

6 Production d'énergie électrique

6.1 Centrales hydrauliques et thermiques (62,9% % de l'électricité suisse en 2003)

Généralités:

Les centrales hydrauliques et thermiques transforment de l'énergie mécanique ou thermique en énergie électrique via un ensemble turbine-alternateur.

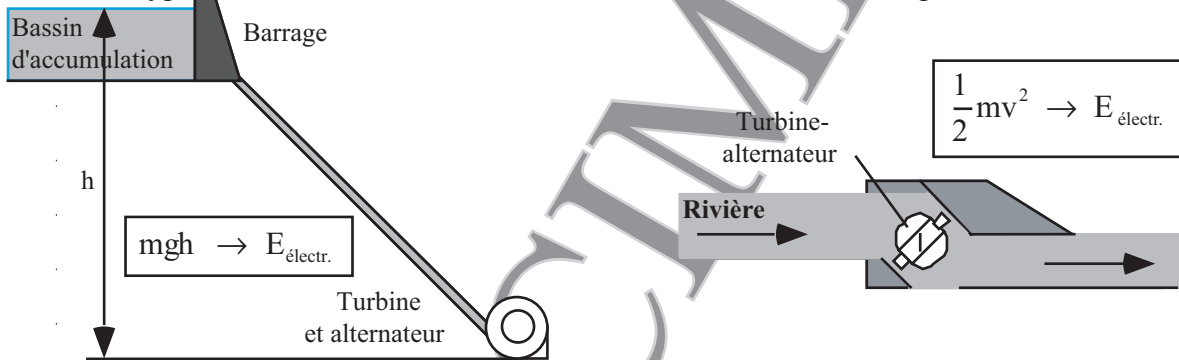
Les centrales hydrauliques utilisent soit l'énergie potentielle de l'eau stockée dans un barrage, soit l'énergie cinétique de l'écoulement d'une rivière ou d'un fleuve. Elles se distinguent par leur bon rendement (plus de 90%) et par une très grande souplesse d'utilisation qui permet de répondre rapidement aux variations de la demande du réseau de distribution d'électricité. De plus, elles ne sont pas polluantes.

Centrales à accumulation: (33,5 % en 2003)

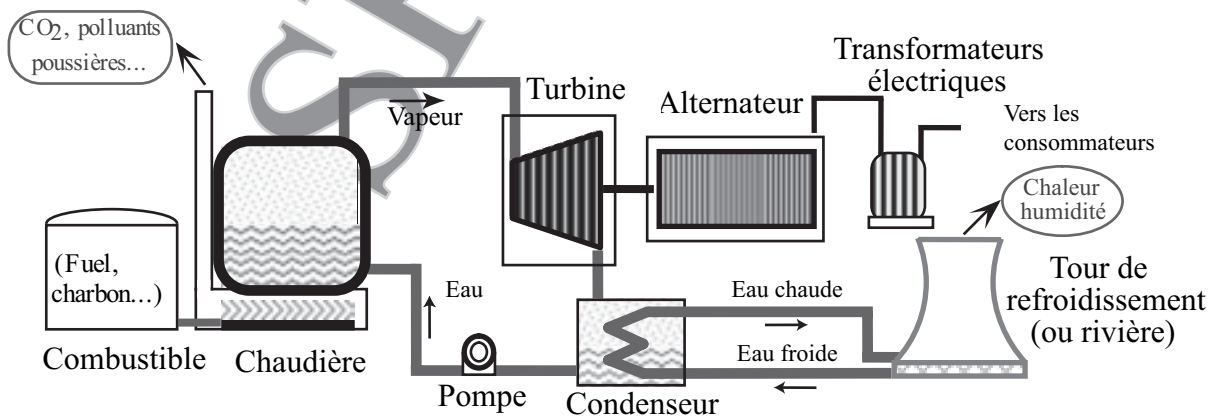
Centrales au fil de l'eau: (25,1 % en 2003)

Turbines de type Pelton

Turbines Francis, Kaplan.



Les centrales thermiques (4,3% % de l'électricité suisse en 2003) transforment l'énergie thermique de la vapeur produite dans une chaudière en énergie cinétique dans une turbine qui fait tourner un alternateur produisant enfin de l'énergie électrique. Les grandes centrales thermiques produisant de l'électricité fonctionnent au fuel ou au charbon, voire à la lignite. Elles sont très polluantes et grandes productrices de CO₂.



