

Conversion de l'énergie thermique

Cours niveau 2^{ème} année SETP

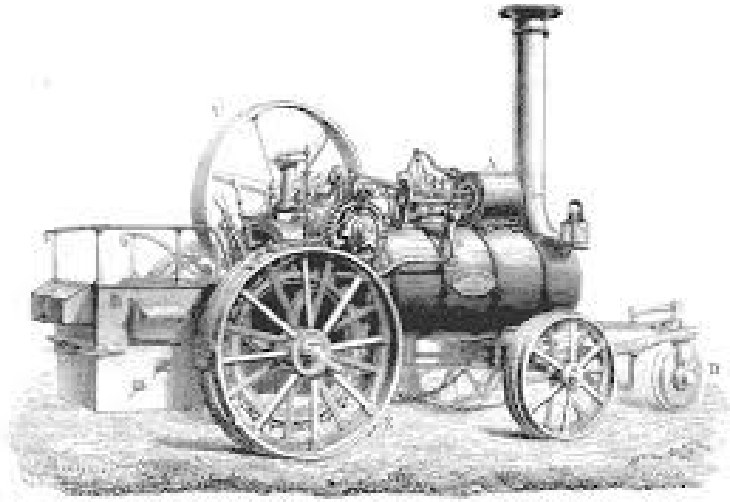
Chapitre I

Cycles à vapeur

2019/2020

Mme. Dorra LOUNISSI

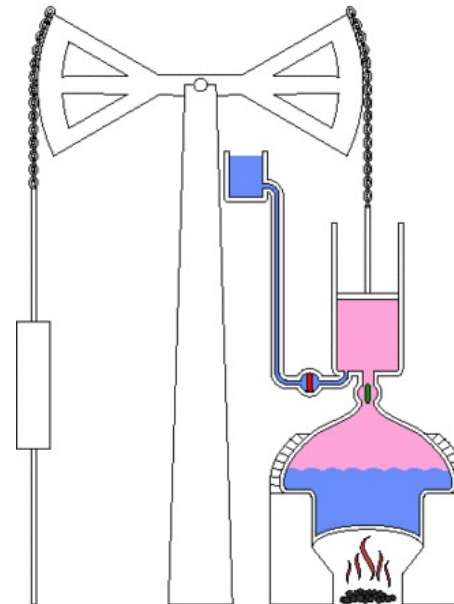
Historique



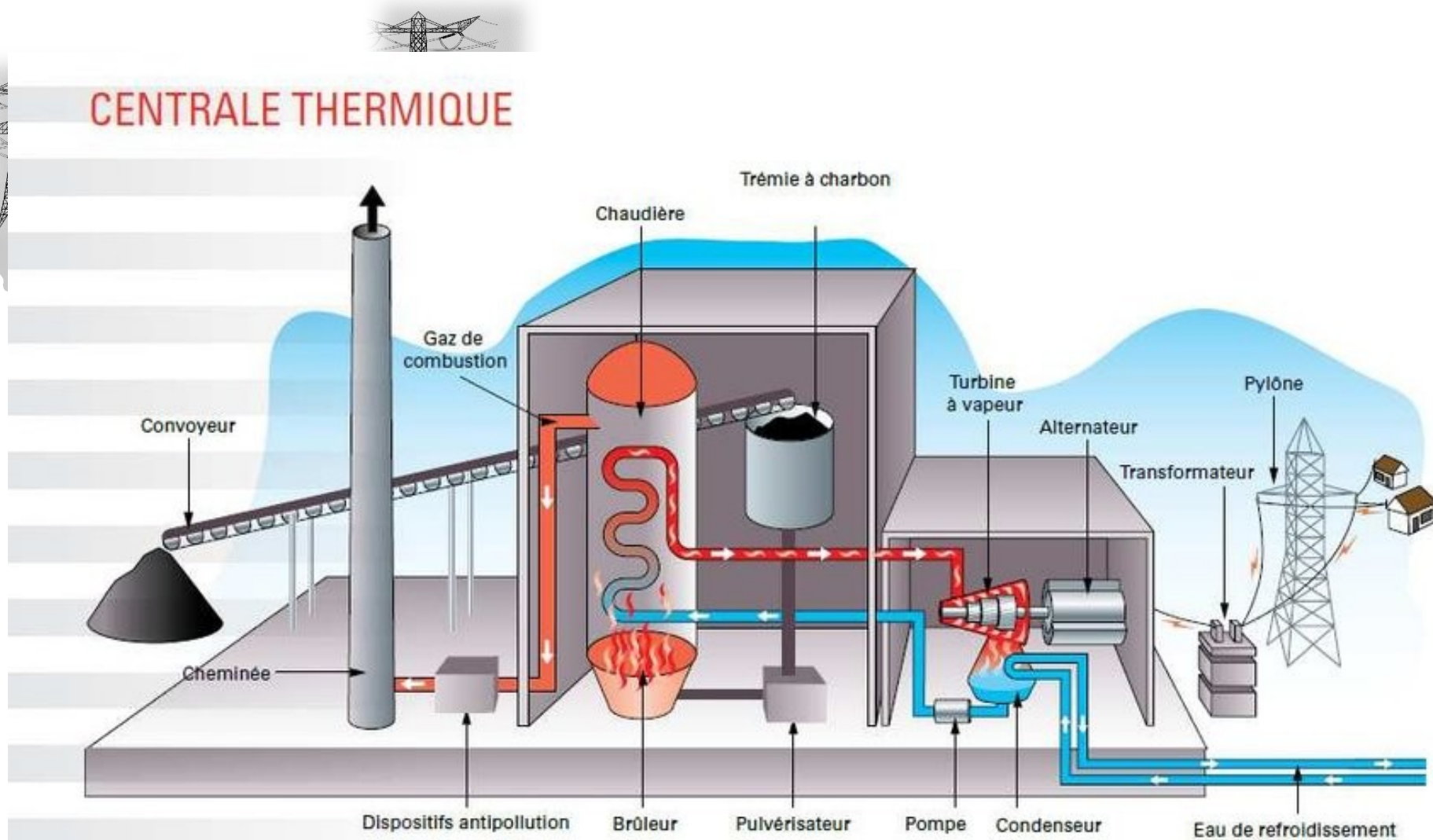
Première machine à vapeur conçue en **1763**, version améliorée d'un moteur Newcomen conçue dès **1712**



James Watt (1736-1819)



97% de la production électrique mondiale vient de la conversion thermique.



Généralités

Utilisation

- Production d'électricité
- Propulsion des navires et des sous-marins.

Avantages

- Rendement $> 45\%$ $>$ cycles à gaz
- Compression par des pompes de faibles puissances

inconvénients

- Flexibilité : mise en route > 12 heures
- Grosses installations
 - Problème de sécurité (Centrales nucléaires)

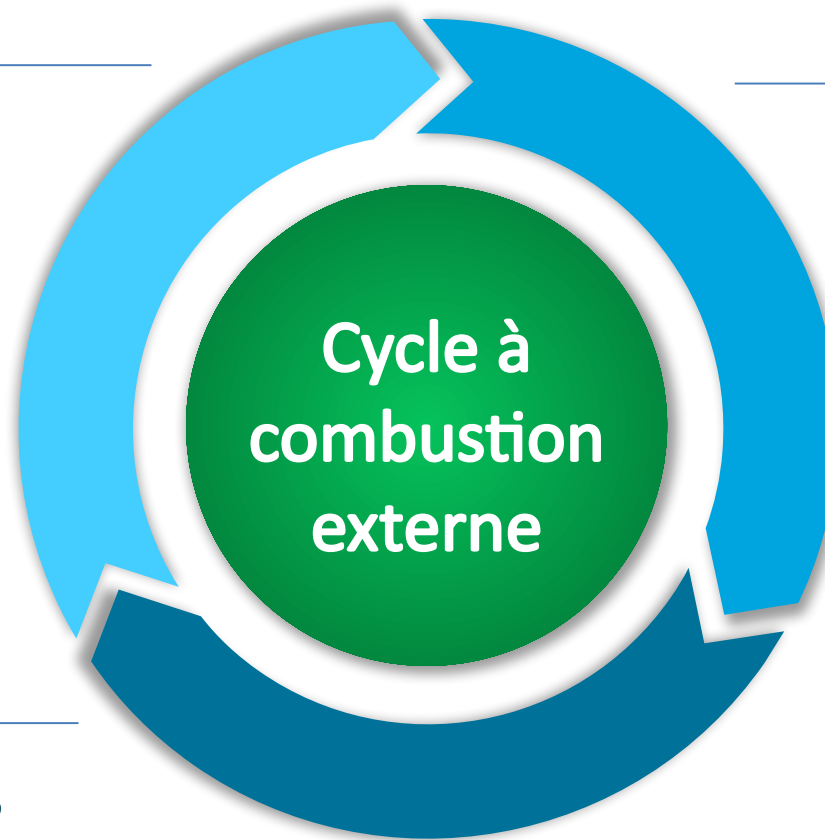
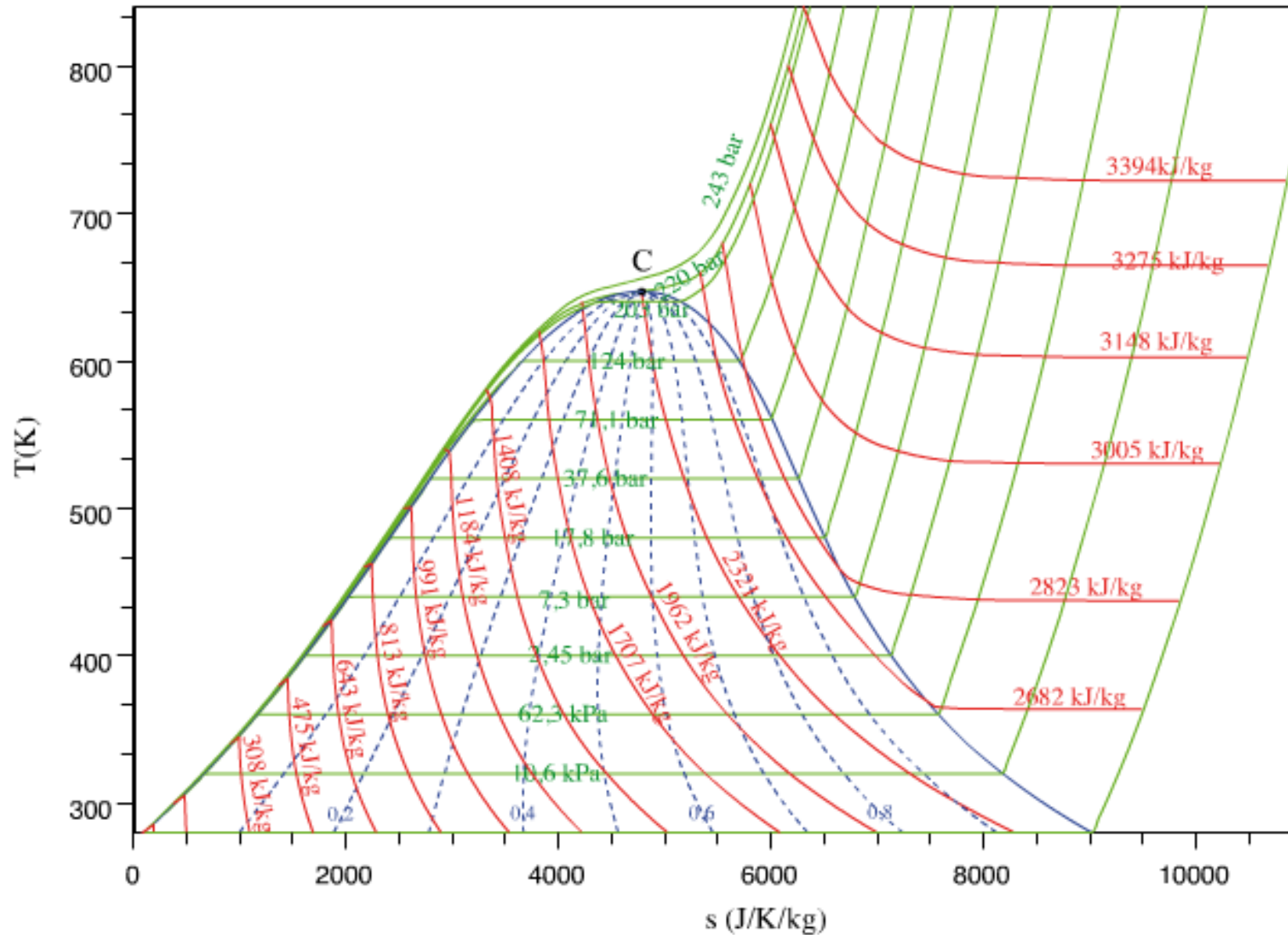
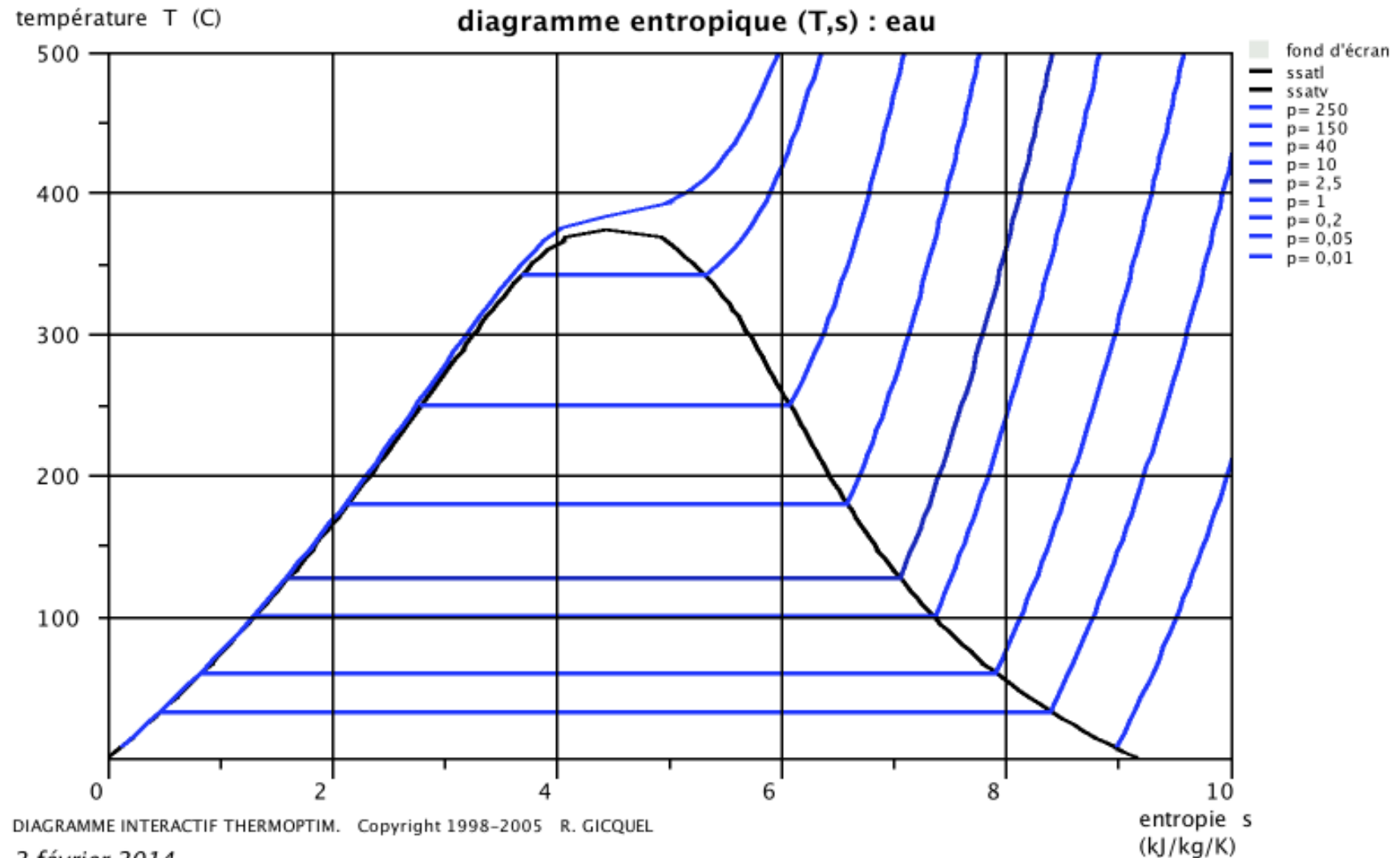


