeur saturée :
 - La partie liquide sous refroidi se trouve à gauche de la courbe d'ébullition
 - La zone à l'intérieur de la courbe de saturation correspond à la phase de changement d'état (mélange liquide-vapeur).
 - L'espace vapeur se trouve à droite de la courbe de rosée

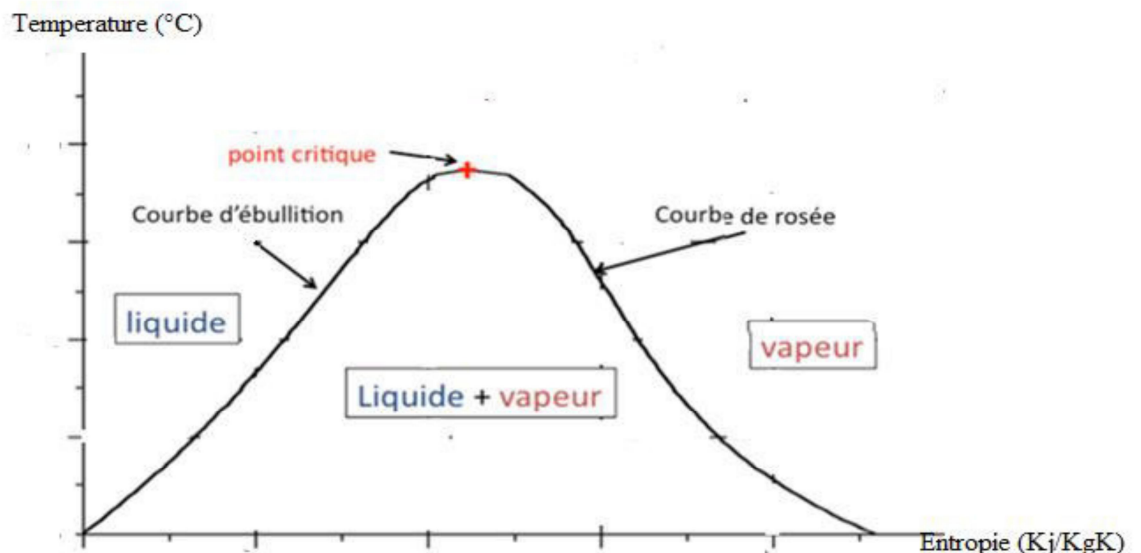


Figure 3: Diagramme entropique (T, S) de l'eau.

Les courbes de pression

Les courbes de pression représentent des pressions constantes. Elles sont appelées des isobares. Elles présentent trois allures différentes selon l'état physique de l'eau :

- Dans l'espace vapeur, les isobares sont croissantes et tendent vers des exponentielles pour les hautes températures et les faibles pressions
- Dans la zone liquide + vapeur, elles présentent un palier horizontal,

- Dans la zone liquide sous-refroidie, elles sont presque confondues.

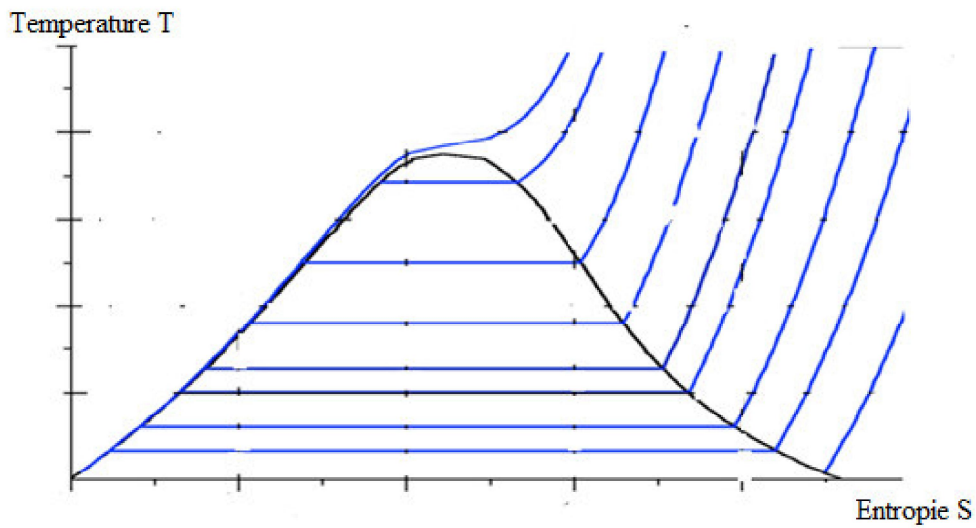


Figure 4: Courbes de pression

Le titre du mélange

A l'intérieur de la courbe de saturation, il y'a un mélange liquide plus vapeur.

Le titre de vapeur représente le pourcentage de la vapeur contenu dans un mélange. Il est utilisé pour déterminer la quantité de vapeur lors de l'évaporation ou de de la condensation

$$x = \frac{\text{masse vapeur}}{\text{masse total du fluide}} = \frac{\text{masse vapeur}}{\text{masse liquide} + \text{masse vapeur}}$$

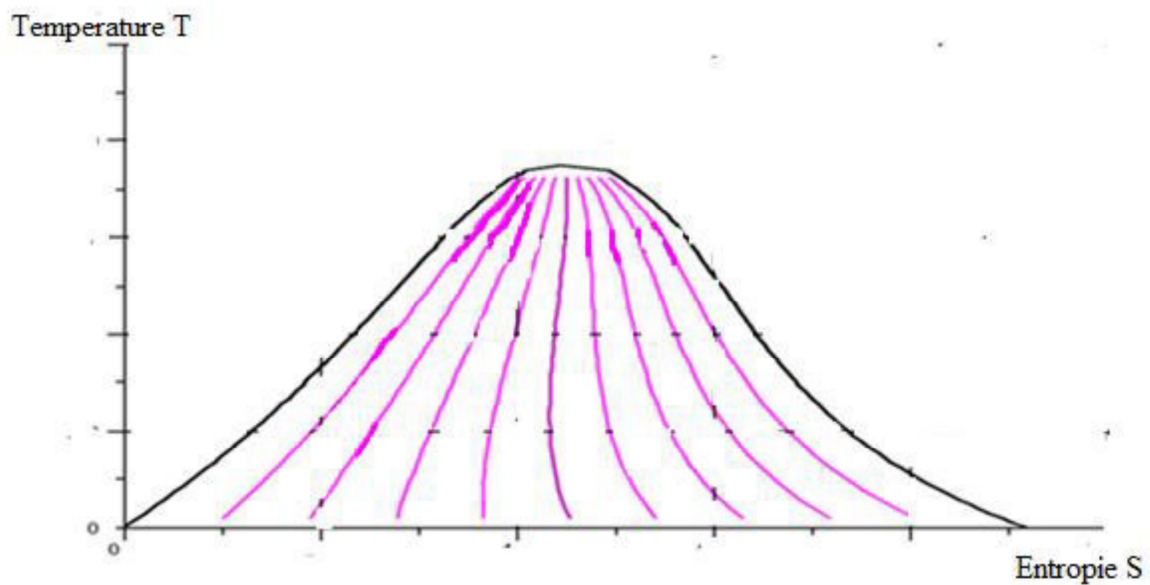


Figure 5: Titre du mélange

Les courbes isochores

Les courbes isochores sont continûment croissantes. Elles tendent vers des exponentielles quand T augmente

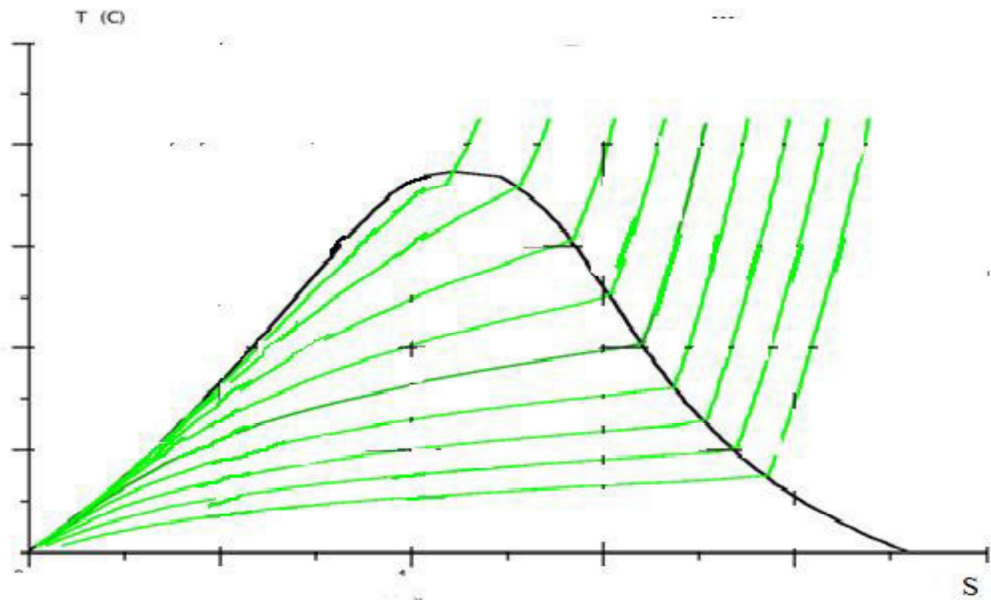


Figure 6: Courbes isochores

Les courbes isenthalpes

Les courbes **isenthalpes** représentent des entropies constantes. Elles tendent vers des asymptotes horizontales pour les basses pressions.