On peut cependant, dans des perspectives plus respectueuses de l'environnement, utiliser des combustibles comme le bois, les ordures ou d'autres déchets.

Le rendement des centrales thermiques est malheureusement très faible, l'énergie électrique produite ne représentant que 40% de la chaleur créée dans la chaudière.

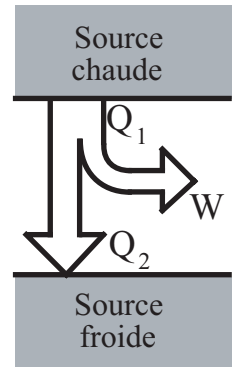
Les lois de la thermodynamique, énoncées dès 1824 par Saadi Carnot (1796-1832) puis formalisées en 1854 par Rudolf Clausius (1822-1888), expliquent comment fonctionnent les machines thermiques. Un moteur thermique, comme une centrale, extrait de la chaleur Q_1 d'une source chaude (la chaudière) pour en transformer une partie en travail mécanique W et transmettre le reste Q_2 à une source froide (tour de refroidissement ou rivière).

Le rendement est bien sûr le rapport W/Q_1 et le *second principe* de la thermodynamique nous montre que le meilleur rendement d'une telle machine ne dépend que des températures des deux sources et vaut:

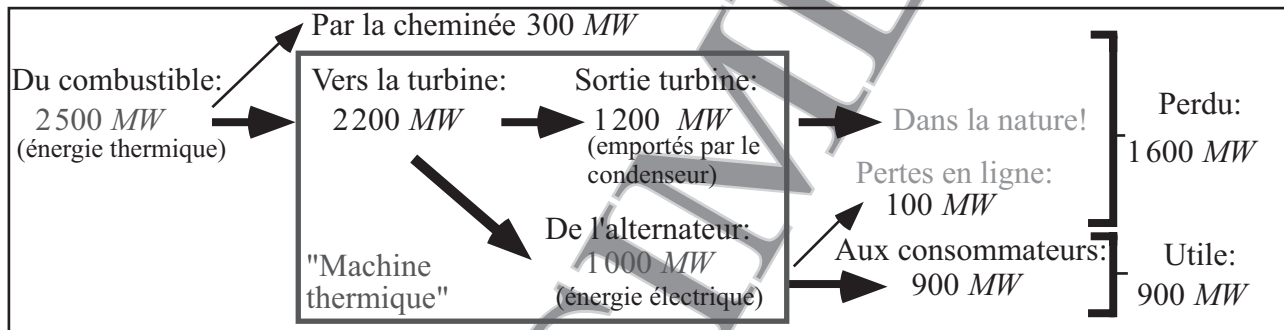
$$\eta = \frac{T_c - T_f}{T_c} = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad [-]$$

avec: T_c : température de la source chaude [K]

T_f : température de la source froide [K]



Exemple de bilan énergétique d'une centrale thermique de 40% de rendement:



6.2 Centrales nucléaires et filières (37,1 % de l'électricité produite en Suisse en 2003)

Il s'agit simplement de centrales thermiques dont la chaudière est constituée d'un réacteur nucléaire.

Principes de fonctionnement d'un réacteur nucléaire:

Dans le cœur du réacteur se trouvent des *barres de combustible* dans lesquelles la fission a lieu. Ces barres baignent dans le modérateur qui permet, par succession de chocs élastiques, d'abaisser la vitesse des neutrons issus des fissions d'environ 20000 km/s à 2 km/s, vitesse à laquelle ils sont dits *thermiques* et peuvent provoquer la fission de nouveaux noyaux d'Uranium-235 afin d'entretenir une réaction en chaîne.

Des *barres de contrôle* faites de cadmium, un absorbant vorace en neutrons, permettent de contrôler la réaction en chaîne en les introduisant plus ou moins dans le cœur ; on peut ainsi la faire croître lors du démarrage, décroître pour abaisser la puissance ou l'arrêter, et surtout la maintenir en régime critique lors du fonctionnement normal durant lequel le taux de fissions doit rester constant.