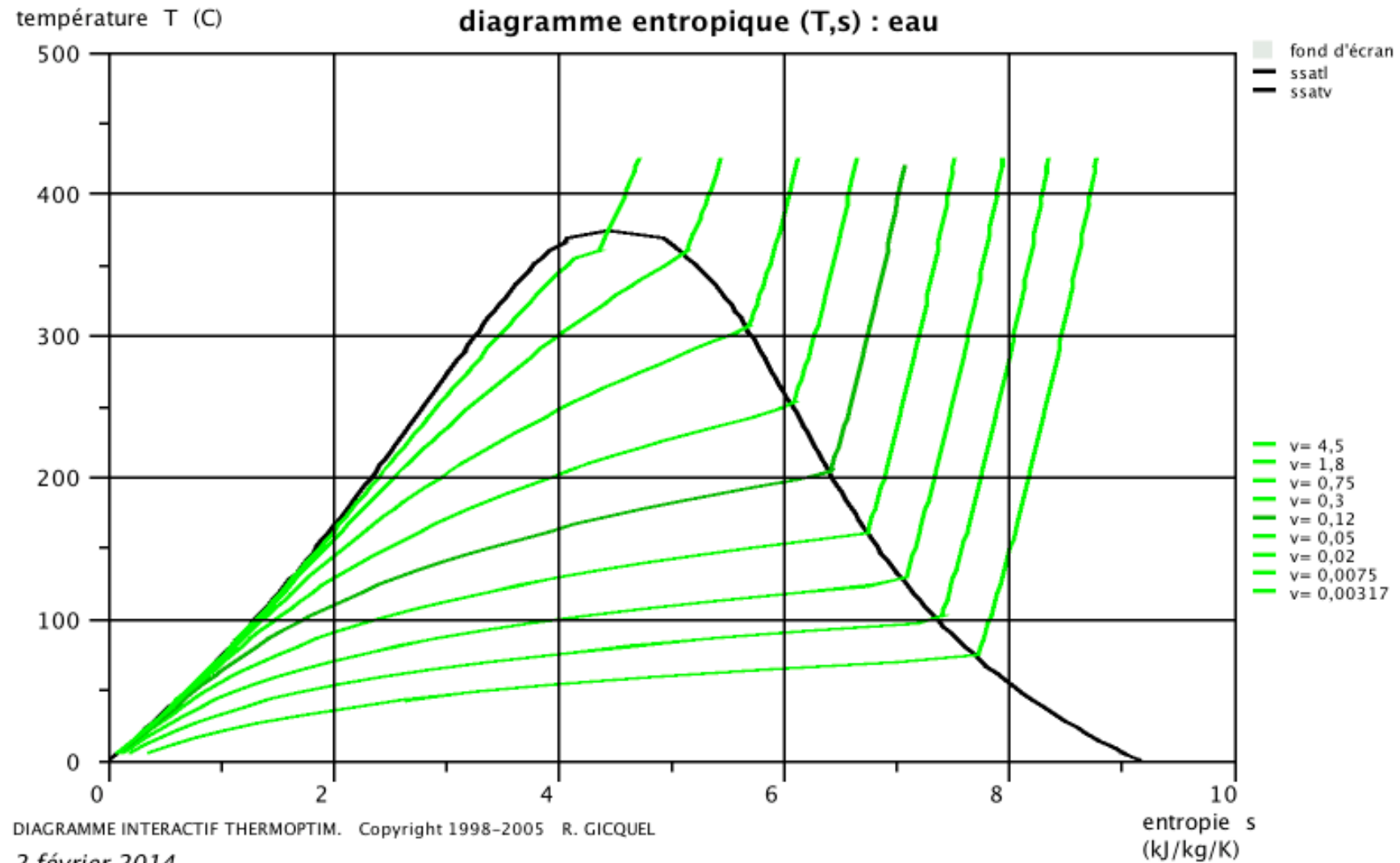
Diagramme T-S de l'eau



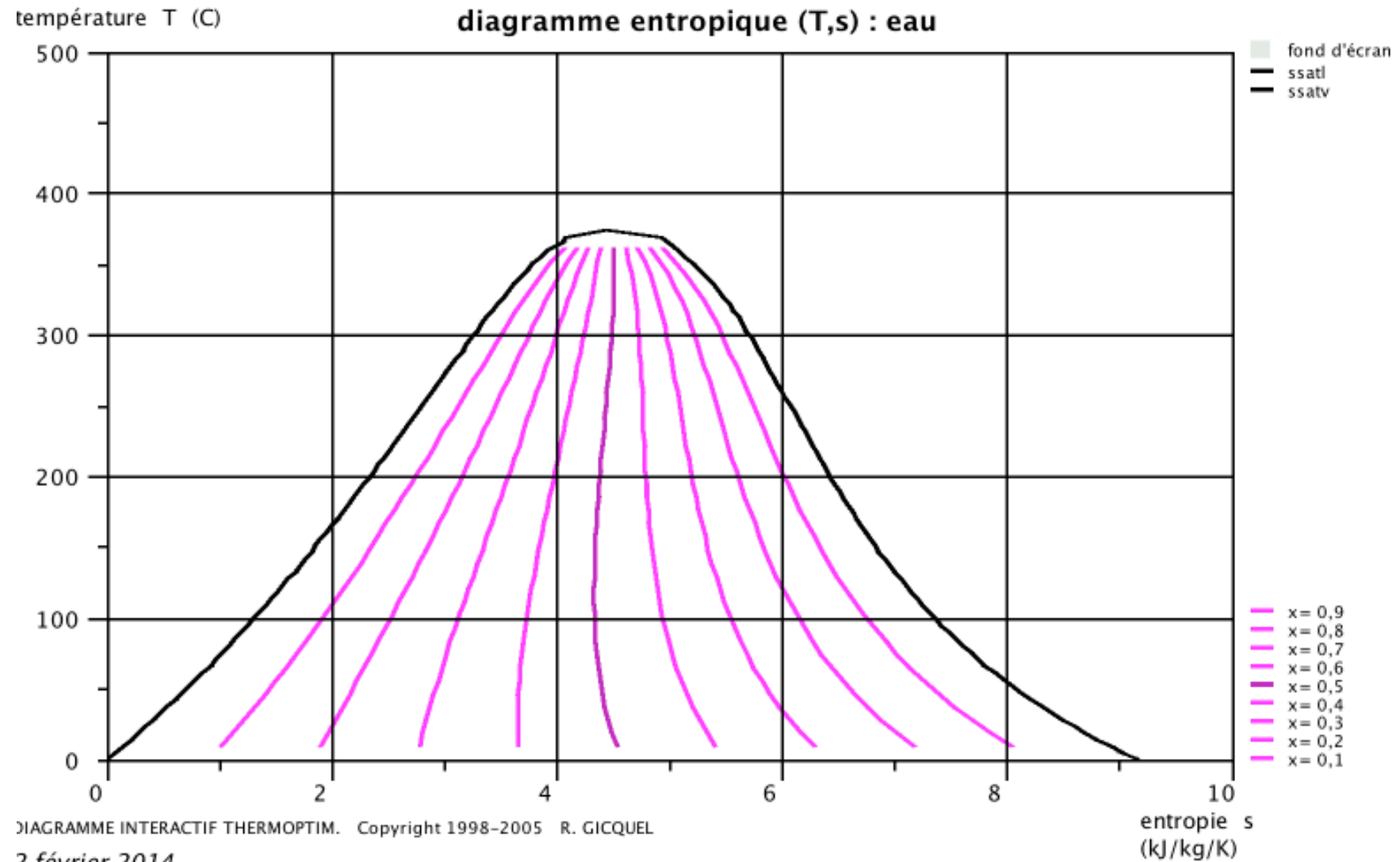
Les isobares



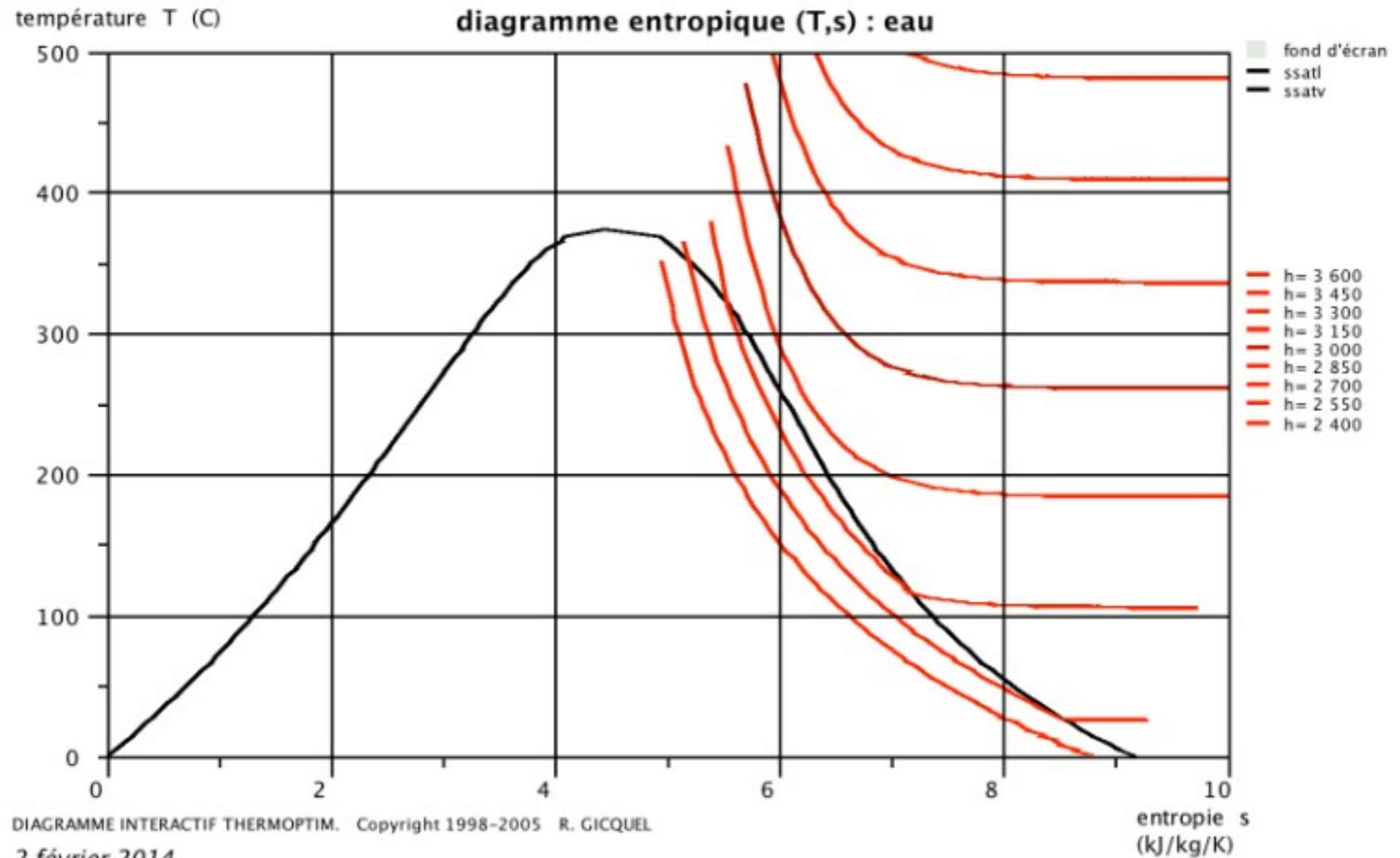
Les isochores