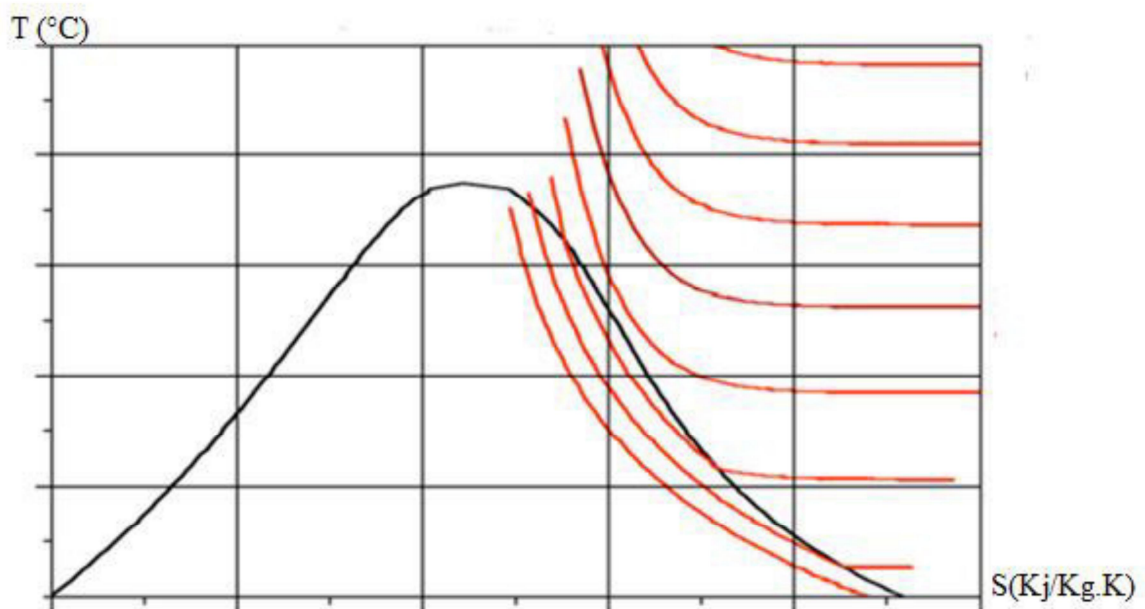


Figure 7: Courbes isenthalpes

Application

1) Dans quel état se trouve de l'eau à pression $P=100\text{bar}$ à la température de $400\text{ }^\circ\text{C}$.

L'eau se trouve à l'intersection :

- De la courbe isobare correspond à $P=100\text{ bar}$
- L'horizontal correspond à $T=400^\circ\text{C}$

L'eau à cette température et cette pression se trouve donc à l'état vapeur surchauffée.

2) L'eau décrite dans la question précédente entre dans une turbine où elle subit une détente isentropique jusqu'à 10 bar

-Déterminer à quelle pression et à quelle température la vapeur commencera à se condenser.

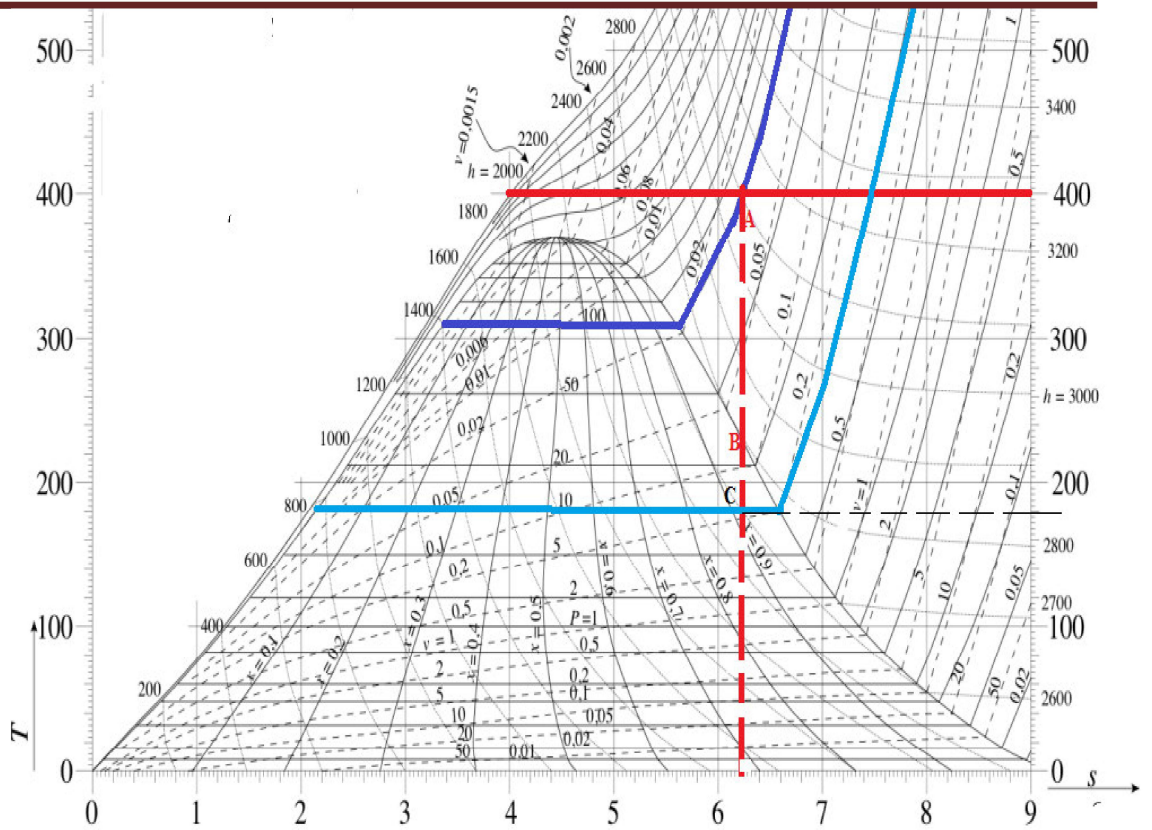
La détente est isentropique ($S=\text{cst}$). Elle est représentée par la droite verticale parallèle à l'axe des ordonnées. Cette droite coupe la courbe de rosée au point B.

$T_B=$; $P_B=$

- Déterminer le titre en vapeur en fin de la transformation isentropique

La transformation coupe l'isobare $P=$ au point C. En C, le fluide est un mélange de liquide et de vapeur.





IV. Diagramme de Mollier

Le diagramme (H, S) appelé "Diagramme de Mollier. Le diagramme est délimité en abscisse par l'échelle des entropies et en ordonnée par l'échelle des enthalpies. L'intérêt que l'on peut mesurer directement sur l'axe des ordonnées les enthalpies mises en jeu.