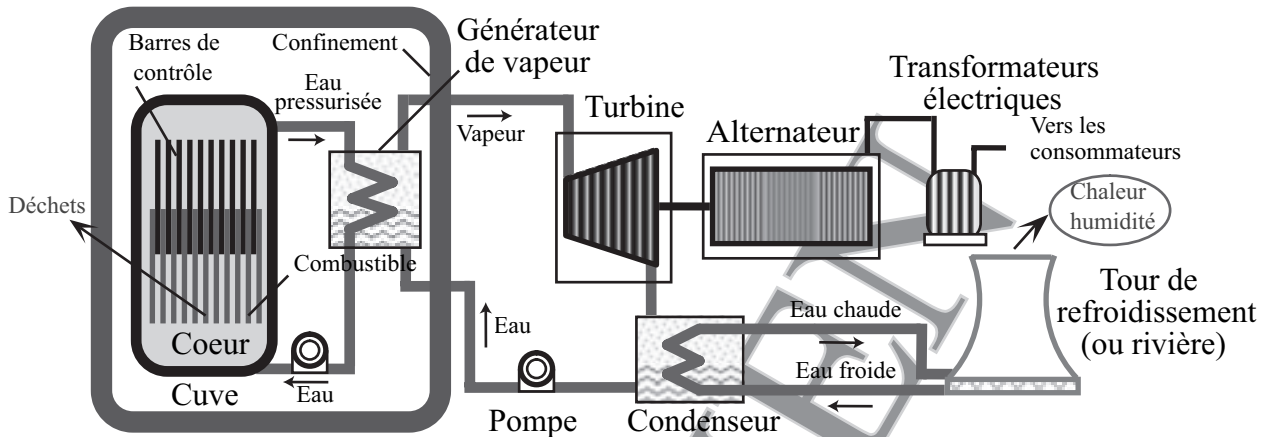
L'énergie cinétique des neutrons et des fragments de fission absorbés dans le réacteur est transformée par frottement dans le matériau combustible en une grande quantité d'énergie thermique. Le *fluide caloporteur* circulant autour des barres de combustible emporte cette énergie à l'extérieur du cœur pour la transmettre à la turbine, généralement par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur (générateur de vapeur).

Fortement radioactif pendant le fonctionnement à cause du flux de neutrons, le cœur du réacteur est confiné, généralement dans une cuve d'acier doublée d'une forte enceinte de béton.

Filières:

Les réacteurs sont classés en *filières* selon le type de combustible, le matériau modérateur et le fluide caloporteur.

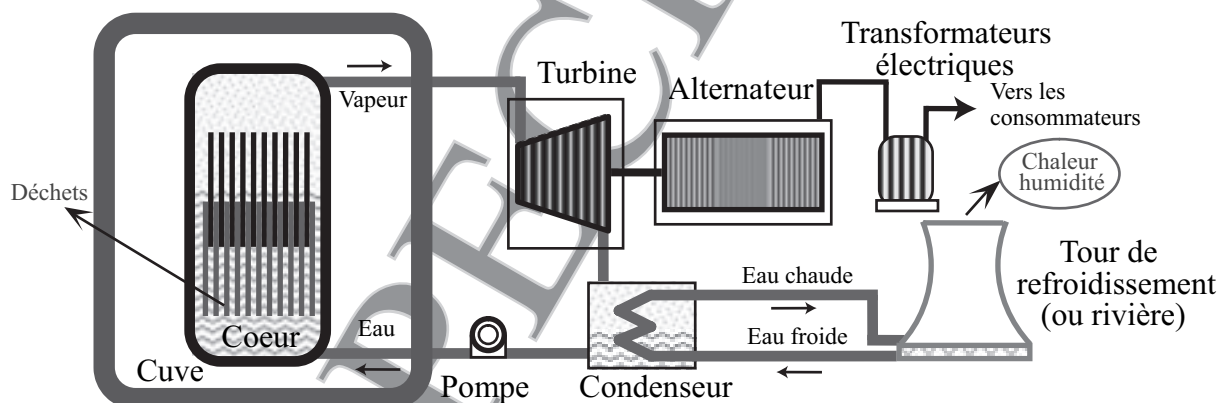
Filière à eau légère :



Réacteurs à eau sous pression, REP (ou PWR pour Pressurized Water Reactor):

Il s'agit de la filière la plus développée dans le monde occidental (environ les deux tiers du parc mondial). L'eau légère sert à la fois de modérateur et de fluide caloporteur. Le combustible est de l'Uranium enrichi à 3%. Les meilleurs rendements des centrales à REP sont de l'ordre de 33%.