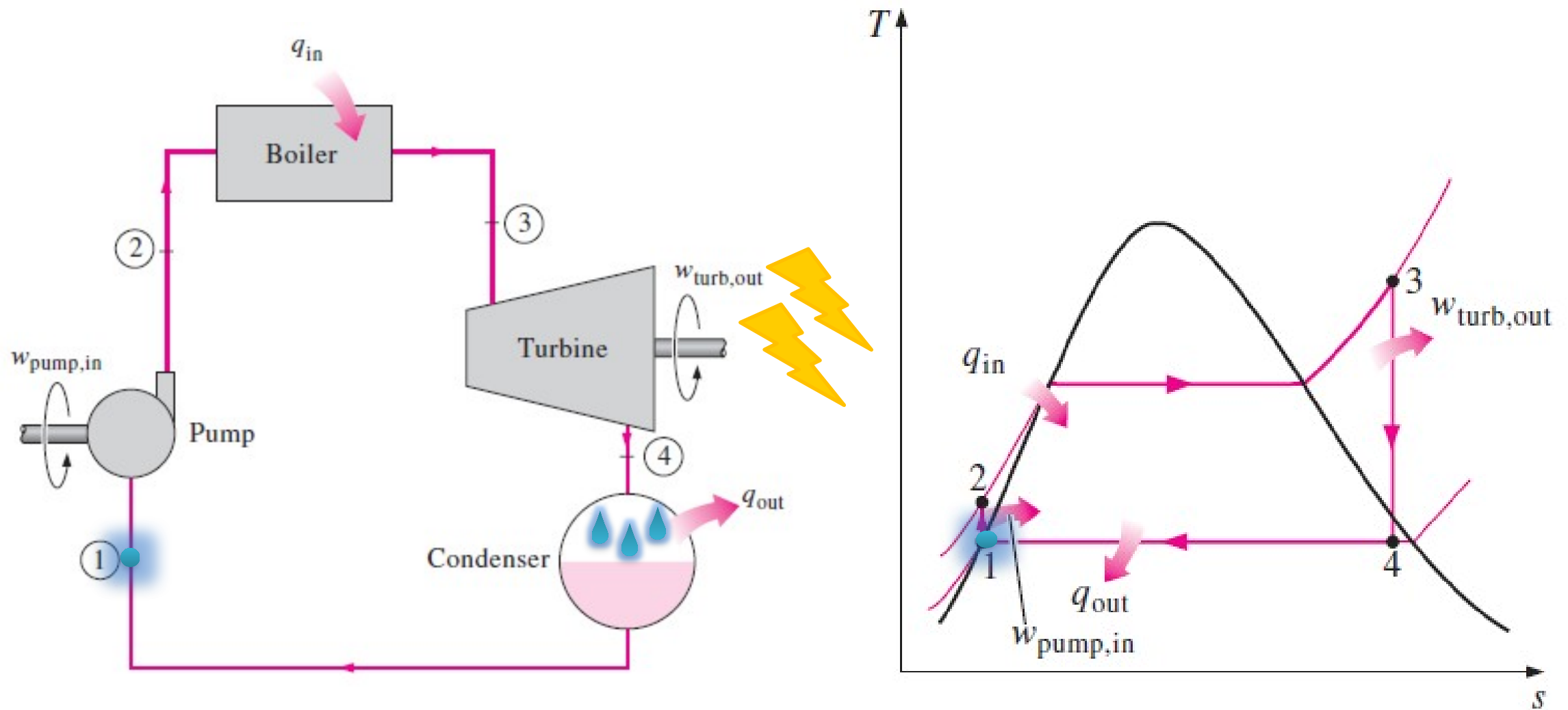
Les isotitres

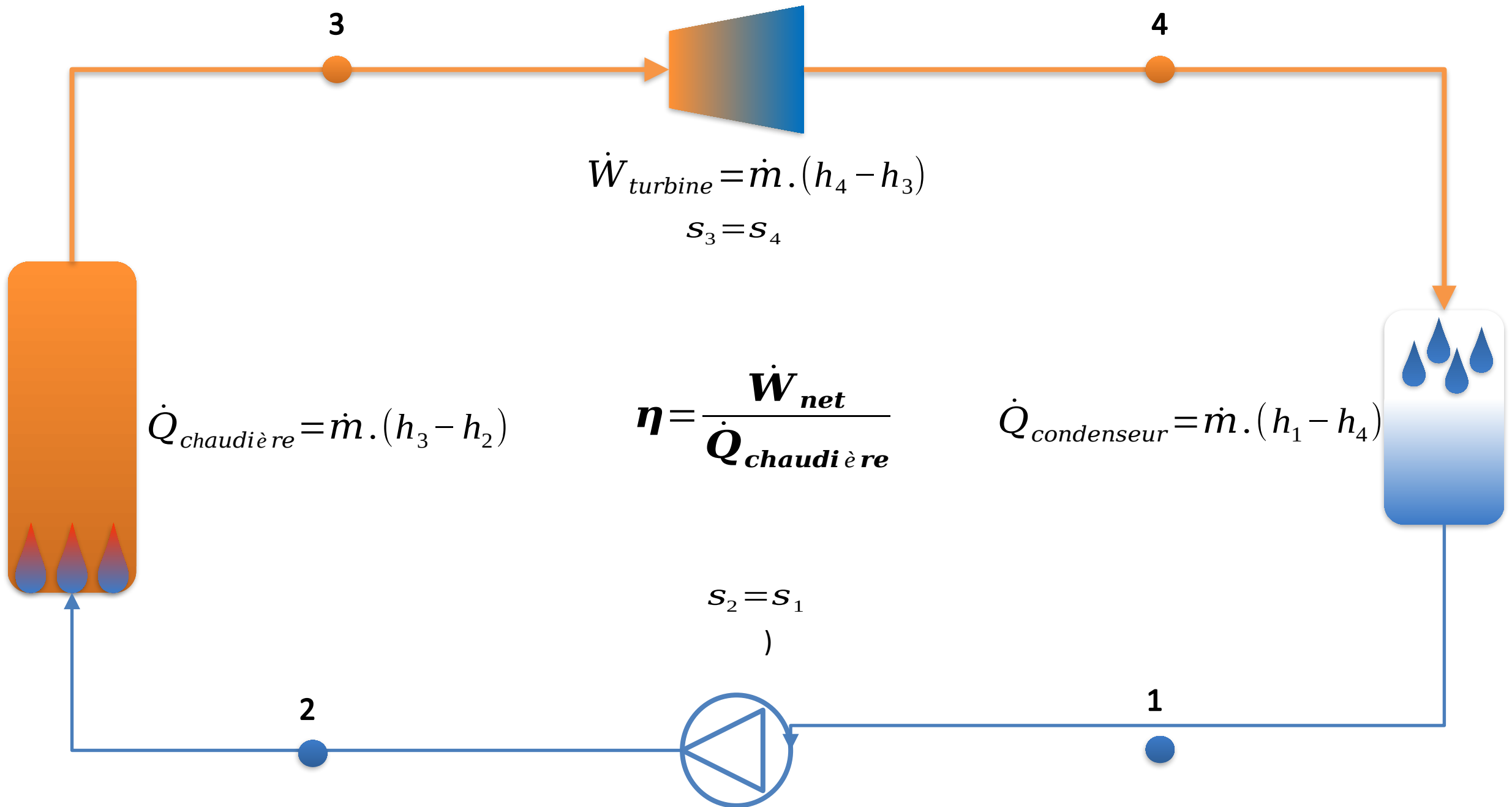


Les isenthalpes

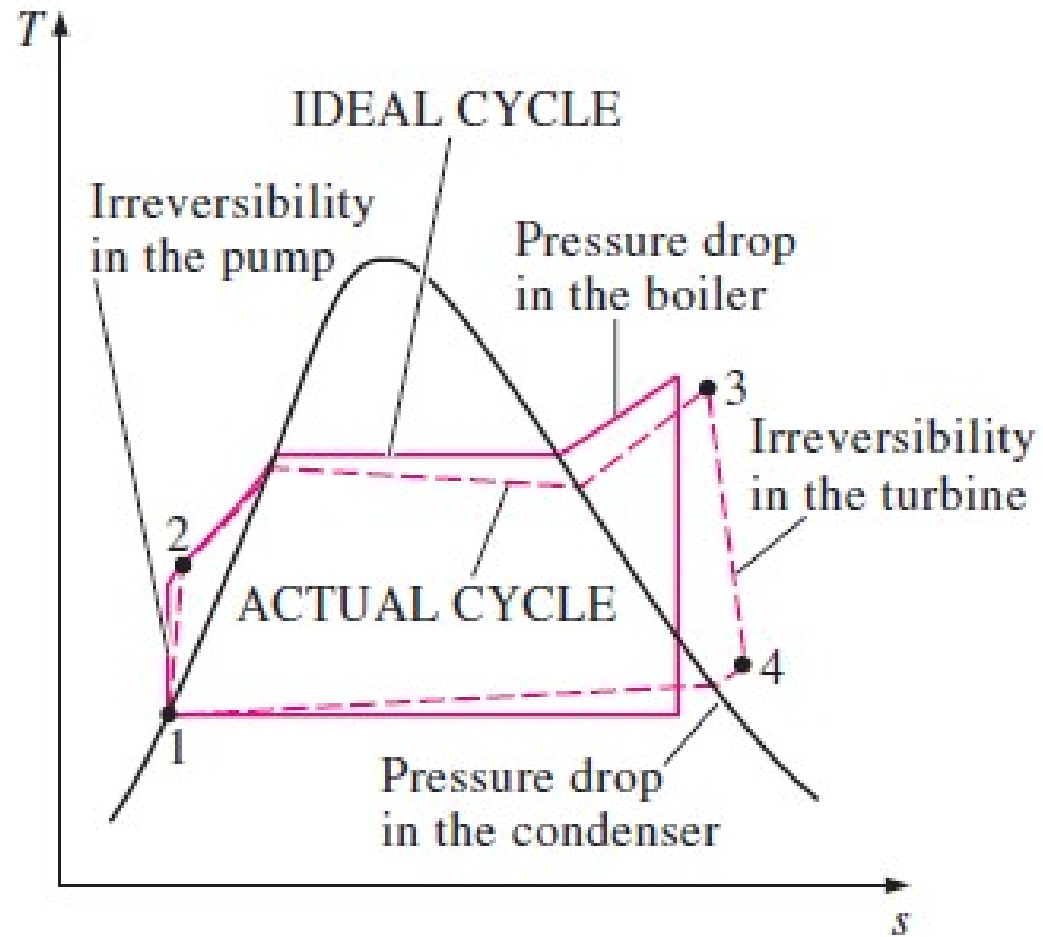


Cycle de Rankine (idéal)