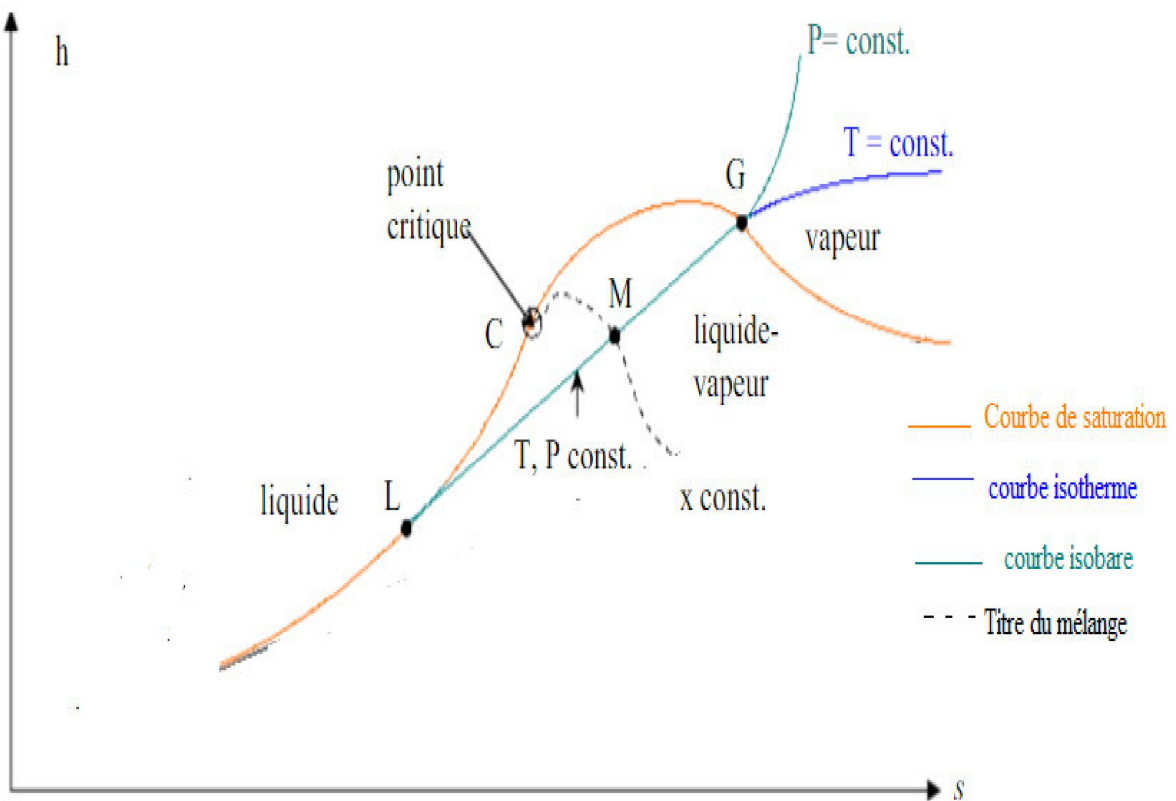


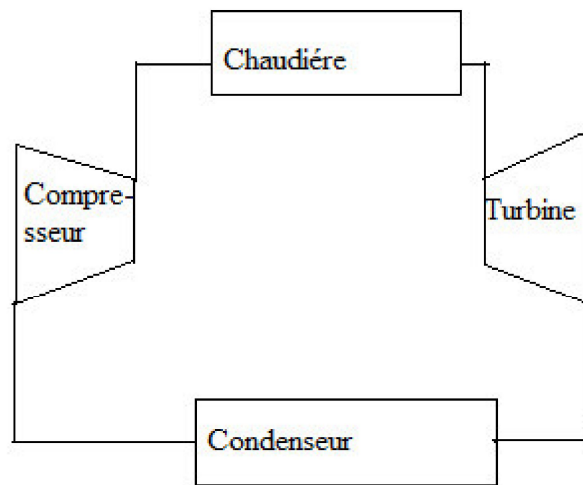
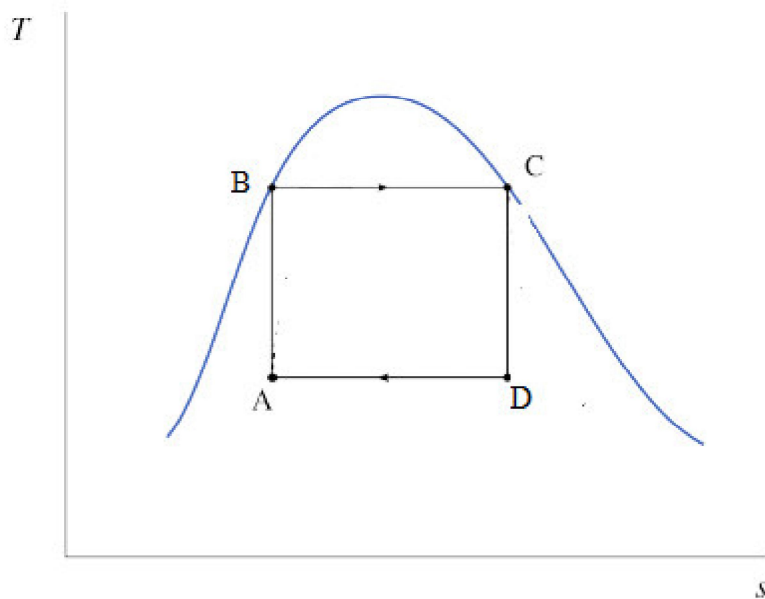
Figure 8: Diagramme de Mollier.

V. Les cycles à turbine à vapeur

1) Cycle de Carnot

a) Principe

Le cycle de Carnot est un cycle thermodynamique théorique constitué de quatre processus réversibles : une détente isotherme réversible, une détente adiabatique réversible, une compression isotherme réversible, et une compression adiabatique réversible

b) Schéma**Figure 9:** Schéma de l'installation de Carnot*c) Cycle de Rankine dans le diagramme (T, S)***Figure 10:** Diagramme température-entropie d'une centrale à vapeur fonctionnant sur un cycle de Carnot**2) Cycle de Rankine**

Le cycle de Rankine peut être considéré comme le cycle de base des turbines à vapeur. Il est constitué par deux transformations isobares (Pression constante) et deux transformations isentropiques (entropie constant)

a) Principe

Le générateur de vapeur produit de la vapeur saturée qui traverse la turbine où elle se détend avant de se condenser, puis l'eau condensée retourne à la chaudière à travers la pompe alimentaire.

b) Schéma

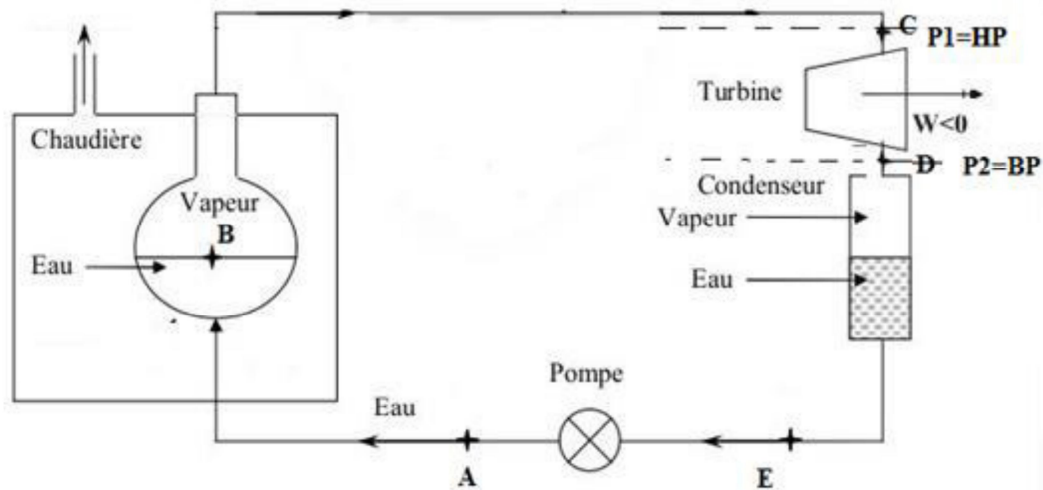


Figure 11: Schéma de l'installation de Rankine

c) Cycle de Rankine dans le diagramme (T,S)

Les différentes étapes du cycle sont les suivantes :

$A' \rightarrow B \rightarrow C$: échauffement isobare puis vaporisation dans la chaudière

$C \rightarrow D$: détente adiabatique réversible (isentropique) de P_1 à P_2

$D \rightarrow A$: fin de condensation dans le condenseur à P_2 .

