

Une centrale nucléaire est un site industriel destiné à la production d'électricité, qui utilise comme chaudière un réacteur nucléaire pour produire de la chaleur. Une centrale nucléaire REP (Réacteur à Eau Pressurisée) est constituée de deux grandes zones :

- une zone non nucléaire (salle des machines). Dans cette partie, semblable à celle utilisée dans les centrales thermiques classiques, s'écoule de l'eau dans un circuit secondaire. Cette eau est évaporée dans le Générateur de Vapeur (GV) par absorption de la chaleur produite dans la zone nucléaire, puis elle entraîne une turbine (T) couplée à un alternateur produisant de l'électricité, ensuite elle est condensée au contact d'un refroidisseur (rivière ou mer ou atmosphère via une tour aéroréfrigérante) et enfin, elle est comprimée avant d'être renvoyée vers le générateur de vapeur ;
- une zone nucléaire (dans le bâtiment réacteur), où ont lieu les réactions nucléaires de fission, qui produisent de l'énergie thermique et chauffent ainsi l'eau sous pression circulant dans le circuit et le circuit secondaire se fait dans le générateur de vapeur, où la surface d'échange entre les deux fluides peut atteindre près de 5000 m² (réseau de tubulures).

Considérons une centrale nucléaire REP produisant une puissance électrique $P_e = 900$ MW. Le fluide circulant dans le circuit secondaire est de l'eau, dont l'écoulement est supposé stationnaire. Le cycle thermodynamique décrit par l'eau est un cycle ditherme moteur. L'eau liquide sera supposée incompressible et de capacité thermique massique isobare supposée constante. Le tableau en fin d'énoncé donne diverses données thermodynamiques relatives à l'équilibre liquide-vapeur de l'eau.

1 - Cycle de Carnot

Dans une première approche simplifiée, on considère le moteur ditherme de Carnot fonctionnant de manière réversible entre deux sources de température T_{ch} et T_{fr} ($T_{fr} < T_{ch}$).

□ **Q 1** - Donner, en la redémontrant, l'expression du rendement de Carnot associé à ce cycle.

□ **Q 2** - Donner la valeur numérique de ce rendement en prenant $T_{ch} = 543$ K et $T_{fr} = 303$ K, les deux températures extrêmes de l'eau dans le circuit secondaire.

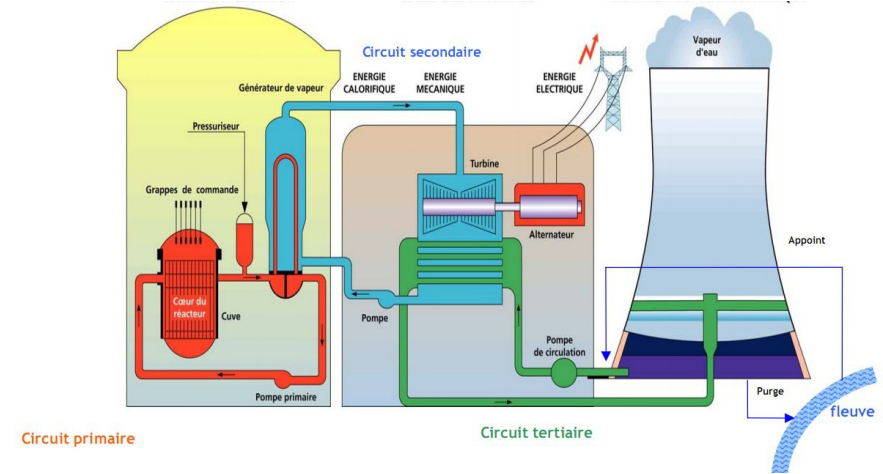


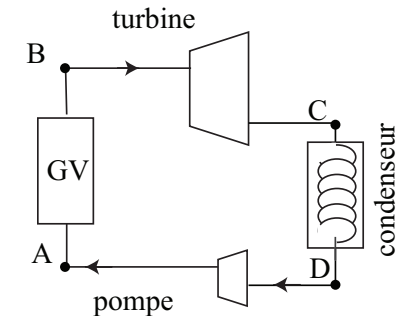
FIGURE 1 – Schéma global d'une centrale nucléaire

□ **Q 3** - Sachant qu'un réacteur REP fournit à l'eau du circuit secondaire, via le générateur de vapeur, une puissance thermique $P_t = 2785$ MW, que vaut le rendement thermodynamique réel de l'installation ? On supposera que la puissance mécanique transmise à la turbine est intégralement convertie en puissance électrique. Commenter.