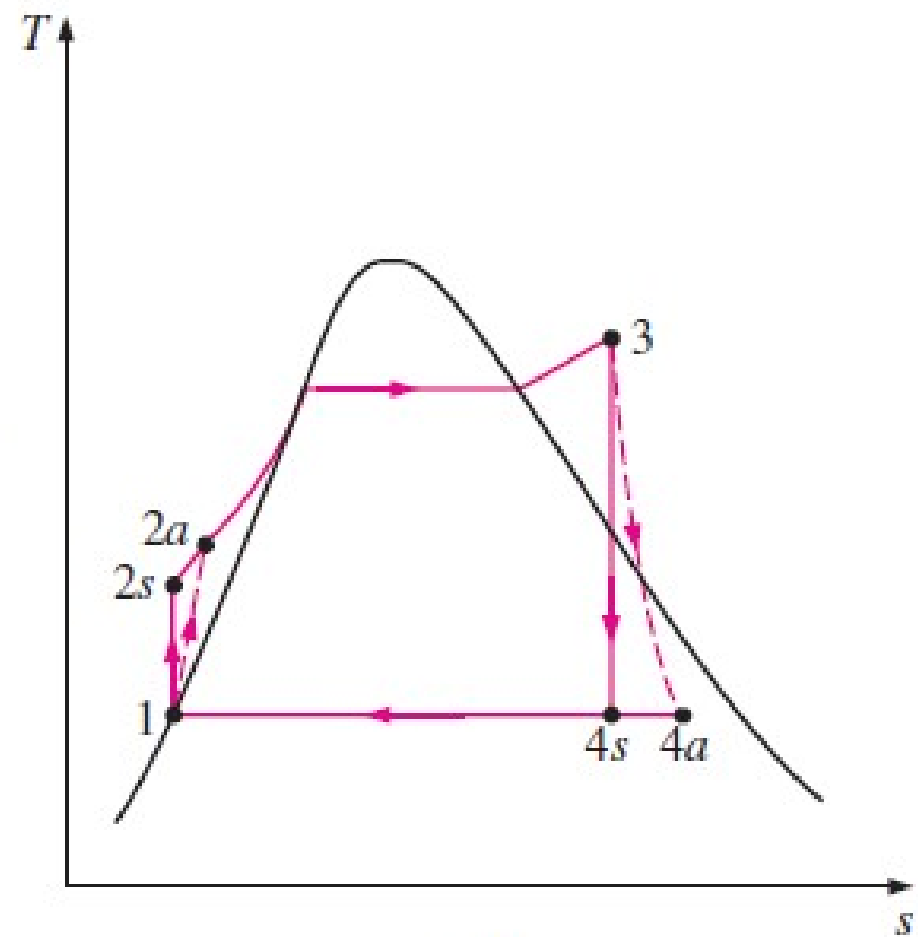




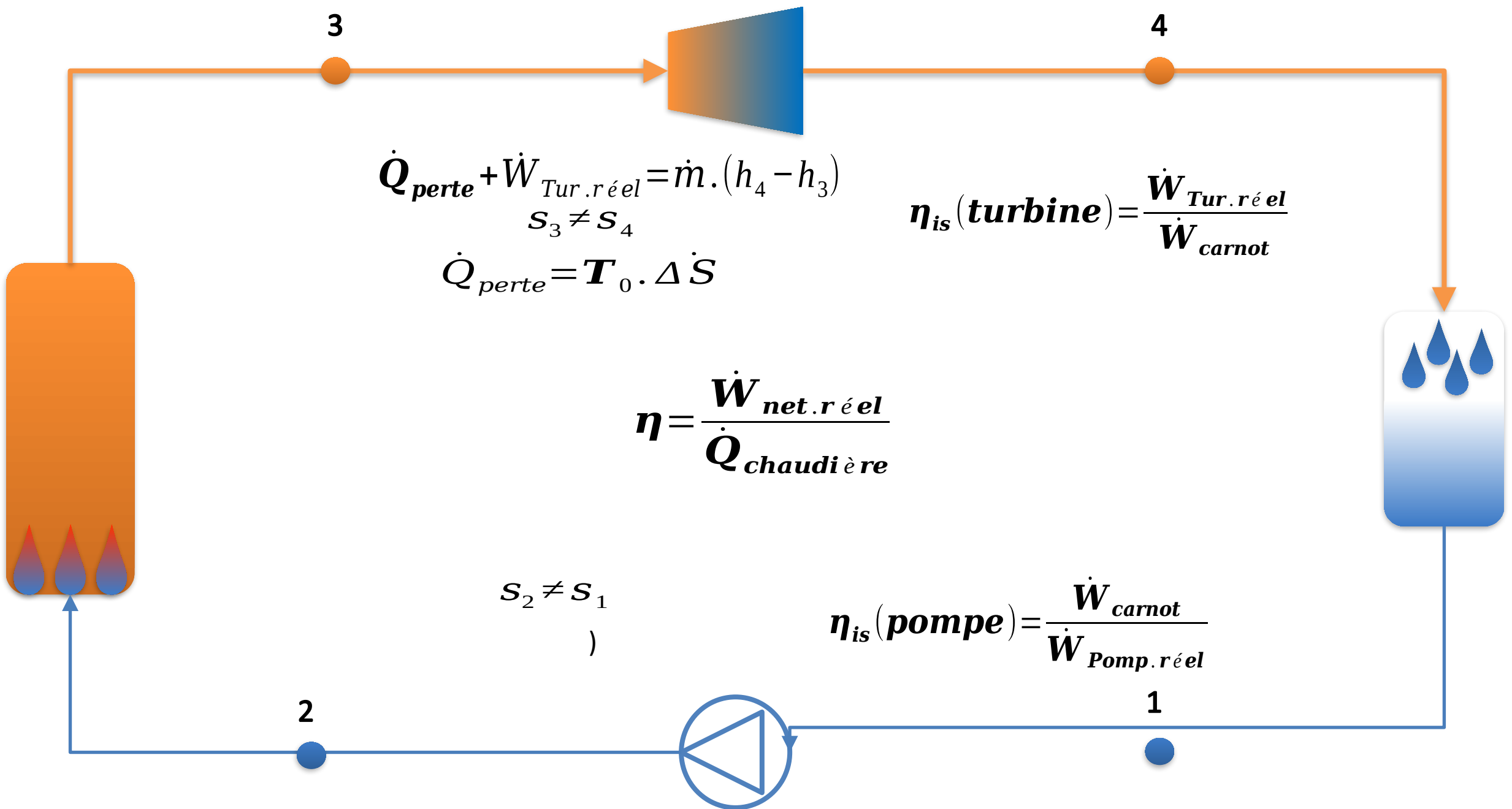
Cycle réel



(a)



(b)





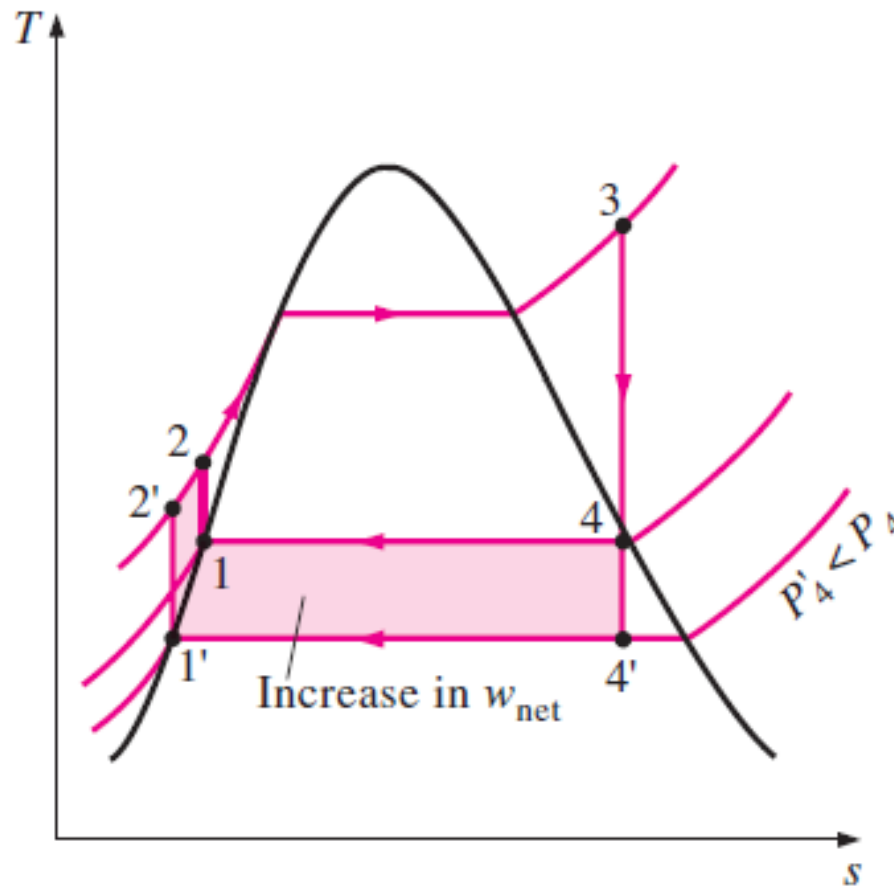
Comment peut-on augmenter le rendement du cycle de Rankine?

Diminuer la basse pression BP

Cela nécessitera une température de condensation plus basse. Dans la plupart des cas on a recours à un refroidissement du condenseur à l'eau ou autre source froide.

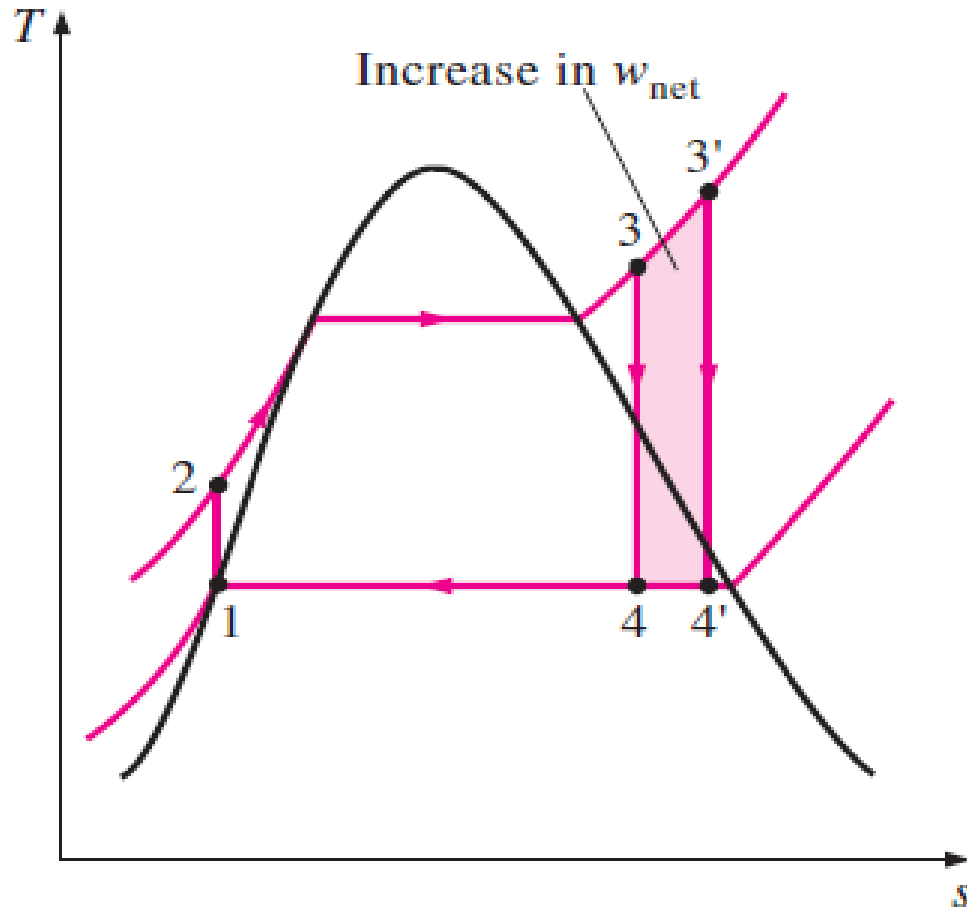
Pour des pressions en dessous de la pression atmosphérique, il faut extraire l'air qui s'infiltré sous l'effet de la dépression du condenseur pour ne pas bloquer son fonctionnement.

La diminution de la BP engendre une augmentation dans la fraction du liquide à la sortie de la turbine (point 4') ce qui cause des usures aux pales de celle-ci.





Comment peut-on augmenter le rendement du cycle de Rankine?



Augmenter la température dans la chaudière (température motrice)

Pour des raisons de métallurgie, cette température est limitée. Actuellement la température motrice la plus élevée autorisée est de 620°C. Toute augmentation de cette température dépend de l'amélioration des matériaux actuels ou de la recherche de nouveaux matériaux résistants aux très hautes températures (céramique, fibres de carbone...)



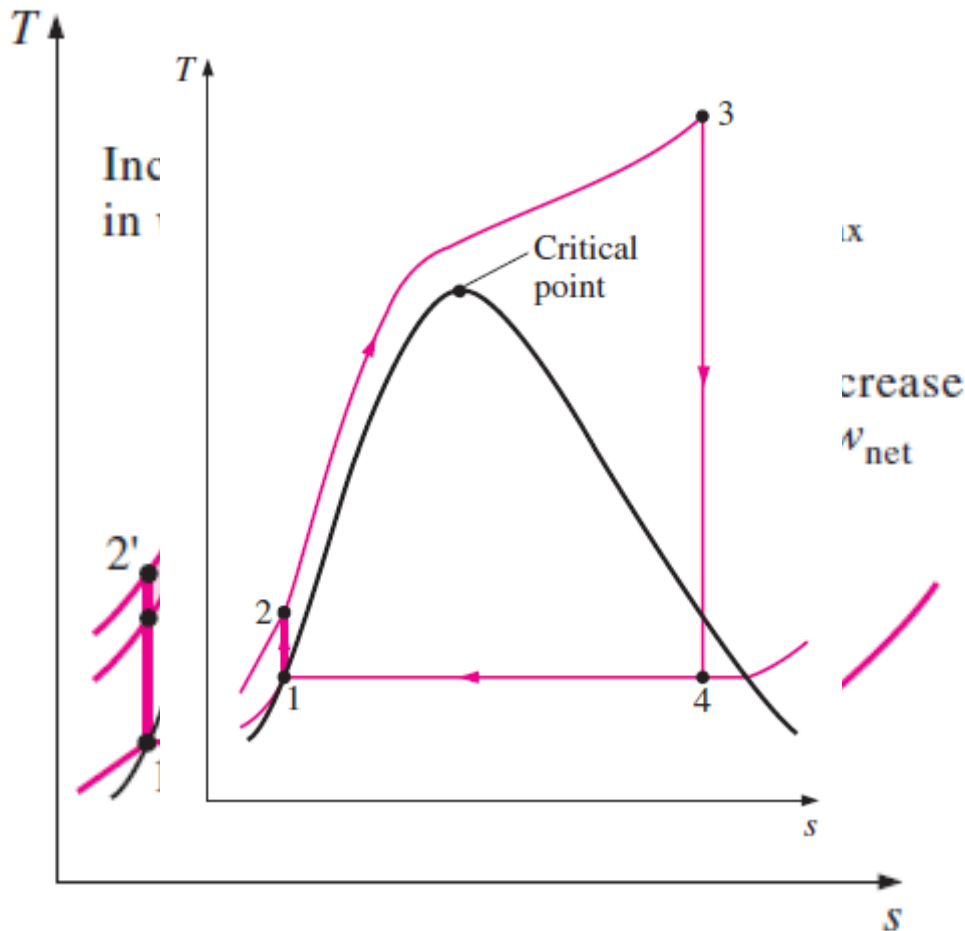
Comment peut-on augmenter le rendement du cycle de Rankine?

