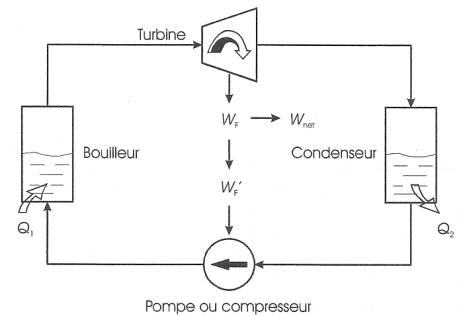


Les turbines à vapeur

Les centrales thermiques (nucléaires, à gaz ou à charbon) utilisent les changements d'état de la vapeur d'eau pour produire de l'électricité à partir d'une source de chaleur.



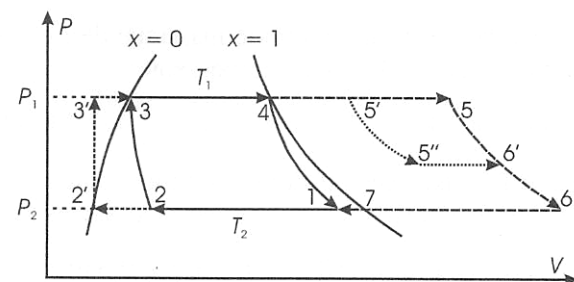
A – cycle de Carnot

Une machine motrice, utilisant l'eau comme fluide, opère selon un cycle de Carnot entièrement inscrit à l'intérieur de la courbe de saturation. On admet que la turbine et le compresseur ont un fonctionnement isentropique. En régime stationnaire, le débit massique de fluide dans la machine vaut $\dot{m} = 10 \text{ kg.s}^{-1}$. La pression P_1 dans le bouilleur vaut 20 bar tandis que la pression P_2 au niveau du condenseur est égale à 0,1 bar. On suppose que le régime stationnaire est établi, et que les variations d'énergie cinétique et potentielle sont négligeables.

Données thermodynamiques pour l'eau sur la courbe de saturation :

P(bar)	$\Theta(^{\circ}\text{C})$	$h_L^{\text{Sat}}(\text{kJ.kg}^{-1})$	$h_G^{\text{Sat}}(\text{kJ.kg}^{-1})$	$s_L^{\text{Sat}}(\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1})$	$s_G^{\text{Sat}}(\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1})$
0,1	45,81	191,83	2584,7	0,6493	8,1502
20	212,42	908,79	2799,5	2,4474	6,3409

1. A partir des valeurs de l'entropie aux points 3 et 4 du diagramme, déterminer les fractions massiques de vapeur d'eau aux points 1 et 2.
2. En déduire les valeurs des enthalpies massiques aux points 1 et 2.
3. Calculer les flux (système ouvert !) de chaleur et de travail $\dot{Q}_1$ (bouilleur), $\dot{Q}_2$ (condenseur), $\dot{W}_F$ (turbine), $\dot{W}'_F$ (compresseur).



4. En déduire l'efficacité η de cette machine. Comment peut-on confirmer ce résultat ?

B – Cycle de Rankine

Dans le cycle de Carnot à fluide liquéfiable, le travail fourni au compresseur représente environ 20% du travail récupéré sur la turbine. De plus le compresseur et la turbine travaillent avec un mélange diphasique liquide/vapeur, ce qui nuit à leur bon fonctionnement et est à l'origine de problème d'érosion de leurs parties mécaniques. Des améliorations ont donc été apportées visant à mieux utiliser l'énergie et la haute température du brûleur et réduire l'énergie utilisée pour la circulation du fluide.

L'amélioration proposée par Rankine consiste à redimensionner le condenseur de façon à obtenir une liquéfaction totale de la vapeur (étape 1-2'). Dans ces conditions le travail de compression ne porte que sur un liquide. Dès lors le compresseur peut être remplacé par une pompe moins consommatrice d'énergie car la variation de volume du fluide est bien plus faible. La contre partie

de cette amélioration est un surcroît d'énergie à fournir au niveau du brûleur pour amener l'eau à son point d'ébullition.

La machine motrice à vapeur d'eau de l'exercice précédent opère maintenant selon un cycle de Rankine (aux mêmes températures). Le fonctionnement de la pompe est encore supposé isentropique.

1. Rappeler l'expression de dh en fonction de ds et dP . L'eau liquide étant considérée comme incompressible, montrer que $h_3' = h_2' + v_2'(P_1 - P_2)$. Application numérique avec $v_2' = 1,010 \text{ L.kg}^{-1}$.
2. Calculer les nouveaux flux de chaleur et de travail $\dot{Q}_1$ (bouilleur), $\dot{Q}_2$ (condenseur), $\dot{W}_F$ (turbine), $\dot{W}'_F$ (compresseur).
3. Quelle est l'efficacité et le rendement de ce cycle ?

C – cycle de Hirn

La seconde amélioration, proposée par Hirn consiste à surchauffer la vapeur (étape 4-5) avant de l'envoyer sur la turbine, de telle sorte qu'en fin de détente dans la turbine (étape 5-6 encore isentropique) on ait de la vapeur sèche, c'est-à-dire sans eau liquide. Cette opération entraîne un surdimensionnement du condenseur. On ne peut toutefois pas monter trop haut en température en fin de surchauffe car les turbines n'y résisteraient pas.

On considère maintenant que la machine motrice de l'exercice précédent fonctionne selon le cycle de Hirn 6-2'-3'-5-6. Dans ce cas l'étape 4-5 correspond à une surchauffe de la vapeur d'eau jusqu'à une température de 900°C sous 20 bar.

Données complémentaires :

P(bar)	T(°C)	$h_G(\text{kJ.kg}^{-1})$	$s_G(\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1})$
0,10	100	2592,6	8,1749
0,10	150	2687,5	8,4479
20	900	4389,4	8,3895

1. Que vaut l'entropie massique au point 6 ? La valeur de h_G correspondante ne figure pas dans la table. Donnez-en une valeur approximative par interpolation linéaire (c'est-à-dire en supposant que la relation entre h_G et s_G est à peu près linéaire entre 100 et 150°C).
2. Calculer les nouveaux flux de chaleur et de travail $\dot{Q}_1$ (bouilleur), $\dot{Q}_2$ (condenseur), $\dot{W}_F$ (turbine), $\dot{W}'_F$ (compresseur).
3. Quelle est l'efficacité et le rendement de ce cycle ?

Remarque : en pratique, pour éviter de monter trop haut en température, on réalise une détente partielle dans la turbine (5'-5'') suivie d'une resurchauffe (5''-6').