Exemples en Suisse: Beznau I 365 MW, Beznau II 357 MW et Gösgen 970 MW



Réacteurs à eau bouillante, REB (ou BWR pour Boiled Water Reactor):

Filière développée aux USA, au Japon et en Suède; variante de la précédente mais avec de l'eau en ébullition dans le cœur. Même combustible.

Exemples en Suisse: Mühleberg 355 MW et Leibstadt 1165 MW

Filière à eau lourde:

L'utilisation de l'eau lourde comme modérateur et comme fluide caloporteur permet l'utilisation d'uranium naturel comme combustible. Le Canada avec les réacteurs CANDU et l'Inde ont adopté cette filière, filière d'ailleurs particulièrement productrice de plutonium.

Filière UNGG:

Avec de l'uranium naturel, du graphite comme modérateur et du gaz carbonique comme fluide caloporteur, cette filière a été celle des premiers réacteurs français et des réacteurs anglais MAGNOX.

Une modernisation de cette filière UNGG pourrait déboucher dans le futur sur nouvelle génération de réacteurs à haute température (HTR) utilisant de l'hélium comme caloporteur et permettant d'espérer des rendements s'approchant de 50%.

Filière RBMK:

Les réacteurs de cette filière utilisent de l'uranium légèrement enrichi (1,8%) avec du graphite comme modérateur et sont refroidis à l'eau bouillante. Ils constituent 40% du parc de l'ex-URSS. L'accident de Tchernobyl était le fait d'un RBMK.

Filière à neutrons rapides:

Dans un réacteur à neutrons rapides, il n'y a pas de modérateur et les neutrons rapides fissionnent un combustible constitué de 15 à 18% de Plutonium. Ces réacteurs sont des *surgénérateurs* qui produisent aussi du Plutonium à partir d'Uranium-238. Le liquide caloporteur est alors du *sodium liquide sous pression*. Produisant non seulement de l'énergie mais aussi du combustible fissile, cette filière, promettait de prolonger l'ère de l'électronucléaire bien au-delà des limites imposées par les réserves limitées d'uranium sur la planète. Cependant, sa technologie délicate n'est pas encore maîtrisée et le récent abandon très coûteux de Superphénix à Creys-Malville (F) illustre bien l'impasse dans laquelle elle se trouve.

Le parc des centrales nucléaires suisses:

Nos cinq centrales nucléaires participent pour environ 40 % à la production d'électricité du pays. Les réacteurs sont de la filière à eau ordinaire (ou légère) et fonctionnent avec de l'Uranium enrichi (de 2,5 à 3,5 % d'Uranium 235); l'eau sert à la fois de modérateur et de fluide caloporteur. Les déchets de nos centrales sont ou bien retraités à l'étranger ou bien stockés dans l'attente d'une solution technique et d'une décision politique...

	Type	Mise en service	Refroidissement	Puissance électrique [MW]	Production annuelle [GWh] (2003)
Beznau I	REP	1969	Rivière	365	3 062
Beznau II	REP	1971	Rivière	357	2 920
Mühleberg	REB	1972	Rivière	355	2 744
Gösgen	REP	1979	Tour	970	7 899
Leibstadt	REB	1984	Tour	1 165	9 309
			Total	3 212	26 024



Centrale nucléaire de Mühleberg

©BKW FMB Energie AG

6.3 Combustibles et déchets:

Aujourd'hui la plupart des réacteurs utilisent de l'Uranium enrichi. En partant du minerai qu'on traite chimiquement, on obtient un concentré de dioxyde d'Uranium UO_2 sous forme de poudre jaune appelée le *yellow cake*. On en fait alors de l'hexafluorure UF_6 solide destiné à l'enrichissement (de 0,7 %, on passe à 3-4 %). Cette opération se fait par diffusion gazeuse ou ultracentrifugation, des procédés de séparation isotopique longs et répétitifs. Revenu à l'état de dioxyde, ce matériau est ensuite préparé en petites *pastilles* d'environ 1 cm qui s'empilent dans des gaines de zirconium de plusieurs mètres de hauteur pour former les *crayons*; ceux-ci sont regroupés en *éléments* ou *assemblages* de combustible. Pour un REP de 900 MW on a typiquement plus de 150 assemblages de 264 crayons chacun.