Augmenter la haute pression HP

L'augmentation de la haute pression n'est pas sans conséquences. En fait, cela augmentera l'humidité du fluide au cours de la détente dans la turbine, chose à éviter. Ce problème est corrigé par une resurchauffe du fluide après une détente partielle.

La HP peut atteindre actuellement des valeurs très élevée (300bar) dépassant ainsi la pression critique.

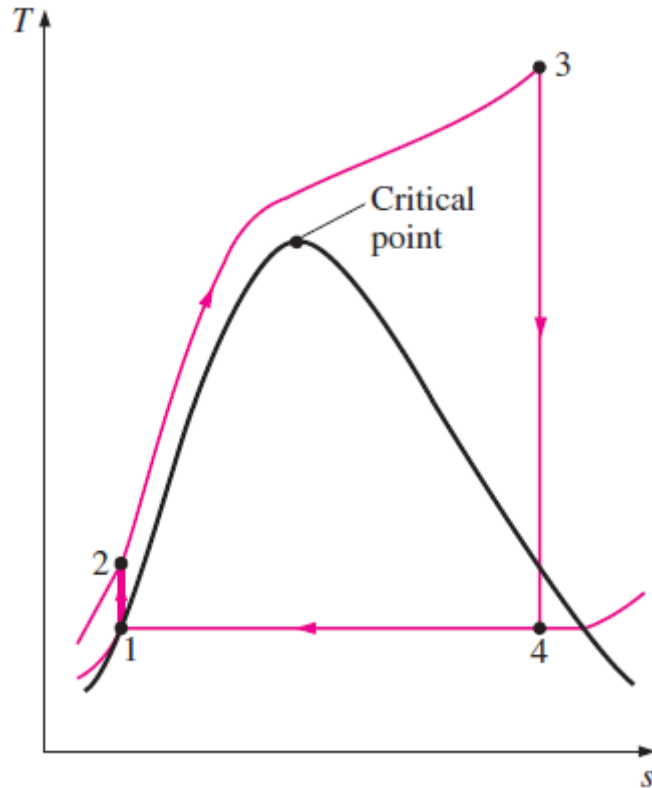
Plus de 150 centrales électriques fonctionnent actuellement avec des cycle de Rankine supercritiques





Comment peut-on augmenter le rendement du cycle de Rankine?

Augmenter la haute pression HP



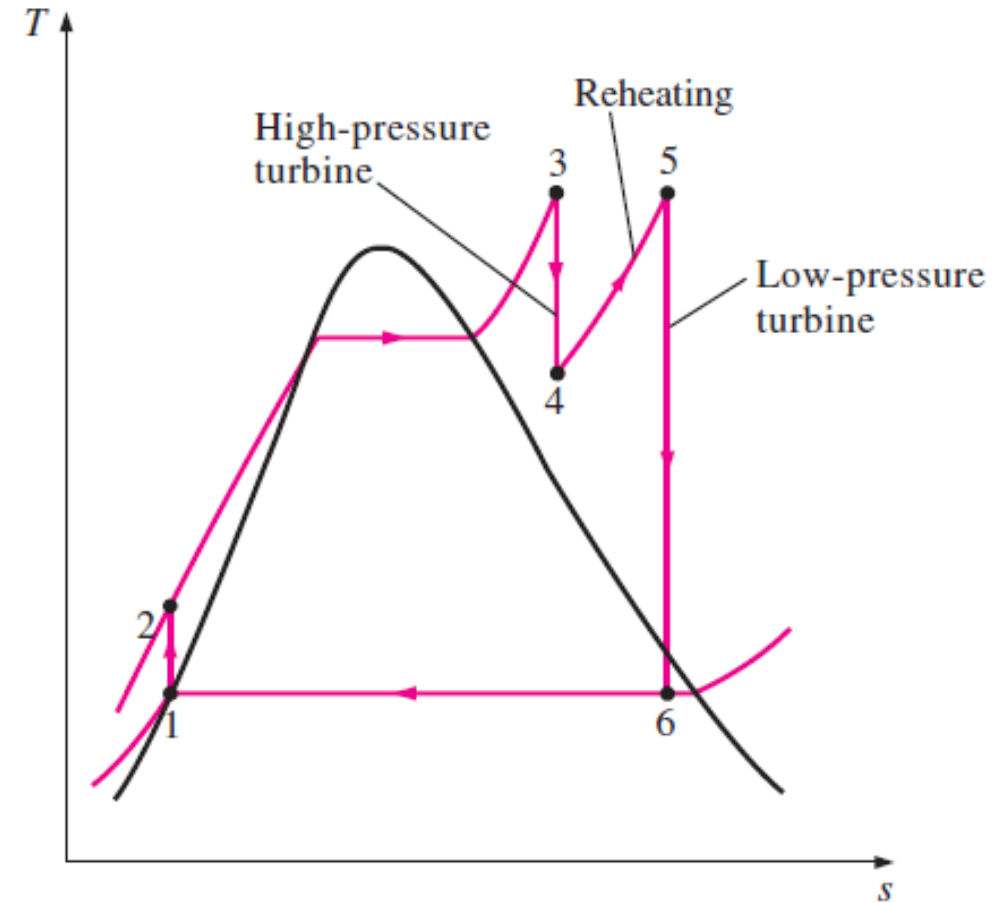
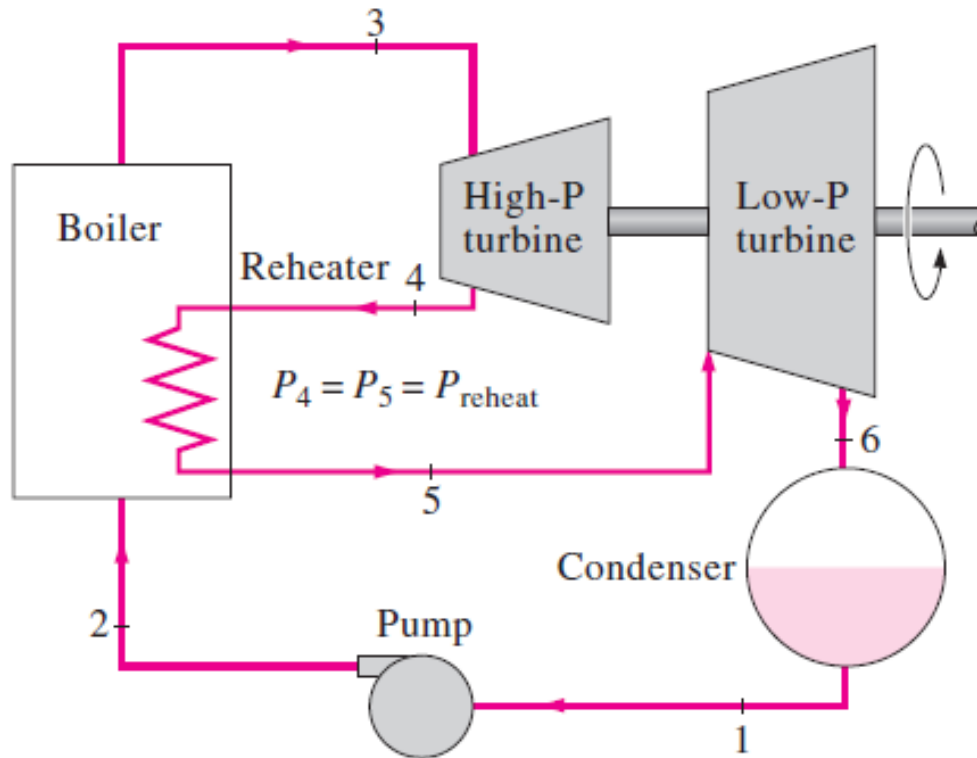
L'augmentation de la haute pression n'est pas sans conséquences. En fait, cela augmentera l'humidité du fluide au cours de la détente dans la turbine, chose à éviter. Ce problème est corrigé par une resurchauffe du fluide après une détente partielle.

La HP peut atteindre actuellement des valeurs très élevée (300bar) dépassant ainsi la pression critique.

Plus de 150 centrales électriques fonctionnent actuellement avec des cycle de Rankine supercritiques

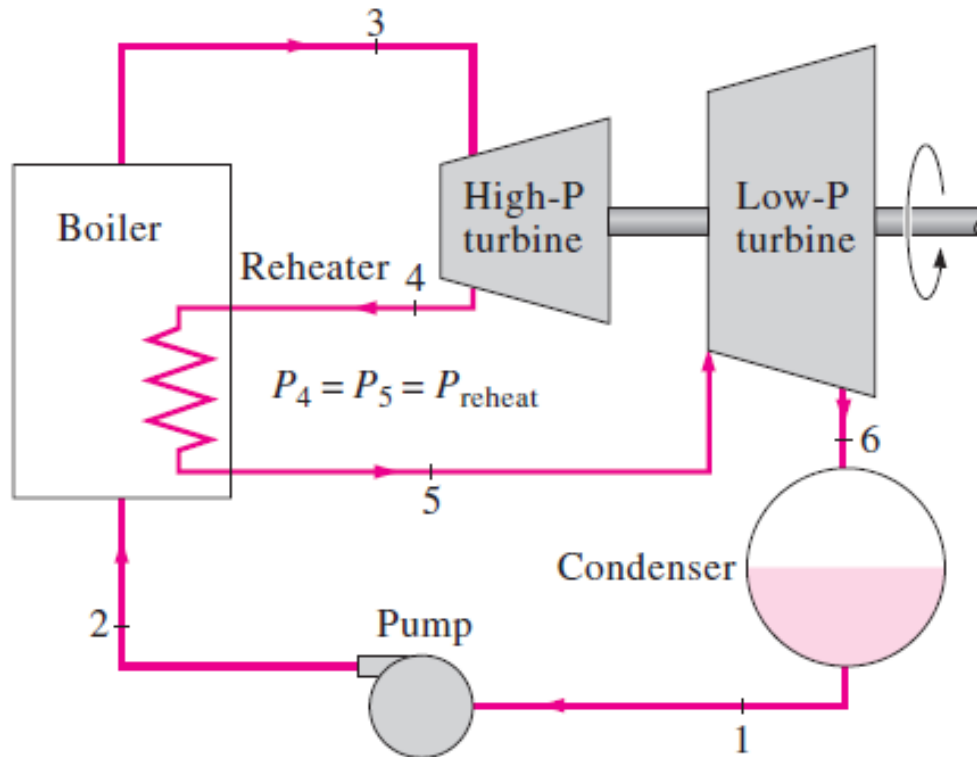


Cycle de Rankine à resurchauffe





Cycle de Rankine à resurchauffe



Le travail net récupéré est ainsi la somme des travaux fournis par les deux turbine basse et haute pression.

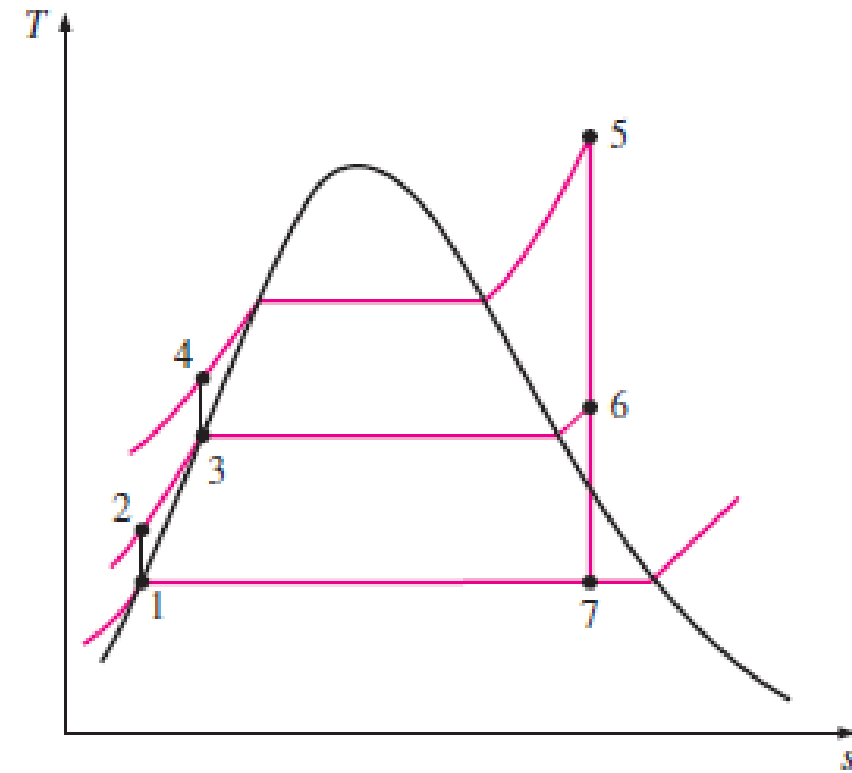
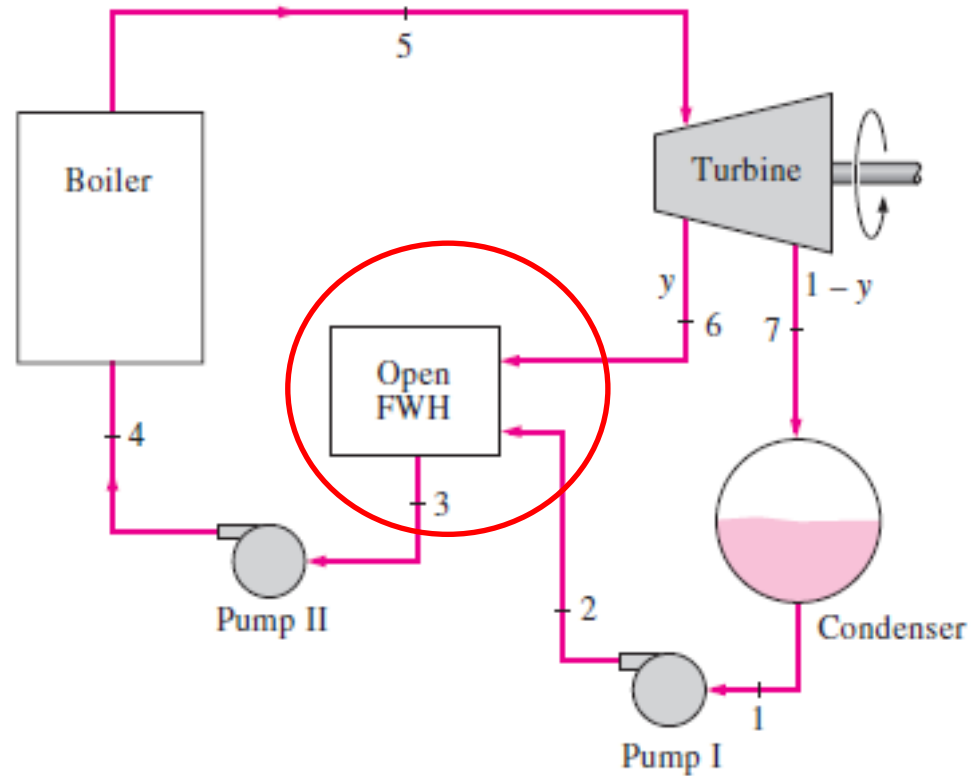
La chaleur consommée lors de la resurchauffe est à comptabiliser dans la chaleur totale de la chaudière.