$A \rightarrow A'$: compression adiabatique réversible de l'eau de P_2 à P_1

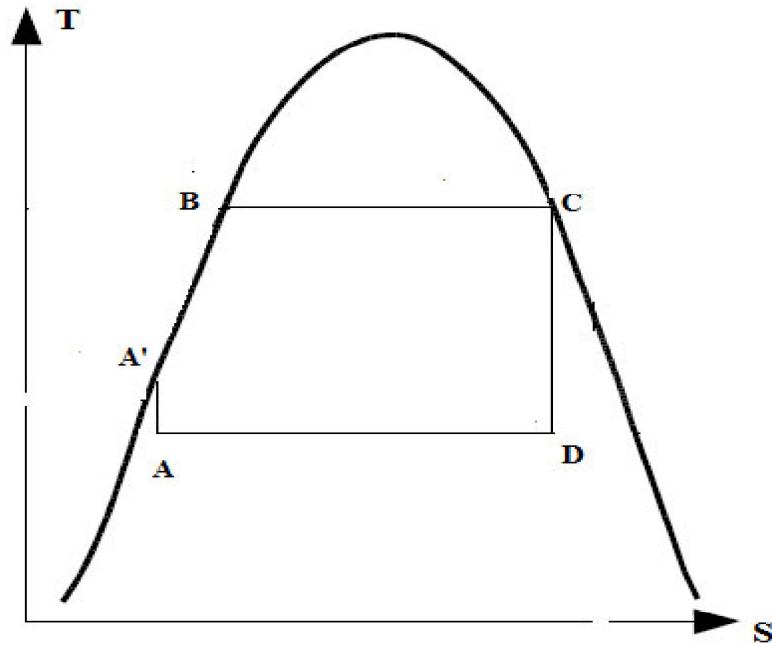


Figure 12: Cycle de Rankine en coordonnées (T, S)

d) Rendement

$$\eta = \frac{\text{Quantité de chaleur transformée en travail dans la détente}}{\text{Quantité de chaleur totale fournie au fluide}}$$

$$= \frac{H_C - H_D}{H_C - H_A}$$

e) Limite du cycle de Rankine

Dans le cycle de Rankine, une partie de la détente s'effectue dans la zone humide, ce qui peut entraîner la corrosion de la turbine. Pour remédier à ça et augmenter le rendement du moteur thermique, on réalise une surchauffe. Dans les installations industrielles, c'est le cycle de Rankine avec surchauffe à pression constante (cycle de Hirn) qui est réalisé. Ainsi, le cycle de Hirn est caractérisé par l'ajout d'un surchauffeur (figure 6.3).

3) Cycle de Hirn

Le cycle de Hirn permet de réaliser un cycle sec, c.-à-d qui en fin de détente se trouve en dehors du domaine de la vapeur humide

Pour obtenir la vapeur surchauffée, on envoie la vapeur à l'aval de la chaudière dans le surchauffeur où les produits de combustion permettent de porter la vapeur à pression constante à une température plus élevée

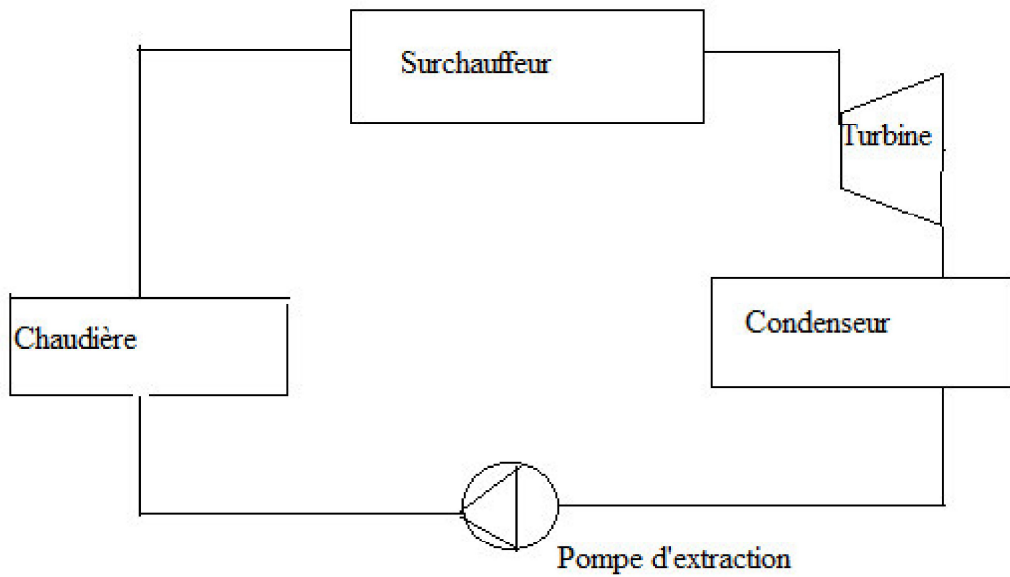


Figure 13 : Machine thermique fonctionnant suivant le cycle de Hirn

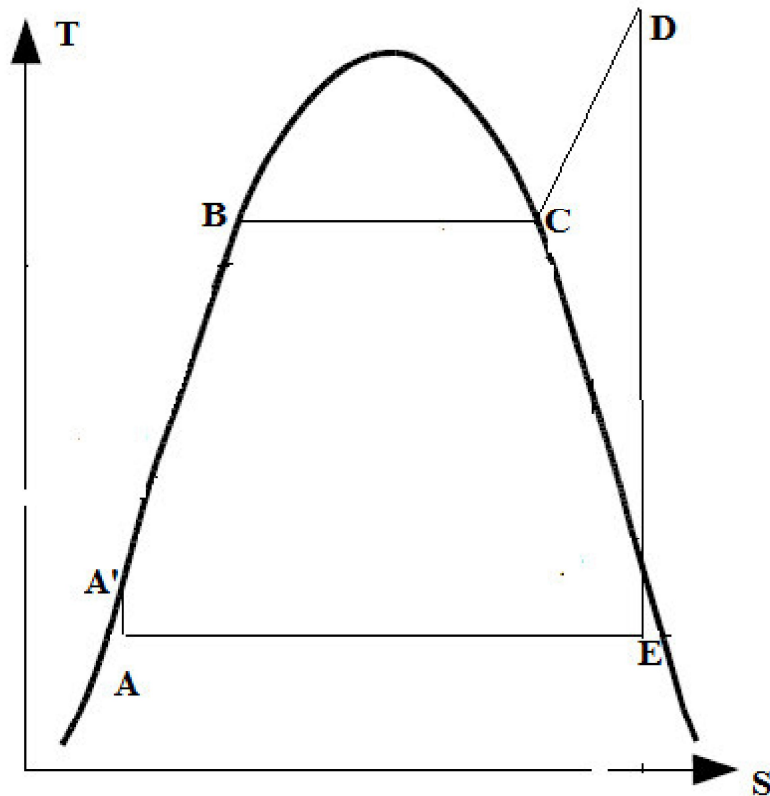


Figure 14: Cycle de Hirn

Le rendement est :

$$\eta = \frac{H_D - H_E}{H_D - H_A}$$

Intérêt de la surchauffe

La surchauffe présente plusieurs intérêts :

- Elle augmente le travail récupérable par Kg de fluide et diminue donc les débits à mettre en jeu pour une puissance donnée.
- Elle retarde l'apparition d'eau liquide au cours de la détente .La vapeur étant plus sèche, le rendement de la turbine est augmenté les pertes par humidité diminuent par la surchauffe.
- Elle améliore le rendement cyclique

4) Cycle de Hirn avec resurchauffe

La resurchauffe améliore assez modérément le rendement du cycle thermodynamique mais augmente celui des aubages (ailettes de la turbine) suite à la réduction du degré d'humidité dans les derniers étages de la turbine.

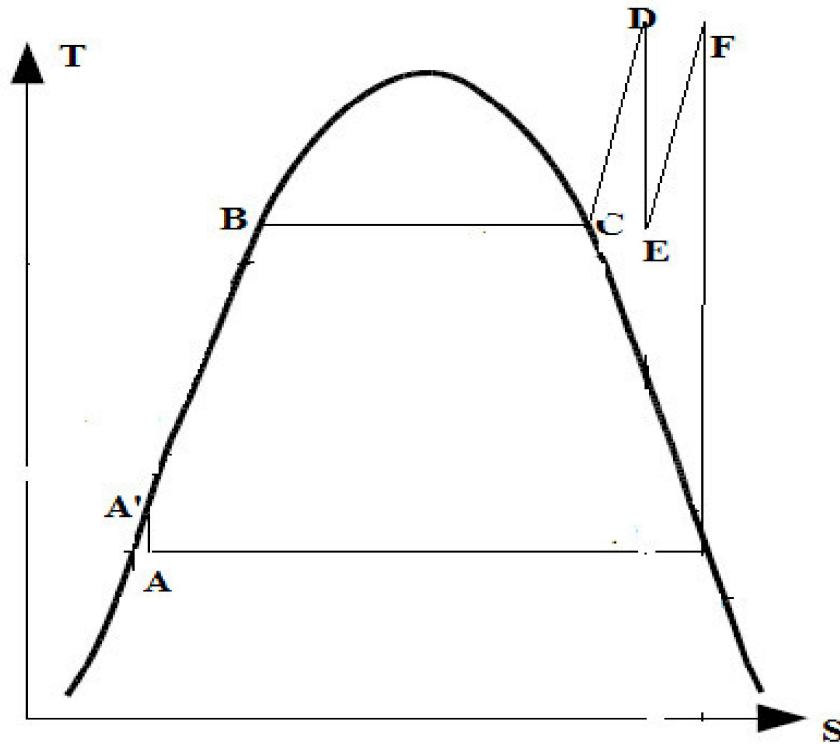


Figure 15: Cycle de Hirn à resurchauffe

Le rendement est:

$$\eta = \frac{(H_D - H_E) + (H_F - H_G)}{(H_D - H_A) + (H_F - H_E)}$$

5) Cycle à soutirages

Le principe de ce cycle consiste à extraire, à un étage de la turbine une partie du débit total de vapeur et à diriger ce débit soutiré dans la chaudière

Une partie de la chaleur contenue dans cette vapeur va, au lieu d'être rejetée en pure perte au condenseur, être transmise à l'eau d'alimentation.