2 - Cycle de Rankine

L'eau du circuit secondaire subit les transformations suivantes représentées ci-contre.

- de A à B : dans le générateur de vapeur, échauffement isobare du liquide à la pression $P_2 = 55$ bar jusqu'à un état de liquide saturant (état noté A'), puis vaporisation totale isobare jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (état B) ;
- de B à C : détente adiabatique réversible dans la turbine, de la pression P_2 à la pression $P_1 = 0.43$ bar ;
- en C, le fluide est diphasé ;
- de C à D : liquéfaction totale isobare dans le condenseur, jusqu'à un état de liquide saturant ;
- de D à A : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression P_1 à la pression P_2 , du liquide saturant sortant du condenseur. On négligera le travail consommé par cette pompe devant les autres énergies mises en jeu.



□ **Q 4** - Représenter dans le diagramme de Clapeyron (P,v) l'allure de la courbe de saturation de l'eau, ainsi que les isothermes T_B , T_D et T_{critique} , cette dernière température étant celle du point critique de l'eau. Préciser les domaines du liquide, de la vapeur, de la vapeur saturante. Représenter sur ce même diagramme l'allure du cycle décrit par l'eau du circuit secondaire. Indiquer le sens de parcours du cycle et placer les points A, A', B, C et D.

□ **Q 5** - D'après l'extrait de table thermodynamique donné en fin d'énoncé, quelles sont les valeurs des températures, des enthalpies massiques et des entropies massiques aux points A', B et D ? On pourra donner les valeurs sous forme de tableau.

□ **Q 6** - Dans quel état se trouve l'eau à la fin de la détente de la turbine ? Donner le titre massique en vapeur au point C en utilisant les propriétés de la détente dans la turbine. En quoi est-ce un inconvénient pour les parties mobiles de la turbine ?

□ **Q 7** - Dans toute la suite, on négligera les variations d'énergie cinétique et potentielle dans les bilans énergétiques. Exprimer alors, sans démonstration, le premier principe de la thermodynamique pour un fluide en écoulement stationnaire recevant de manière algébrique le travail massique utile w_u et le transfert thermique massique q .

□ **Q 8** - Dans le document réponse figure le diagramme enthalpique (P,h) de l'eau. Placer, avec soin et à l'échelle, les points A', B, C, D du cycle. On explicitera la méthode.

□ **Q 9** - Exprimer le travail massique w_{BC} reçu par l'eau dans la turbine. Donner sa valeur numérique, en s'aidant du diagramme enthalpique.

□ **Q 10** - Exprimer le transfert thermique massique $q_{AA'}$ reçu par l'eau liquide quand elle passe de manière isobare de la température T_A à la température $T_{A'}$ dans le générateur de vapeur. Donner sa valeur numérique : on considérera $T_A \approx T_D$.

□ **Q 11** - Exprimer le transfert thermique massique $q_{A'B}$ reçu par l'eau quand elle se vaporise complètement dans le générateur de vapeur. Donner sa valeur numérique.

□ **Q 12** - Calculer alors le rendement de Rankine de l'installation. Comparer au rendement de Carnot et commenter. Comparer au rendement réel et commenter.

3 - Cycle de Rankine avec détente étagée

Le cycle réel est plus compliqué que celui étudié précédemment. En effet, d'une part, la détente est étagée : elle se fait d'abord dans une turbine *haute pression* puis dans une turbine *basse pression*. D'autre part, entre les deux turbines, l'eau passe dans un *surchauffeur*.