La masse totale d'Uranium dans le coeur d'un réacteur à eau légère est d'environ 80 t pour un REP et de 110 t pour un REB. Dans le premier cas 1/3 de cette masse doit être renouvelée annuellement et 1/4 à 1/5 dans le second. En effet, on remplace périodiquement les crayons les plus irradiés. Ces assemblages de combustible usagé, contenant les déchets que sont les produits de fission, sont d'abord stockés en piscine à proximité immédiate du réacteur (durant 1 à 3 ans) avant d'être conditionnés en vue d'un transfert vers un lieu de stockage ou éventuellement vers une usine de retraitement. Pour des calculs globaux, on peut estimer qu'une tonne de combustible frais produit 0,26 TWh d'électricité et des déchets dont la répartition est décrite dans le tableau ci-dessous :

Isotope	Entrée [kg]	Sortie [kg]	Réutilisation
^{235}U à 3,4%	33	8	Uranium de retraitement
^{236}U		4	
^{238}U	967	943	
^{239}Pu		5	Peut fissionner
Autres Pu		4	Non incinérable
^{237}Np		0,5	Non incinérable
^{241}Am , ^{243}Am et ^{244}Cm		0,5	Incinérable ?
Produits de fission		25	Déchets
Total	1 000	1 000	

Retraitement et/ou stockage:

Contrairement à tous les autres pays y compris les USA qui préfèrent les stocker, la France, l'Angleterre et le Japon ont opté pour la voie du retraitement des déchets. Les opérations commencent par un traitement mécanique (cisaillement) puis par une séparation chimique de l'Uranium et du Plutonium. On peut alors fabriquer du MOX, un combustible mixte (mélange d'oxydes PuO_2 et UO_2) utilisé, par exemple en France, dans certains réacteurs qui recyclent ainsi une partie du Plutonium produit dans toutes les centrales.

Séparé de l'Uranium, le Plutonium purifié peut être destiné à l'élaboration de combustible destiné aux centrales à neutrons rapides... ou aux militaires.

L'Uranium récupéré entre dans la fabrication de nouveaux éléments de combustible. Les autres déchets sont simplement stockés en attendant une solution sérieuse... encore inconnue.

6.4 Armes nucléaires et risques de prolifération:

L'explosion d'une bombe A est la conséquence d'une réaction en chaîne qui diverge dans une masse de combustible fissible devenue supérieure à la *masse critique* (environ 15 kg pour l'Uranium-235 et 5 kg pour le Plutonium-239). Quelques kilogrammes de matériau fissible très pur (uranium enrichi à plus de 90 %) suffisent donc pour fabriquer une telle arme.

Une bombe H, par contre, est une bombe à fusion qui nécessite une technologie plus raffinée... et une bombe A comme amorce.

La production de plutonium est banale et a lieu dans tout réacteur. En effet, l'isotope $^{238}_{92}\text{U}$ contenu majoritairement dans le combustible absorbe, sans fissionner, une petite partie des neutrons thermiques ce qui a pour effet de produire du $^{239}_{93}\text{Np}$ qui se désintègre, avec une demi-vie de 2,5 jours, pour donner du $^{239}_{94}\text{Pu}$. Ce plutonium, extrait du combustible usagé, peut constituer le matériau de base de bombes A. Comme quoi un innocent réacteur nucléaire civil produit du Plutonium et peut ainsi favoriser la prolifération des armes nucléaires, à condition de maîtriser la technologie adéquate du retraitement.

Le monde occidental vend des centrales nucléaires et leurs technologies à de nombreux pays du Tiers-Monde; parfois certains d'entre eux ne cachent pas leurs intentions de s'équiper en armes nucléaires. Bien qu'il y ait un grand pas de la centrale productrice de plutonium à la bombe, certains états l'ont déjà franchi et d'autres le franchiront encore, augmentant ainsi le risque de dangereux conflits.

Selon l'AIEA (l'Agence Internationale pour l'Energie Atomique de l'ONU), il y avait dans le monde, fin 2003, 284 réacteurs nucléaires de recherche répartis dans 55 pays ainsi que 472 réacteurs de puissance produisant de l'électricité dans 31 pays. Cette grande dispersion technologique donne une mesure du risque non négligeable de l'emploi d'armes nucléaires dans un conflit local, voire dans des buts terroristes.