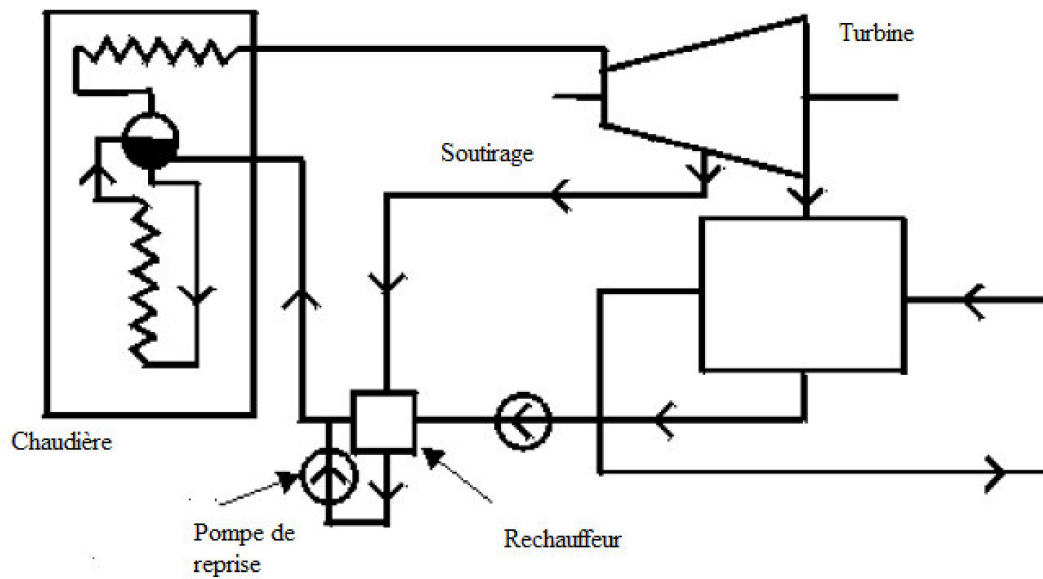


Figure 16: Machine thermique fonctionnant suivant le cycle de Hirn avec soutirage

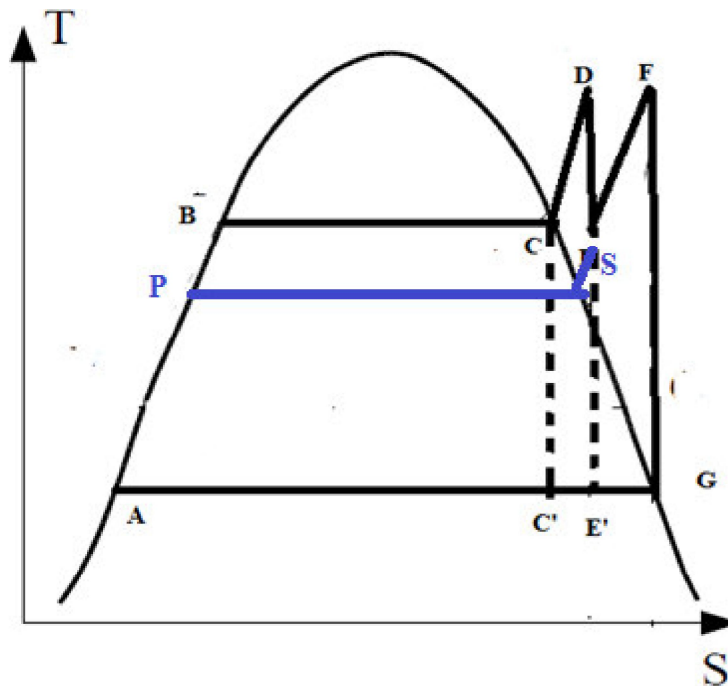


Figure 17: cycle à soutirages

Pour calculer le rendement du cycle, il faut déterminer la quantité de chaleur transformée en travail dans la détente et la quantité de chaleur total fournie au fluide.

La quantité de chaleur fournie au fluide est égale à :

$$(H_D - H_A) + q(H_D - H_S)$$

La quantité de chaleur transformée en travail dans la détente est :

$$(H_D - H_E) \times 1 \text{ (détente de 1 Kg de vapeur de D à E)} + (H_D - H_S) \\ \times q \text{ (détente de q Kg de vapeur de D à S)}$$

On peut donc écrire que le rendement s'exprime comme suit :

$$\eta = \frac{(H_D - H_E) + q(H_D - H_S)}{(H_D - H_A) + q(H_D - H_S)}$$

Comme le rendement du cycle de Hirn est :

$$\eta = \frac{H_D - H_E}{H_D - H_A}$$

On voit que le fait de soutirer de la vapeur en cours de détente revient à ajouter une même quantité de chaleur aux deux termes de la fraction qui exprime le rendement de HIRN1 un terme strictement positif. Ce qui ne peut qu'augmenter la valeur de cette fraction

Le rendement d'un cycle à soutirage est toujours supérieur au rendement d'un cycle identique mais sans soutirage.

Tous les cycles des centrales thermiques sont à soutirage; il peut y avoir 6 à 8 soutirages effectués

La figure 18 présente l'évolution du rendement en fonction du nombre de soutirage, ainsi une amélioration considérable du rendement accompagne l'augmentation du nombre de soutirage.

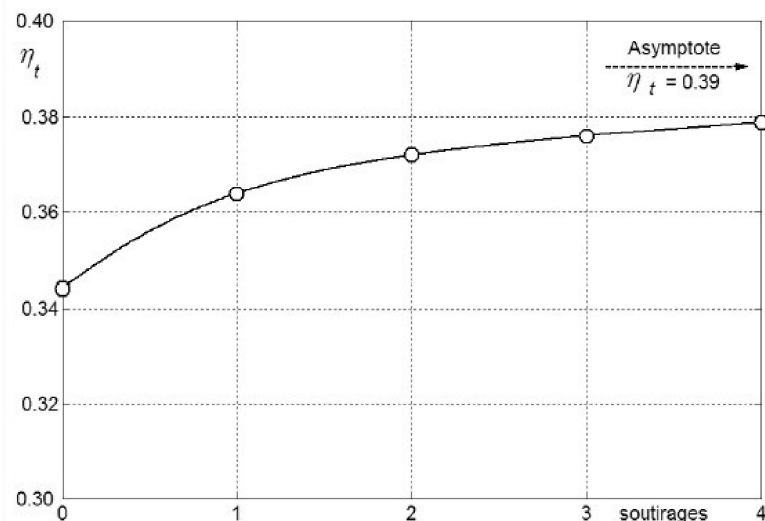


Figure 18: Evolution du rendement thermique en fonction du nombre de soutirage

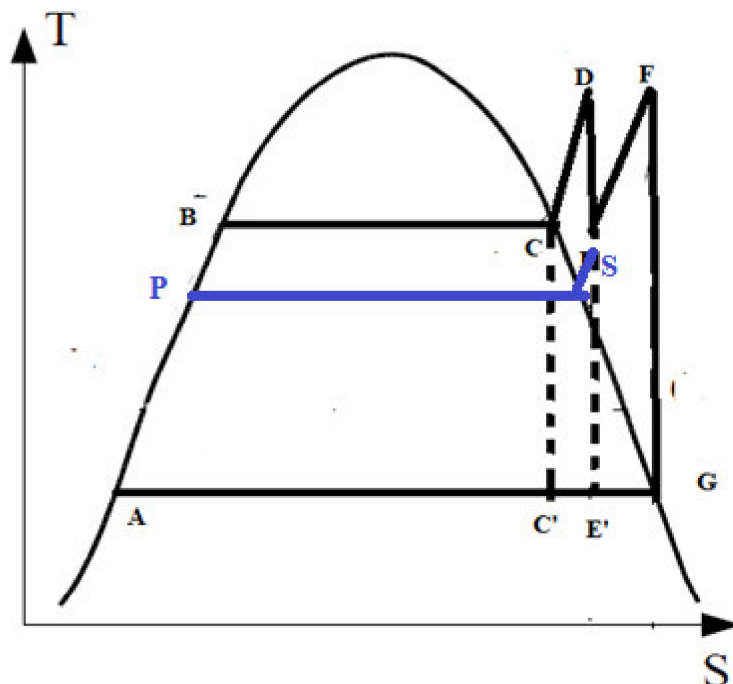
Application

Il paraît utile, pour concrétiser ce que nous venons de voir, de calculer numériquement, les rendements des différentes versions d'installation thermique que nous venons d'étudier