Les transformations sont maintenant modélisées par

- de A à B : dans le générateur de vapeur, échauffement isobare du liquide à la pression $P_2 = 55$ bar, jusqu'à un état de liquide saturant (état noté A'), puis vaporisation totale isobare jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (point B) ;

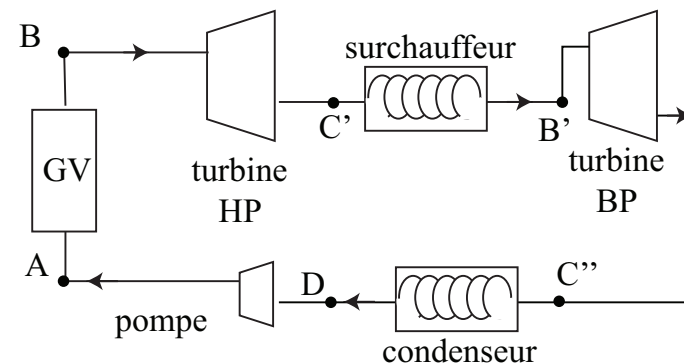


FIGURE 2 – Cycle de Rankine avec détente étagée

- de B à C' : détente adiabatique réversible dans la turbine *haute pression*, de la pression P_2 à la pression $P_3 = 10$ bar ;
- de C' à B' : échauffement isobare à la pression P_3 , dans le surchauffeur, jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (point B') ;
- de B' à C'' : détente adiabatique réversible dans la turbine *basse pression*, de la pression P_3 à la pression $P_1 = 430$ mbar ;
- de C'' à D : liquéfaction totale isobare dans le condenseur, jusqu'à un état de liquide saturant ;
- de D à A : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression P_1 à la pression P_2 , du liquide saturant sortant du condenseur. On négligera le travail consommé par cette pompe devant les autres énergies mises en jeu.

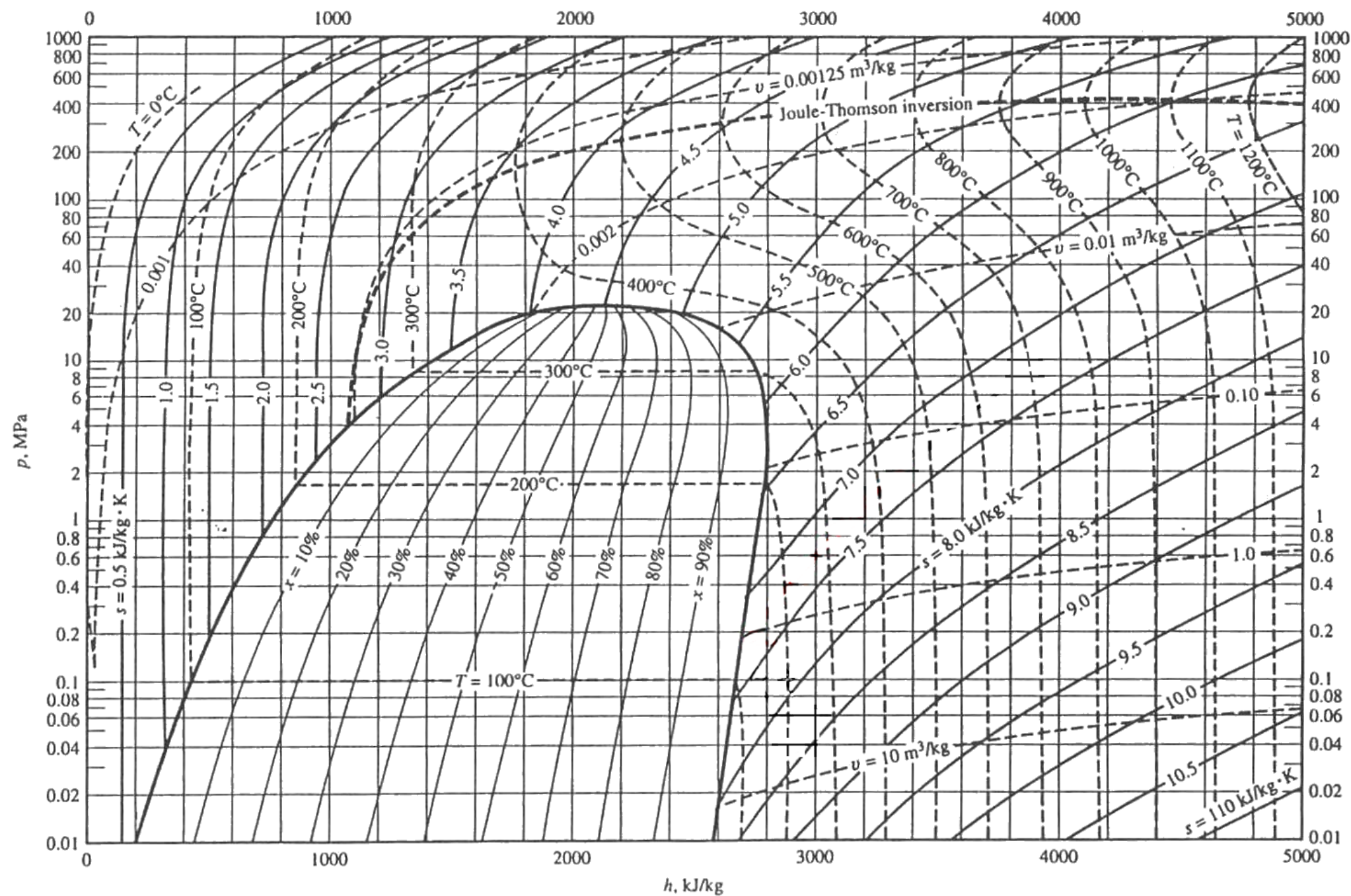
□ **Q 13** - Placer les nouveaux points C', B', C'' sur le diagramme enthalpique du document réponse.