$$\dot{W}_{turbine} = \dot{m} \cdot [(h_4 - h_3) + (h_6 - h_5)]$$

$$\dot{Q}_{chaudière} = \dot{m} \cdot [(h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)]$$

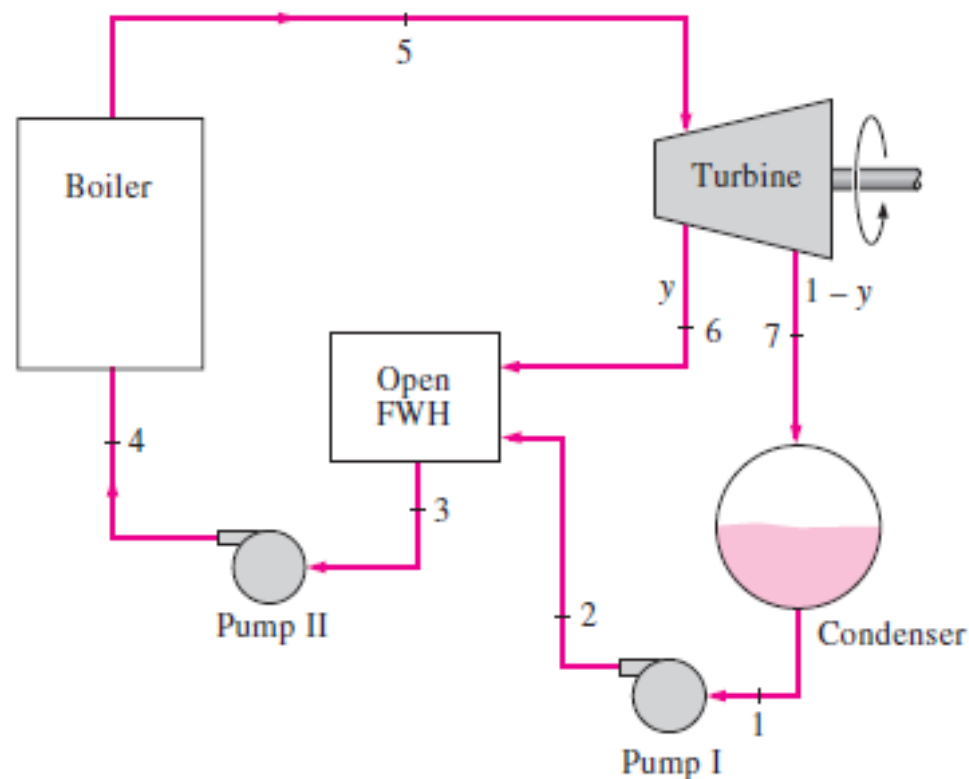


Cycle de Rankine à soutirage





Cycle de Rankine à soutirage



Le débit du soutirage permet d'augmenter la température moyenne de l'eau à l'entrée de la chaudière et par la suite diminuer la chaleur nécessaire au niveau de celle-ci.

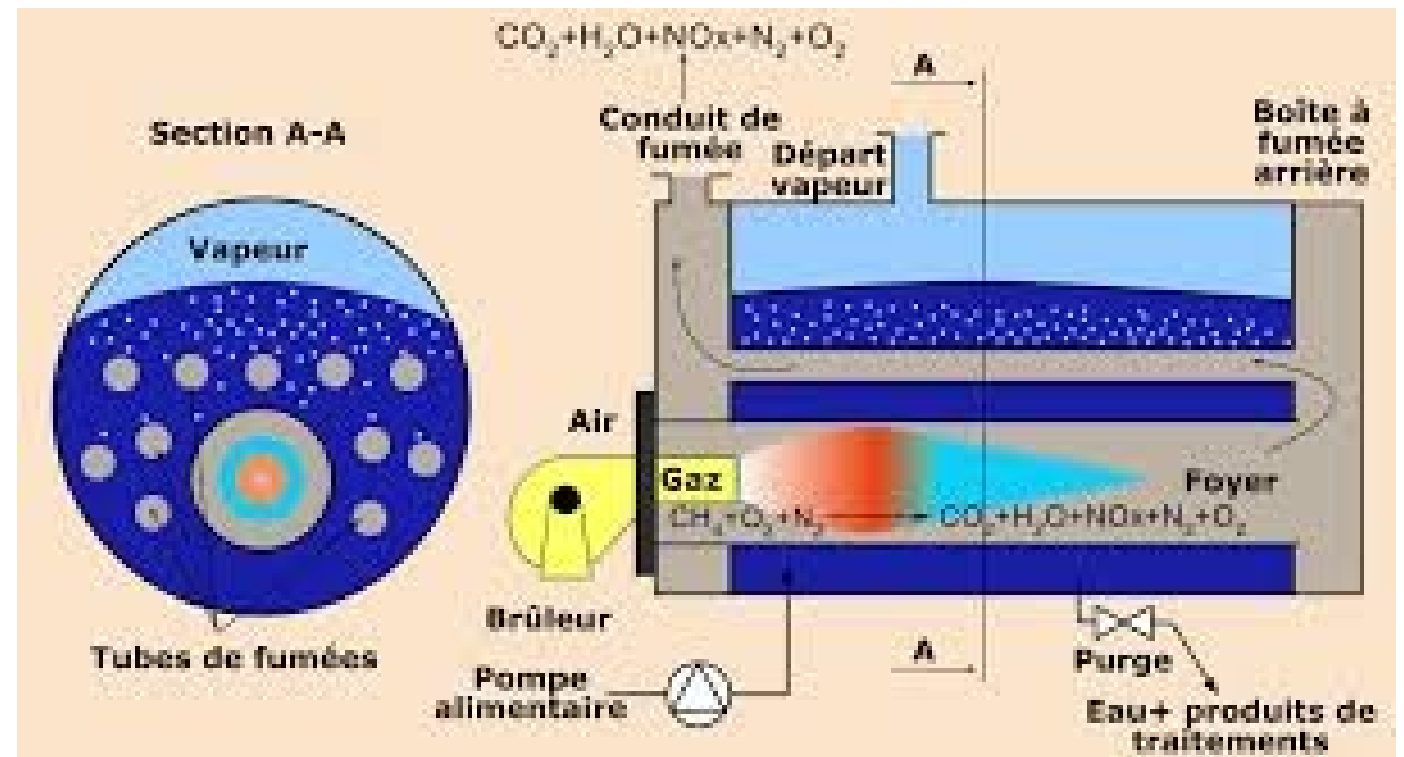
Le débit du soutirage est limité car la puissance délivrée par la turbine diminue en diminuant le débit.

$$\dot{W}_{turbine} = \dot{m} \cdot \left[y \cdot (h_6 - h_5) + (1 - y) \cdot (h_7 - h_5) \right]$$

$$\dot{W}_{pompe} = \dot{m} \cdot \left[(1 - y) (h_2 - h_1) + (h_4 - h_3) \right]$$

Chaudière à tube de fumée

Dans les chaudières à tubes de fumées, la flamme et les fumées qui résultent de la combustion circulent du brûleur jusqu'à la cheminée dans un faisceau de tubes immergés dans une calandre formant le réservoir d'eau. Elle produisent généralement de la vapeur saturante, directement issue de l'ébullition dans le réservoir d'eau.

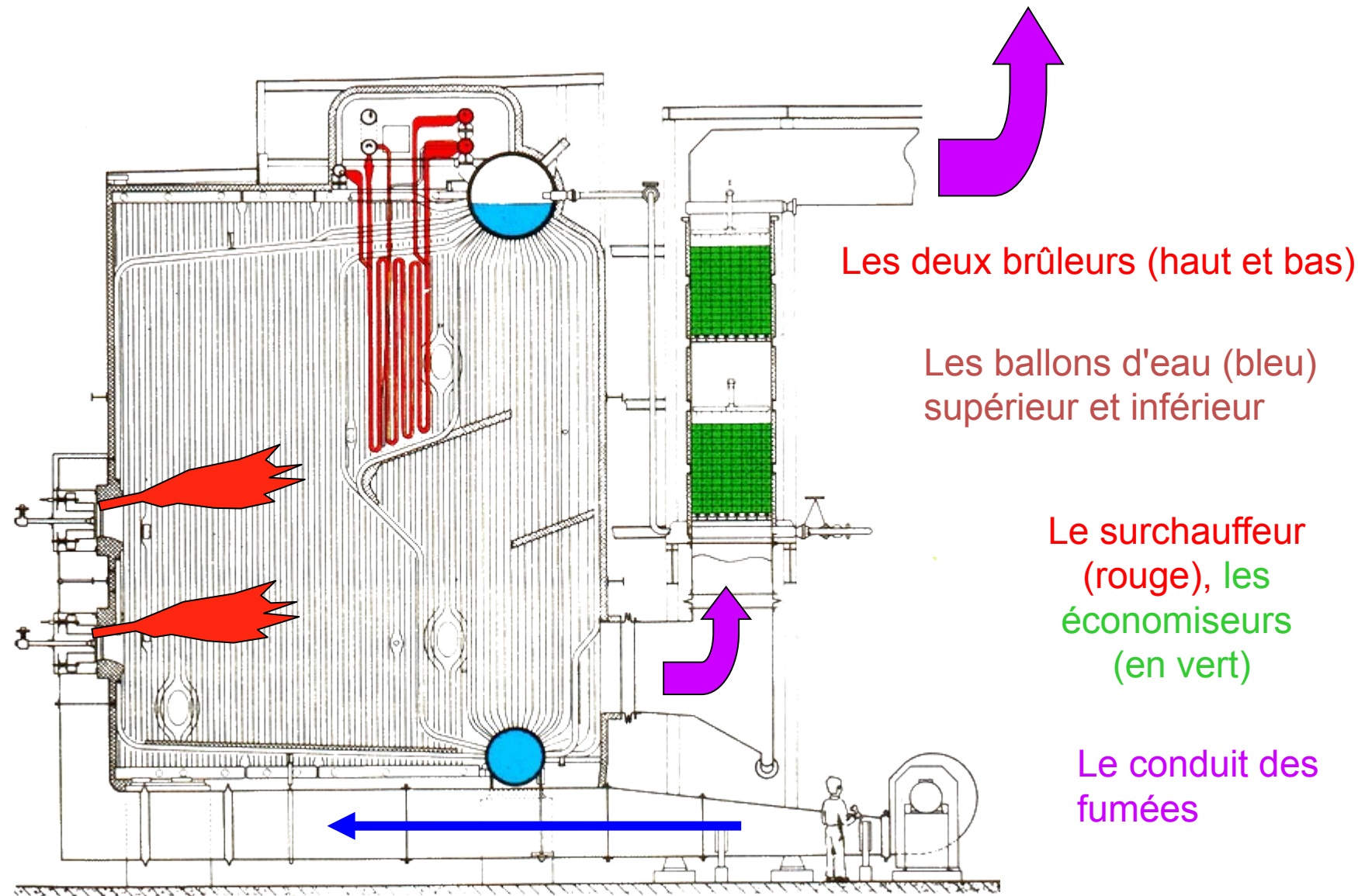


Chaudière à tube d'eau



Les tubes de descente d'eau sont situés à l'intérieur des parois avant et arrière et à l'extérieur de la zone de combustion.