Considérons une installation thermique ayant les caractéristiques suivantes :

- Vapeur à l'entrée de la turbine : $T= 813\text{K}$; $P= 90\text{bar}$
- Vapeur sortie corps haute pression HP turbine : $T= 593\text{K}$; $P= 20\text{bar}$
- Vapeur sortie resurchauffeur : $T= 813\text{K}$; $P= 20\text{bar}$
- Température au condenseur : $T_c = 293\text{K}$.
- Débit de vapeur soutiré $q= 0.06 \text{ Kg de vapeur /Kg de vapeur provenant au condenseur}$

Le cycle correspondant est représenté dans le diagramme (T, S)



D'après le diagramme de Mollier les enthalpies massiques aux différents points du cycle sont regroupées dans le tableau suivant :

Point	Enthalpie massique (Kcal/Kg)
A	20
C	655
D	833
E	733
F	849
G	560
E'	520
C'	450
S	636

- Déterminer le rendement du cycle de Carnot, de Rankine, de Hirn1 et de Hirn2

$$\text{Cycle de Carnot. } \eta_{\text{carnot}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{540 - 20}{(540 + 273.15)} = 0.64$$

$$\text{Cycle de Rankine : A-A'-B-C-C'-A: } \eta_{\text{Rankine}} = \frac{H_C - H_{C'}}{H_C - H_A} = \frac{655 - 450}{655 - 20} = 0.32$$

$$\text{Cycle de Rankine surchauffé : A-A'-B-C-D-E' -A } \eta_{RS} = \frac{H_D - H_{E'}}{H_D - H_A} = \frac{833 - 520}{833 - 20} = 0.38$$

$$\text{Cycle de Rankine resurchauffé A-A'-B-C-D-E-F-G-A } \eta_{R RES} = \frac{(H_D - H_E) + (H_F - H_G)}{(H_D - H_A) + (H_F - H_E)} = \frac{(833 - 733) + (849 - 560)}{(833 - 20) + (849 - 733)} = 0.42$$

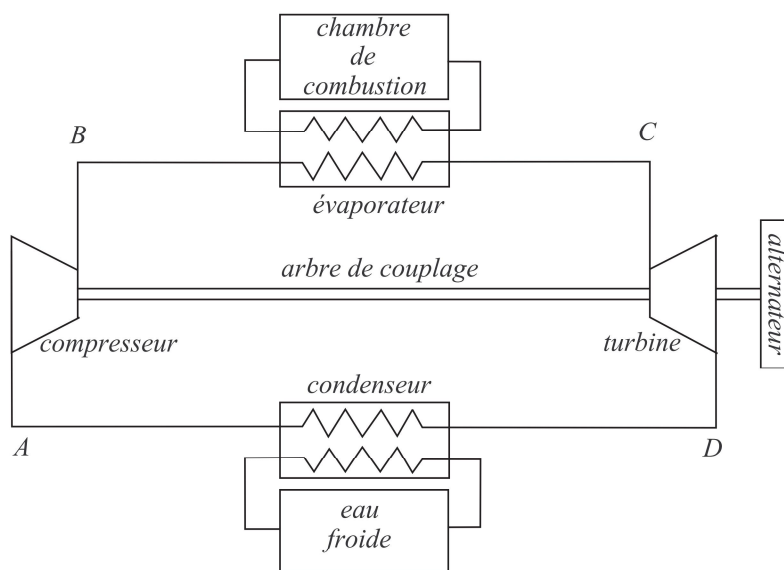
$$\text{Rendement du cycle à soutirage } \eta_{\text{soutirage}} = \frac{(H_D - H_{E'}) + q(H_D - H_S)}{(H_D - H_A) + q(H_D - H_S)} = \frac{(833 - 520) + 0.06(849 - 560)}{(833 - 20) + 0.06(849 - 560)} = 0.39$$

Le soutirage augmente le cycle de Hirn1 d'environ 1%.

Centrale thermique à turbine à vapeur (TAV)



Une centrale thermique permet la production d'électricité à partir de la combustion de fuel ou de charbon. L'eau subit différentes transformations (décrites ci-dessous) afin de produire un travail mécanique transformé en énergie électrique grâce à un couplage de la turbine avec un alternateur (voir figure).



- À l'entrée A du compresseur, l'eau est à l'état liquide saturé à la pression $P_1 = 0,2 \text{ bar}$. Elle subit une compression adiabatique réversible jusqu'à l'état B de pression $P_2 = 100 \text{ bar}$.
- Dans l'évaporateur, l'eau est en contact avec la chambre de combustion. Elle subit un réchauffement isobare de B à C . Au point C , on donne la température $t_C = 500^\circ\text{C}$.
- Dans la turbine, l'eau subit une détente adiabatique réversible. On note D le point de sortie de pression $P_1 = 0,2 \text{ bar}$.
- Dans le condenseur, l'eau entre en contact avec un circuit d'eau froide et se condense jusqu'au point A . La transformation est supposée isobare.

Pour faire l'analyse de cette centrale, vous utiliserez le diagramme thermodynamique (T, s) de l'eau.

Il est constitué de réseaux de courbes isenthalpiques et isobares.

La courbe en « cloche » est constituée des courbes de rosée et d'ébullition.

L'eau liquide étant peu compressible, on pourra confondre les points A et B ¹.

I – État de l'eau au cours du cycle

- I.1) Placer les points A , C et D sur le diagramme. Vous donnerez les explications nécessaires.
- I.2) En déduire l'état de l'eau en C , la température T_A de l'eau en A et x_D la fraction massique de vapeur au point D .
- I.3) Déterminer l'enthalpie massique h_A , h_C et h_D aux points A , C et D .

II – Bilan énergétique

- II.1) Déterminer q_{BC} et q_{DA} les transferts thermiques reçus par unité de masse d'eau au cours des transformations isobares BC et DA .
- II.2) En déduire le travail w reçu par unité de masse d'eau au cours d'un cycle et le rendement thermodynamique η de la centrale.

1. L'énoncé affirmait cela; cela vous semble-t-il cohérent avec la description de la transformation $A \rightarrow B$ qui précède?

II.3) Quel est le débit massique d'eau d nécessaire pour avoir une centrale délivrant une puissance $\mathcal{P} = 250 \text{ MW}$?

III – Cycle à deux étages

Pour éviter la présence de vapeur d'eau dans la turbine à cause d'une détente trop importante, on utilise deux turbines. On propose donc un cycle plus proche de la réalité :

- Mêmes transformations de A à C .
- En C , l'eau se détend dans une première turbine. On note D_1 l'état à la sortie. On suppose qu'en D_1 l'eau est à l'état de vapeur saturée.
- L'eau repasse dans la chambre de combustion et subit un échauffement isobare. On note C_1 l'état de sortie.
- L'eau subit une détente dans une seconde turbine. On note D_2 l'état à la sortie. On suppose qu'en D_2 l'eau est à l'état de vapeur saturée à la pression $P_1 = 0,2 \text{ bar}$.
- Enfin, l'eau entre en contact avec le condenseur et est ramenée à l'état A . La transformation est supposée isobare.

Les détentes sont toujours supposées adiabatiques réversibles.