□ **Q 14** - Comparer les titres massiques en vapeur des points C' et C'' au titre massique en vapeur du point C. Quel est l'intérêt de la surchauffe ?

□ **Q 15** - À l'aide du diagramme enthalpique, déterminer le nouveau rendement du cycle. Commenter.

Données : v en ($m^3.kg^{-1}$), h en ($kJ.kg^{-1}$), s en $kJ.K^{-1}.kg^{-1}$

$\theta(^{\circ}C)$	$P_{sat}(bar)$	Liquide saturant			vapeur saturante		
		v_l	h_l	s_l	v_v	h_v	s_v
30	0,43	$1,0 \cdot 10^{-3}$	125,22	0,4348	32,892	2555,92	8,4530
180	10	$1,1 \cdot 10^{-3}$	763,18	2,1395	0,119404	2777,84	6,5854
270	55	$1,3 \cdot 10^{-3}$	1190,10	2,9853	0,03505	2788,46	5,9226



4 - Cycle de Carnot

□ **Q 16** - Démo du cours :

$$\eta = \frac{T_{ch} - T_{fr}}{T_{ch}}$$

□ **Q 17** - On trouve :

$$\eta = 0,44$$

□ **Q 18** - Le rendement réel est défini par :

$$\eta_r = \frac{P_e}{P_t} = 0,32$$

Le rendement est inférieur à celui de Carnot car la machine n'est pas réversible.

5 - Cycle de Rankine

□ **Q 19** - On attend la figure suivante :

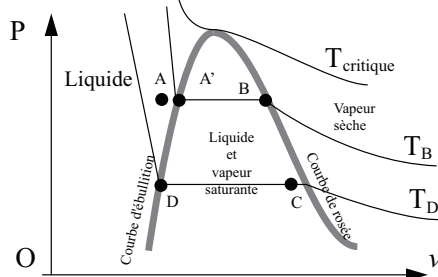


FIGURE 3 – Schéma global d'une centrale nucléaire

□ **Q 20** - On attend :

Points	θ	h	s
A'	270	1190,10	2,9853
B	270	2788,46	5,9226
D	30	125,22	0,4348

□ **Q 21** - D'après le théorème des moments, le titre massique en vapeur au point C est donné par

$$x_c = \frac{s_C - s_L(30^\circ\text{C})}{s_v(30^\circ\text{C}) - s_l(30^\circ\text{C})}$$

comme la détente de B   C est isentropique, on a :

$$x_c = \frac{s_v(270^\circ\text{C}) - s_L(30^\circ\text{C})}{s_v(30^\circ\text{C}) - s_l(30^\circ\text{C})}$$

A.N. :