Chaudière à tube d'eau

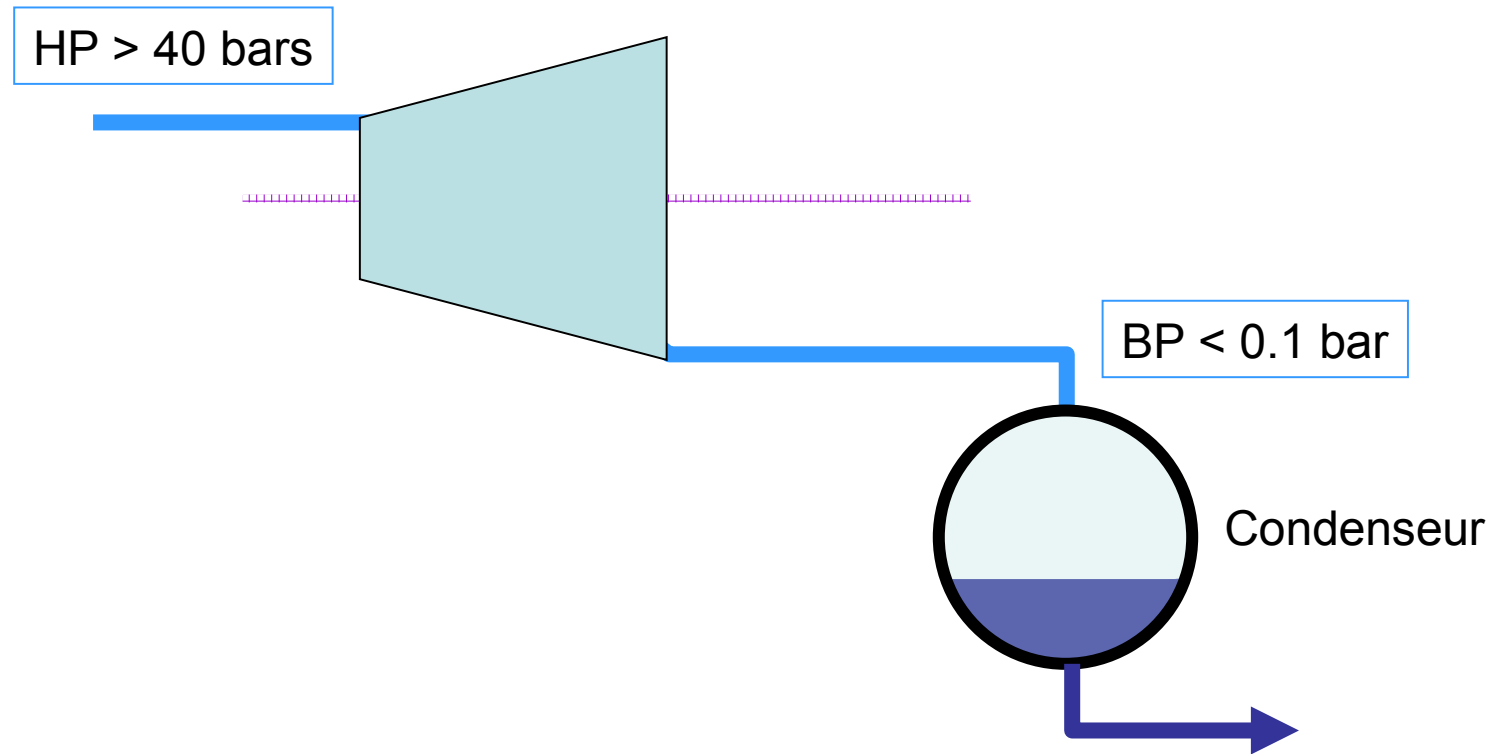


on distingue l'arrivée d'air de combustion avec soufflante

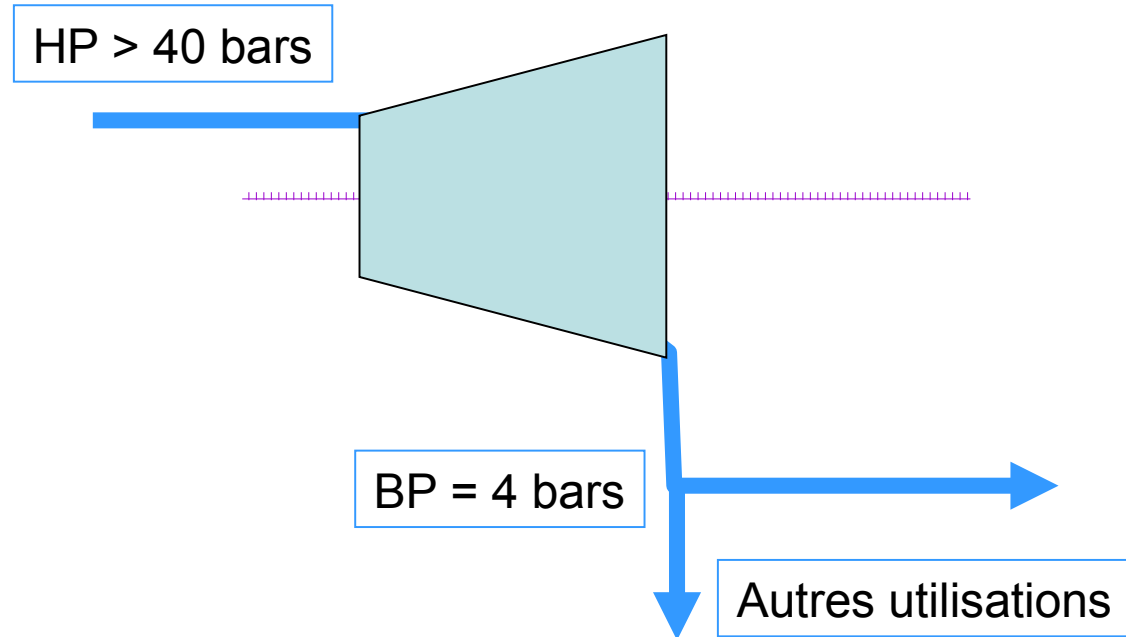
Chaudière à tube d'eau

- Dans les chaudières à tubes d'eau, la combustion est réalisée dans une enceinte garnie de briques réfractaires, laquelle est tapissée de tubes d'eau.
- Ces tubes sont alimentés par deux ballons, l'un en partie supérieure avec régulation de niveau, l'autre en partie basse en charge.
- L'eau liquide mise en ébullition (rayonnement) dans les tubes, circule du bas vers le haut par effet thermosiphon.
- La vapeur produite est ensuite surchauffée par convection(surchauffeur)
- Puis passe par les économiseurs (préchauffe de l'eau alimentaire à l'aide des fumées déjà préalablement refroidies)