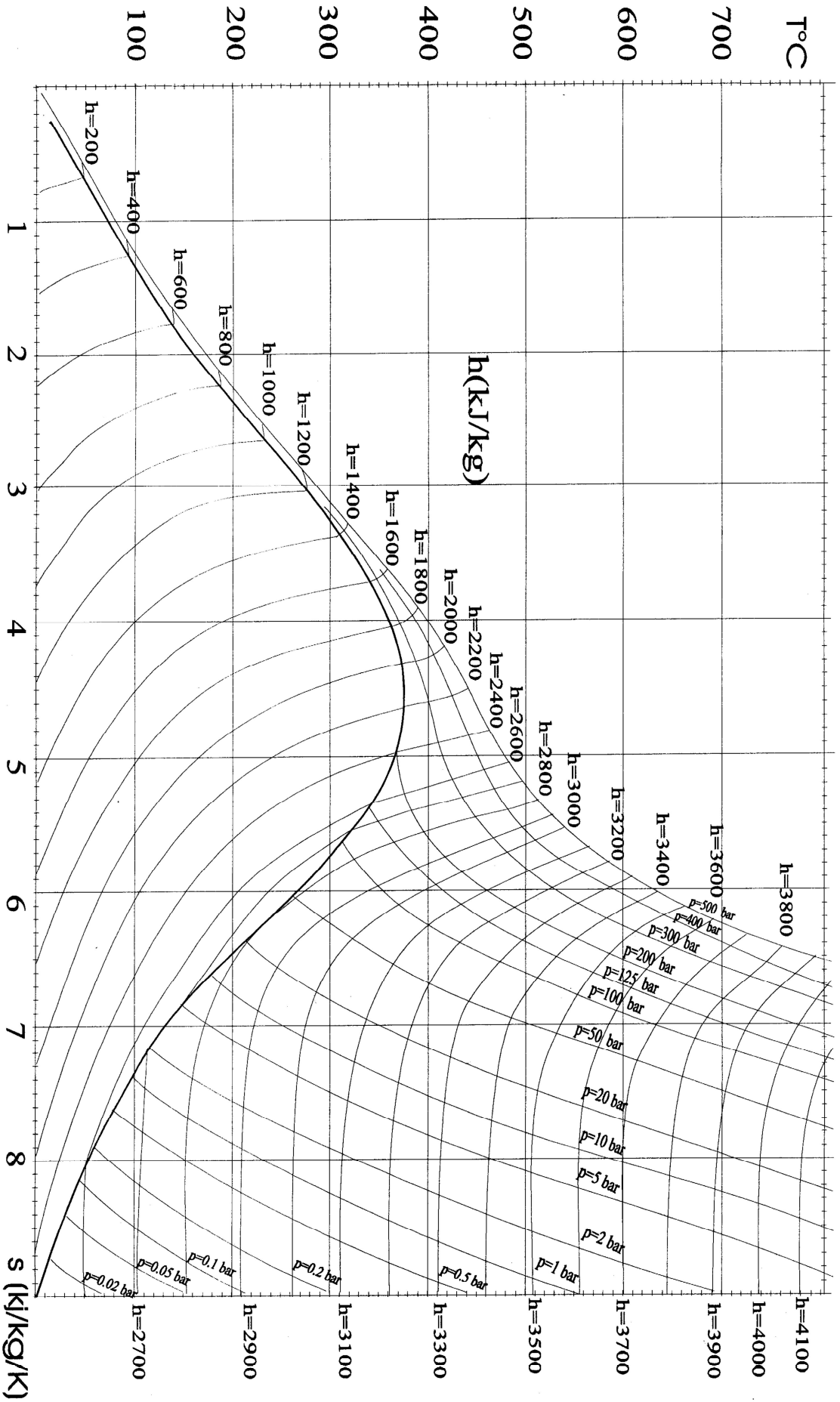
III.1) Tracer le cycle de l'eau sur le diagramme (T, s) . En déduire P_{D_1} , T_{D_1} , P_{C_1} et T_{C_1} .

III.2) Déterminer $q_{D_1C_1}$ et q_{D_2A} les transferts thermiques reçus par unité de masse d'eau au cours des transformations $D_1 \rightarrow C_1$ et $D_2 \rightarrow A$.

III.3) En déduire le travail w reçu par unité de masse d'eau sur un cycle et le rendement thermodynamique η .



Diagramme T- S de l'eau



Centrale thermique à turbine à vapeur (TAV)

Dans la machine qualifiée de turbine à vapeur on fait décrire à l'eau le cycle suivant :

- l'eau **liquide** introduite dans une pompe subit une compression isentropique de P_1 à P_2 , depuis l'état initial $A\{P_1 = 0,07 \text{ bar}; T_1 = 308 \text{ K}\}$ sur la courbe de saturation jusqu'à l'état final $B\{P_2 = 20,0 \text{ bar}; T_B\}$
- l'eau **liquide** est soumise ensuite, dans la chaudière, à un chauffage isobare qui l'amène sur la courbe d'ébullition ($B \rightarrow B'\{P_2, T_2 = 485 \text{ K}\}$) puis à une vaporisation totale ($B' \rightarrow C\{P_2, T_2\}$) à la température T_2 .
- la **vapeur** « saturante sèche » subit alors une détente isentropique de P_2 à P_1 dans la turbine ($C \rightarrow D$), la température finale est T_1 .
- la **vapeur saturante** (liquide + gaz) ainsi obtenue passe dans un condenseur qui la transforme dans les conditions $\{P_1, T_1\}$ à l'état de liquide ($D \rightarrow A$).

On raisonne sur l'unité de masse d'eau décrivant un cycle et l'on donne les caractéristiques suivantes pour ce fluide **pour l'équilibre liquide-vapeur** :

		Liquide		Vapeur	
P (bar)	T (K)	s_L (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	h_L (kJ.kg ⁻¹)	s_V (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	h_V (kJ.kg ⁻¹)
0,07	308	0,53	148	8,30	2 563
20,0	485	2,45	910	6,35	2 801

- 1) Représenter (avec les justifications nécessaires) la courbe de saturation et le cycle $ABB' CDA$:
 - a) dans le diagramme de CLAPEYRON (P, v)
 - b) **puis** dans le diagramme entropique (T, s).

Rq : Parmi ces justifications, répondre aux questions : la vaporisation totale $B' \rightarrow C$ se fait à quelle pression ? Le point C est où par rapport à la courbe de rosée (à gauche, à droite, sur la courbe) ? L'isentropique CD est comment par rapport à la courbe de rosée ? . . .

- 2) Calculer le titre massique de la vapeur $x_{V,D}$ à la sortie de la turbine.

Rép : $x_{V,D} = 0,75$.

- 3) Déterminer, grâce au tableau, l'enthalpie massique du fluide dans les états A et B pour lesquels on suppose $h_B \simeq h_A$, puis pour les états C et D .

→ en déduire les transferts thermiques massiques reçu par le fluide au contact de la chaudière (q_1) et du condenseur (q_2).

- 4) On rappelle qu'à la traversée d'une partie active (compresseur, turbine, chaudière ou condenseur) le premier principe appliqué au fluide circulant en régime permanent vérifie :

$$\Delta h = h_s - h_e = w^* + q$$

avec : h_e et h_s les enthalpies massiques du fluide à l'entrée et à la sortie, w^* et q étant le travail et la chaleur massiques **utiles** (c'est-à-dire échangés avec l'extérieur du circuit à l'exclusion du travail des forces de pression) reçus par le fluide à la traversée de la partie active.

→ Calculer le travail reçu par le fluide à la traversée de la turbine w^* .

Commenter son signe.

- 5) Calculer le rendement de cette machine (turbine à vapeur) défini par $\eta = \left| \frac{w^*}{q_1} \right|$.

Centrale thermique à turbine à vapeur (TAV)

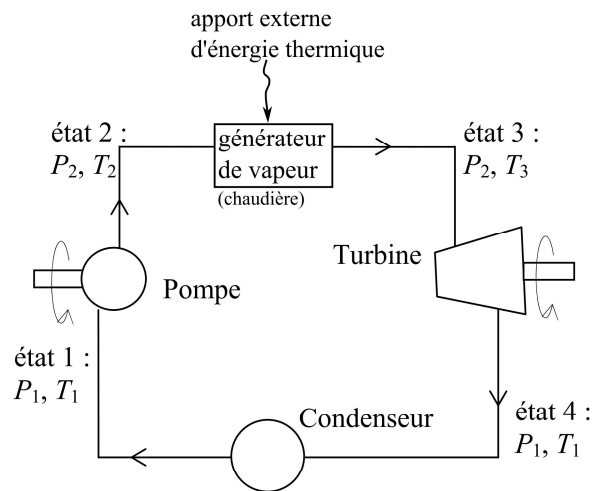
Une centrale thermique produit de la chaleur en brûlant un combustible fossile (charbon, gaz naturel). Une centrale nucléaire produit également de la chaleur en exploitant des réactions nucléaires de fission. Dans ces deux cas, il faut trouver un moyen de convertir cette énergie thermique en travail mécanique (rotation d'un arbre) qui peut ensuite, via un alternateur, être convertie en électricité.