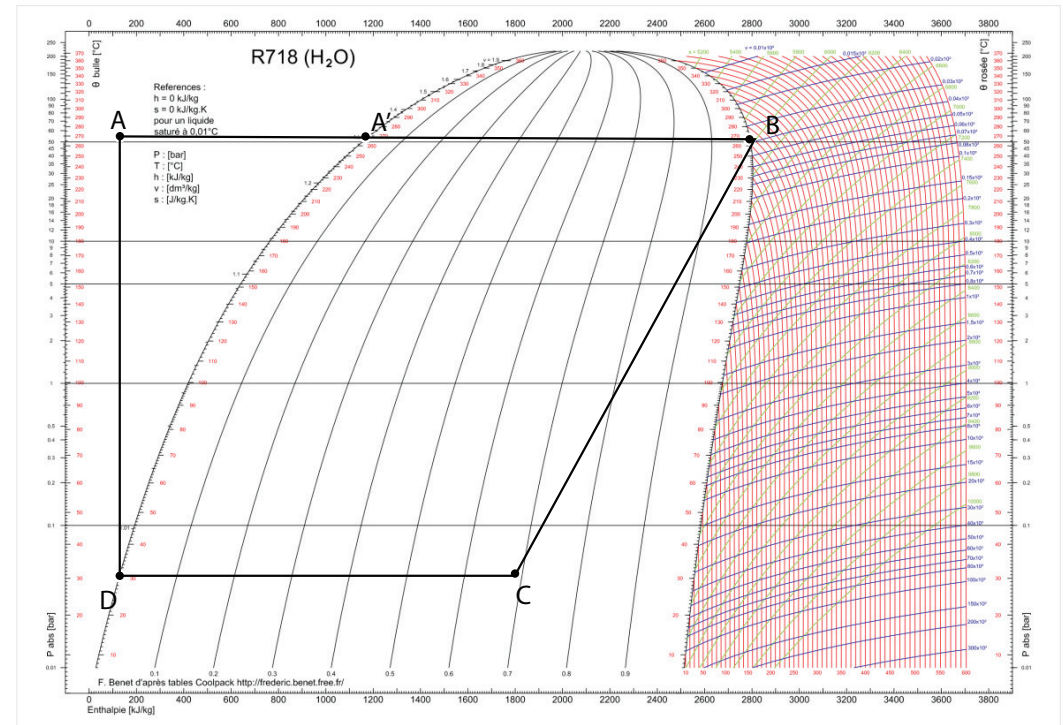
$$x_c = 0,68$$

Le fait d'avoir un état diphasé est problématique pour les parties mobiles.

□ **Q 22** - Pour un fluide en écoulement :

$$\Delta h = w_u + q$$

□ **Q 23** - On place d'abord les points correspondant aux  tats saturant. Pour le point C, on utilise la valeur trouvée précédemment. Pour le point A, le travail massique étant négligé, on prendra $h_A = h_D$. Pour placer les points de façon horizontale, on utilisera les isobares.



□ **Q 24** - Dans la turbine, le fonctionnement est adiabatique ($q = 0$) on en déduit que

$$\Delta h_{BC} = w_u$$

A.N. : $w_u = h_C - h_B = -1000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^1$

$$\Delta h_{AA'} = q_{AA'} = h_l(270^\circ\text{C}) - h_l(30^\circ\text{C})$$

A.N. :	$q_{AA'} = 1064,87 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
--------	---

$$\Delta h_{A'B} = q_{A'B} = h_v(270^\circ\text{C}) - h_l(270^\circ\text{C})$$

$$\text{A.N. : } q_{A'B} = 1598,36 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\eta = \frac{w_u}{q_{AA'} + q_{A'B}}$$

A.N. : $\eta = 0,37$

6 - Cycle de Rankine étagé

☐ **Q 30** - L'énergie récupérée est donnée par :

$$w = w_{\text{BC}'} + w_{\text{B}'\text{C}''}$$

$$w = (2600 - 2800) + (2100 - 2800) = -900 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$
$$q = q_{AB} + q_{C'B'}$$
$$w = 2700 + (2800 - 2600) = 2900 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$
$$\eta = \frac{-w}{q} = 0,31$$