Sites à consulter:

Centrales, descriptions: <http://holvoet.free.fr/Voyage/application/appliCentrale.htm>

Production d'électricité en Suisse:

Office Fédéral de l'énergie: www.admin.ch/bfe/

Office Fédéral des statistiques: www.admin.ch/bfs/

Centrales nucléaires: <http://www.atomenergie.ch/> <http://www.strom.ch/>

Production d'électricité dans le monde:

Agence internationale de l'énergie de l'OCDE: www.iea.org

Commissariat à l'énergie atomique: www.cea.fr

ONU: www.un.org/depts/unsd/

Armes nucléaires:

<http://villemin.gerard.free.fr/CultureG/BombeNuc.htm>

<http://www.globenet.org/acro/fiche46.html>

<http://mendeleiev.cyberscol.qc.ca/carrefour/rescol99/bombe-5.html>

6.5 Exercices:

Rappels:

Puissance: $P = \frac{E}{t}$ [$W = J/s$] Rendement d'une centrale: $\eta = \frac{E_{\text{électr.}}}{E_{\text{therm.}}}$ [-]

- 6.1 Des radio-isotopes sont parfois utilisés pour produire de l'électricité, par exemple dans des sondes interplanétaires ou des stimulateurs cardiaques. Considérons le radionucléide Po-210 qui a une demi-vie d'environ 140 j et qui émet des particules α de 5,30 MeV. Si toute l'énergie cinétique de ces particules est absorbée par un générateur thermique à radio-isotopes (RTG), quelle est la puissance thermique moyenne (en W) produite par un gramme de radio-isotope pendant les 140 premiers jours de fonctionnement ?
- 6.2 Zur Zeit beträgt der Bestand an Nuklearwaffen weltweit etwa $2 \cdot 10^{10}$ t TNT Äquivalent, was einer Energie von $8,6 \cdot 10^{19}$ J entspricht; das ist der Weltenergiebedarf für $\approx 4,5$ Monate. Der globale Bestand an Nuklearwaffen kann die gleiche Energie wie 1 800 Beben der Stärke 8 auf der Richterskala freisetzen.
Berechnen Sie, welche Sprengkraft die auf der Erde lagernden Nuklearwaffen für jeden Menschen bereit halten.
- 6.3 Supposons que dans un réacteur il y ait production de 2 neutrons par fission et que chaque neutron produise une fission.
a) Combien de fissions se produirait alors à la dixième génération ?
b) Quelle serait approximativement l'énergie totale libérée (en J) ?
- 6.4 On définit *le facteur de multiplication neutronique* k comme le nombre moyen de neutrons qui, après chaque fission, produisent une fission ultérieure, tandis que *le taux de réaction* N est le nombre de réactions par seconde.
Supposons que dans une réaction de fission auto-entretenu, le facteur de multiplication neutronique soit de 1,0004. Si le temps moyen entre les fissions successives est de 1 ms, par quel facteur le taux de réaction augmentera-t-il en 1 s ?
- 6.5 Lors d'un accident, une centrale nucléaire émet dans son environnement une activité estimée à 33 000 Ci de Tritium. Sachant que la demi-vie du Tritium est de 12,33 ans, déterminer combien de grammes de Tritium sont relâchés.
Pour comparaison, l'accident de Tchernobyl a provoqué le relâchement de plusieurs MCi de différents isotopes.
- 6.6. Ecrire les réactions nucléaires qui expliquent comment, dans un réacteur, du neptunium et du plutonium sont produits à partir de l'Uranium-238.
- 6.7 A l'aide des données fournies dans ce chapitre, évaluer:
a) les besoins annuels en combustible de chacune des centrales nucléaires suisses.
b) la production annuelle de déchets (en détaillant les divers déchets).
- 6.8 Gösgen est une centrale nucléaire PWR de 970 MW de puissance électrique qui a produit en 2003 une quantité d'électricité de 7 899 GWh. On fait l'hypothèse que le rendement de la centrale est de 30%.
a) Exprimer l'énergie électrique en J puis déduire le pourcentage de temps durant lequel la centrale a dû fonctionner à pleine puissance pour produire cette énergie (productibilité).
b) Calculer la chaleur évacuée durant cette année.
c) Sachant qu'il faut $4'185$ J pour élever de 1°C la température de 1 kg d'eau, calculer la masse d'eau que l'on pourrait chauffer de 20°C à 100°C avec cette chaleur.