La plupart des centrales thermiques ou nucléaires utilisent pour cela un cycle basé sur le cycle de Rankine (avec bien sûr des perfectionnements), que nous allons étudier ici. C'est aussi une version perfectionnée de ce cycle de base qui est utilisé dans les machines à vapeur des bateaux (la source de chaleur est alors une chaudière), ou dans les bateaux et sous-marins nucléaires (la source de chaleur est un réacteur nucléaire).

Le fluide caloporteur est l'eau. Il entre dans la pompe sous forme de liquide saturé (état 1), puis est comprimé de façon isentropique (adiabatique réversible) à la pression qui règne dans le générateur de vapeur (GV). En entrant dans le GV, l'eau se trouve sous forme de liquide comprimé à la pression p_2 (état 2). Elle ressort sous forme de vapeur (état 3) à la même pression p_2 puis pénètre dans la turbine où elle se détend de façon isentropique (adiabatique réversible) en entraînant l'arbre de l'alternateur. À la sortie de la turbine (état 4), l'eau est diphasée. Ce mélange liquide-vapeur est alors liquéfié à pression constante dans le condenseur et ressort dans l'état 1.

Il n'y a pas de parties mobiles dans le GV et dans le condenseur.

On utilise le diagramme entropique de l'eau fourni à la fin du document (doc. 2). Il représente la température en fonction de l'entropie massique de l'eau. On donne également une représentation schématisée (doc. 1) du diagramme $T-s$.



1. Sur cette représentation schématisée (doc. 1), indiquer la courbe de rosée, d'ébullition, le domaine du liquide, de la vapeur, de l'équilibre diphasique, ainsi que ce qui représente une évolution isobare et une évolution isenthalpique.

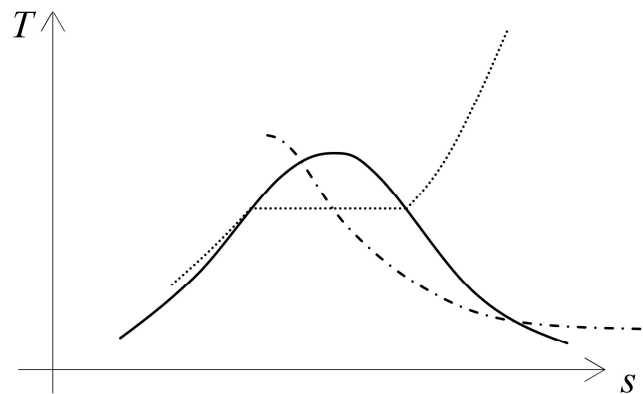
On donne $p_2 = 50 \times 10^5 \text{ Pa}$, $p_1 = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$, $T_3 = 773 \text{ K}$ (500°C). Les points 1 et 2 figurent déjà sur le diagramme $T-s$ de l'eau fourni.

2. Sur le diagramme expérimental (doc. 2), placer les points 3 et 4 qui correspondent aux états 3 et 4 du fluide, et tracer le cycle de Rankine décrit par le fluide.
3. Toujours à l'aide du même diagramme, donner les valeurs numériques de T_1 , h_3 , h_4 , s_4 , $s_v(T_1)$ entropie massique de la vapeur juste saturante à T_1 , et $s_l(T_1)$ entropie massique du liquide juste saturé à T_1 .
4. Dédurre de la question précédente la valeur du titre en vapeur x_4 à la sortie de la turbine. On exprimera pour cela s_4 en fonction de x_4 , $s_v(T_1)$ et $s_l(T_1)$.
5. On donne $h_1 = 440 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $h_2 = 475 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Exprimer puis calculer le transfert thermique massique q_{GV} reçu par le fluide dans le GV. Commenter son signe.
6. Faire de même pour le transfert thermique massique q_{cond} reçu par le fluide dans le condenseur. Commenter son signe.

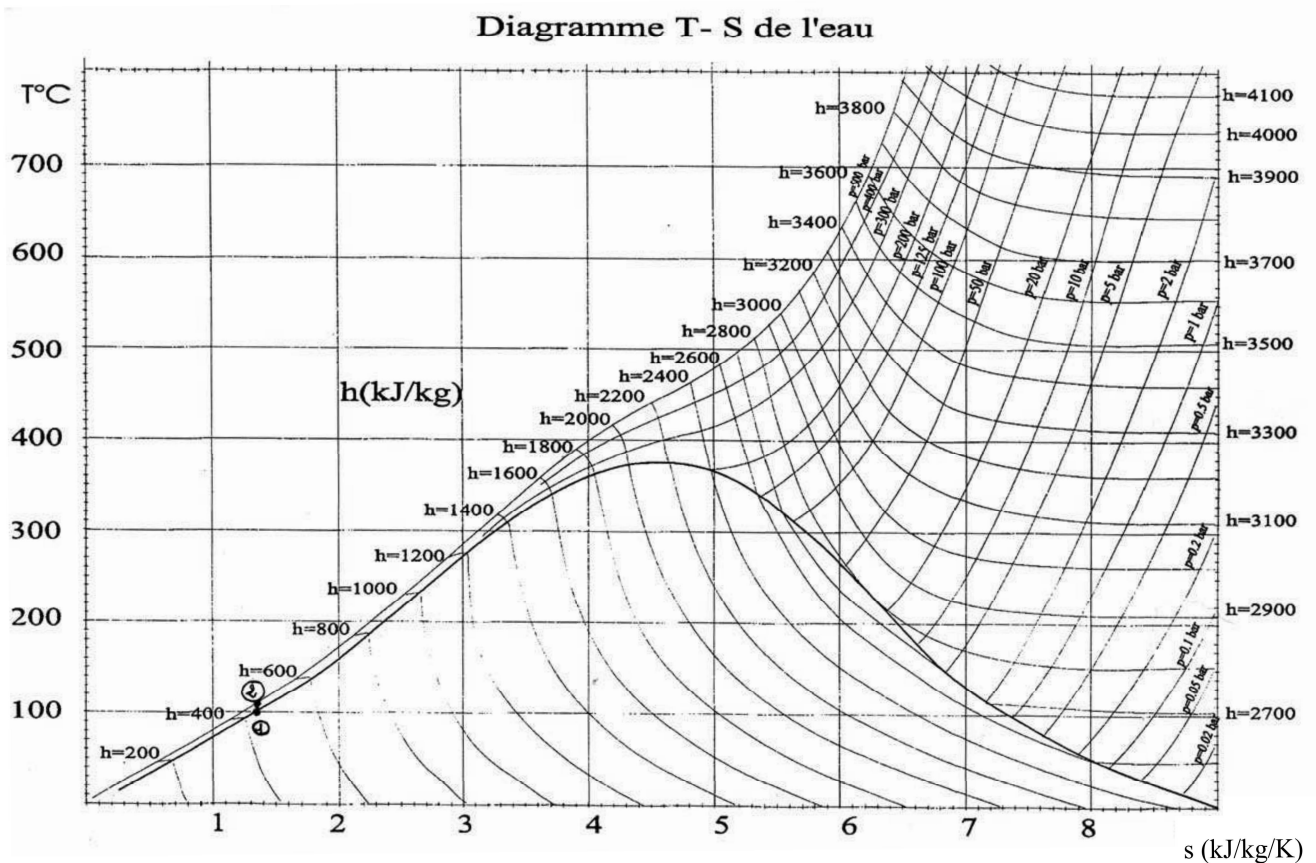
7. On considère qu'il y a une masse m d'eau en écoulement dans le système. En appliquant le premier principe sur un cycle au fluide caloporteur, donner l'expression du travail reçu W par le fluide au cours du cycle en fonction de m , q_{GV} et q_{cond} .
8. Définir le rendement η du cycle, puis donner son expression en fonction de q_{GV} et q_{cond} , et enfin donner sa valeur numérique dans le cas considéré ici (les données de l'énoncé correspondent à la propulsion d'un sous-marin nucléaire).
9. Si on estime que le sous-marin a besoin d'une puissance motrice de 60 MW sur l'arbre en sortie de la turbine, quelle doit être la puissance thermique apportée par le réacteur nucléaire ?
10. Calculer le travail indiqué massique reçu par le fluide lors de son passage dans la pompe, puis dans la turbine.

Le travail nécessaire au fonctionnement de la pompe est en fait prélevé sur l'arbre moteur de la turbine. Il convient donc de le retrancher au travail produit par la turbine. Donner l'expression puis la valeur du travail massique exploitable w_{net} que l'on récupère sur l'arbre moteur.

Enfin, quel débit massique faut-il imposer dans la machine pour assurer une puissance motrice de 60 MW sur l'arbre en sortie de la turbine ?



(doc. 1) Diagramme T-s schématique à compléter.



(doc. 2) Diagramme T-s de l'eau à compléter avec le cycle.