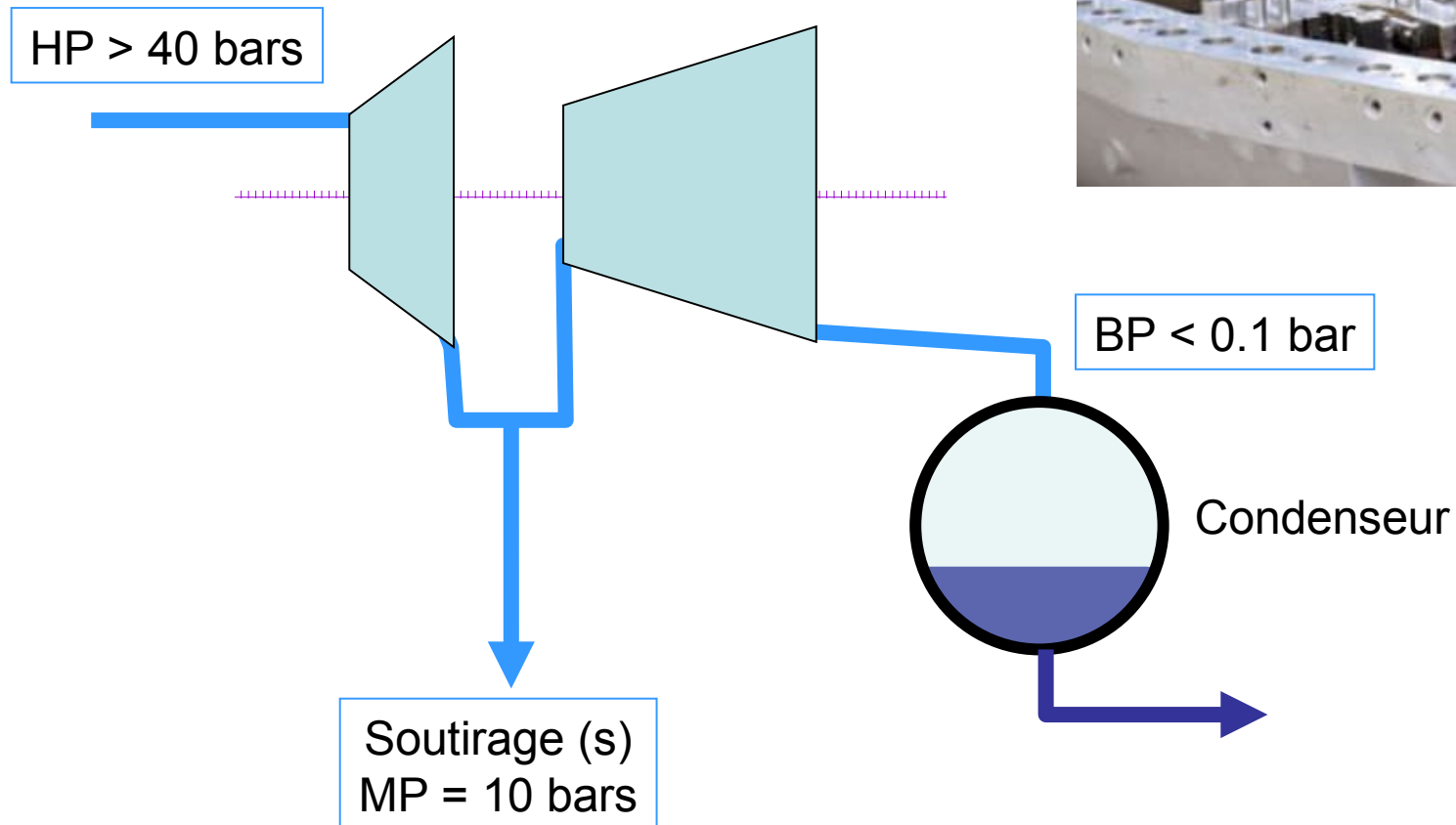
Turbine à condensation



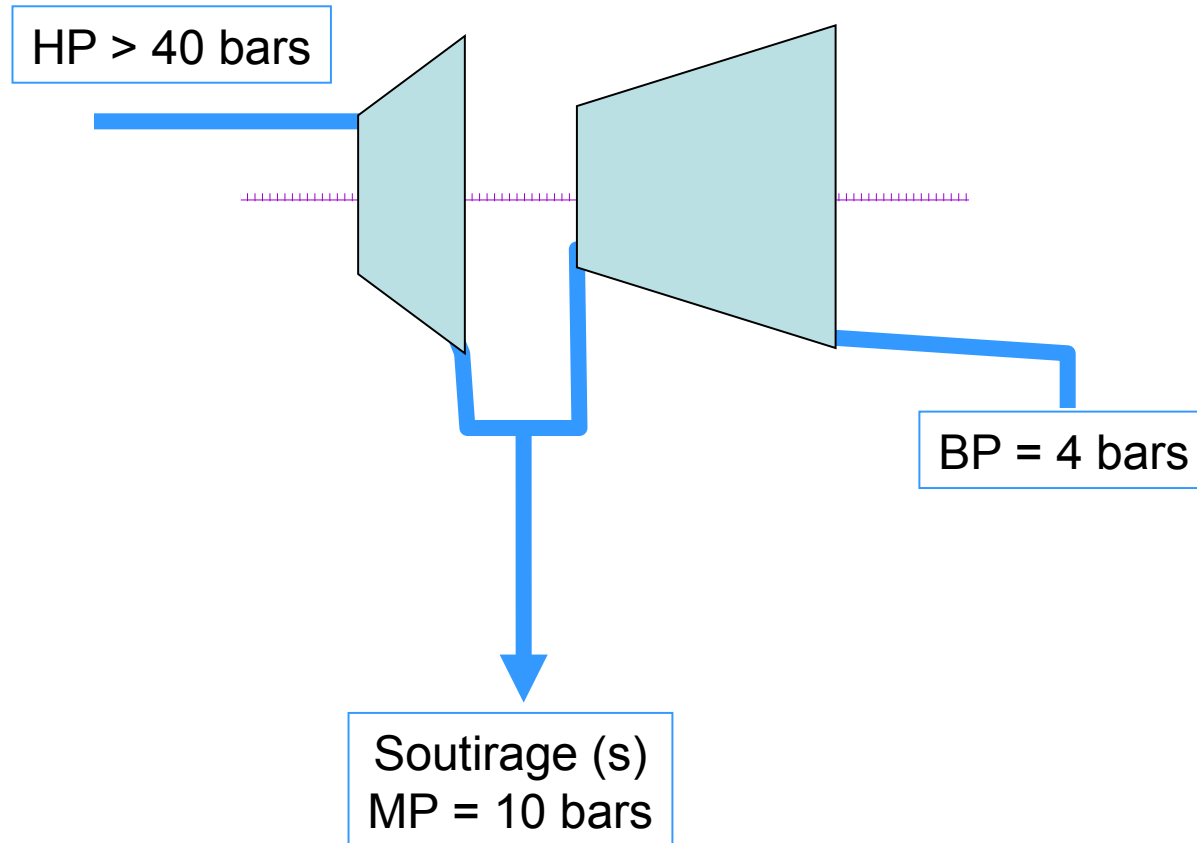
Turbine à contre pression



Turbine à soutirage et condensation

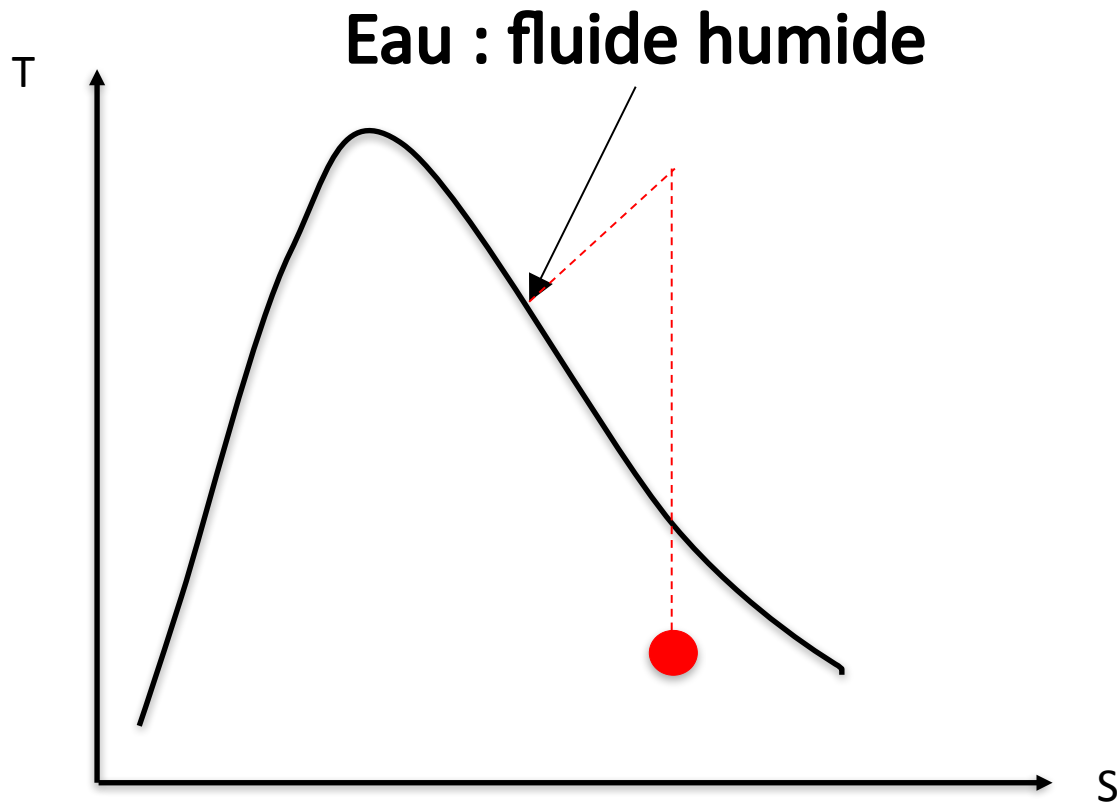


Turbine à contre pression et soutirage

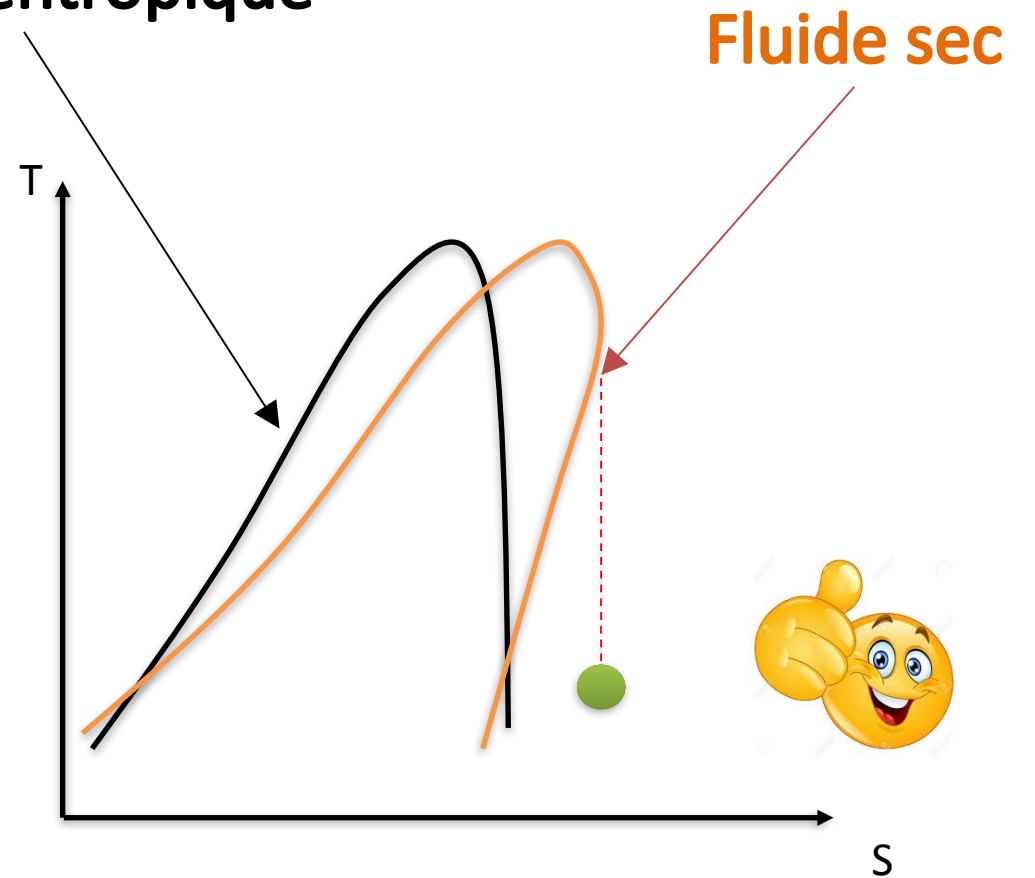


Autres utilisations

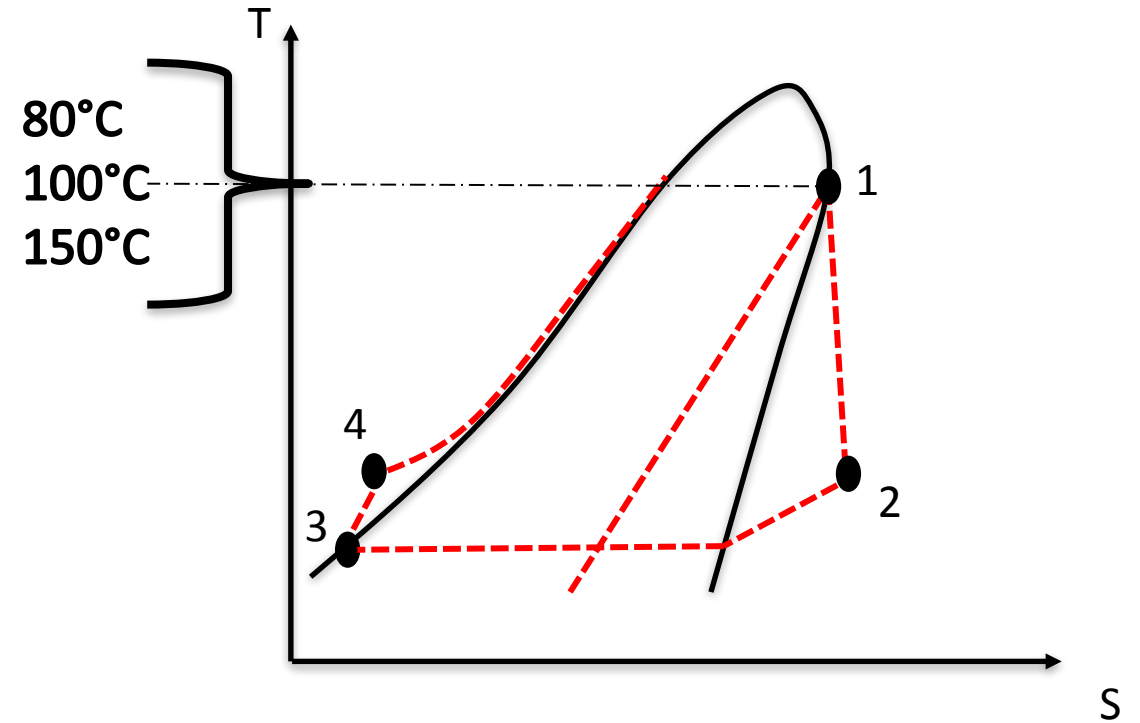
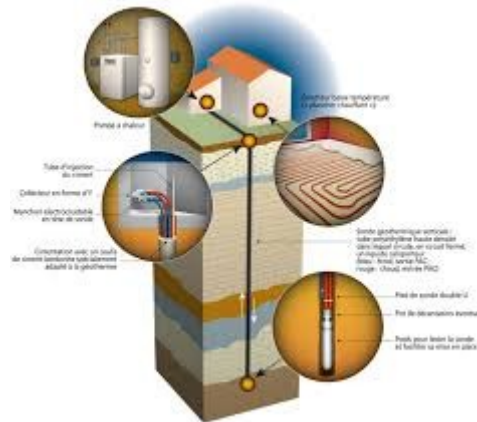
Cycle Organique de Rankine ORC



Fluide isentropique



Cycle Organique de Rankine ORC



Cycle Organique de Rankine ORC



Le fluide organique utilisé est choisi notamment en fonction de la température de la source chaude. Il peut s'agir ainsi de :

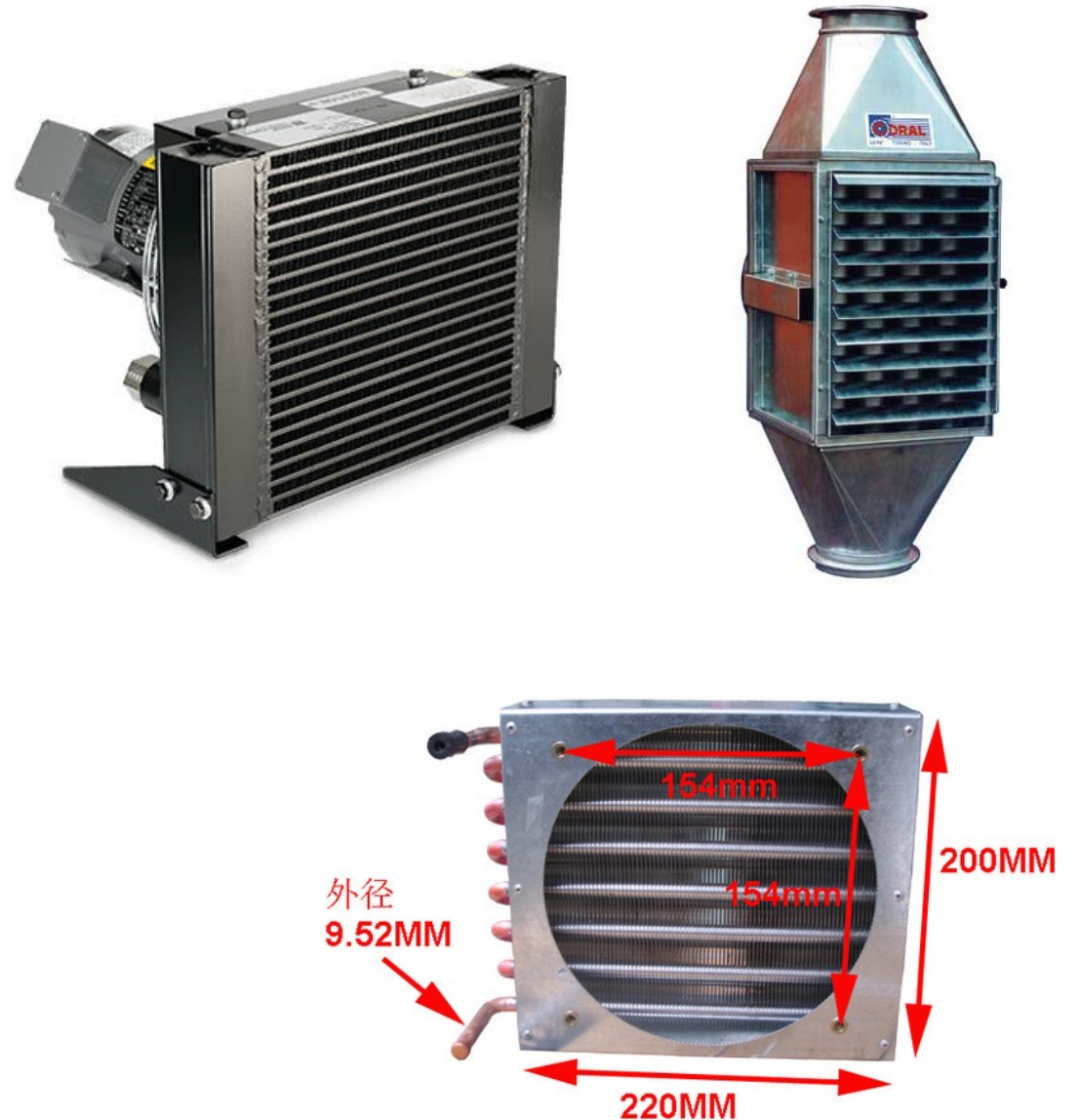
- **réfrigérants**, tels que le HFC-134a (utilisé pour la récupération de chaleur à très basse température et la géothermie (sources chaudes $<100^{\circ}\text{C}$)) ou le HFC-245fa (utilisé pour la récupération de chaleur à basse température ($<170^{\circ}\text{C}$)) ;
- **hydrocarbures**, tels que le n-pentane (récupération de chaleur à basse température et centrales solaire ($<170^{\circ}\text{C}$)) et le toluène (récupération de chaleur à haute température ($<250^{\circ}\text{C}$)) ;
- **siloxanes** (chaînes carbonées possédant un ou plusieurs atomes de silicium), tels que l'OMTS (cogénération biomasse) (récupération de chaleur sur des sources typiquement entre 200 et 300°C).

À noter que le choix du fluide organique ne se fait pas uniquement en fonction de la température mais également en fonction d'une série d'autres paramètres à prendre en compte.

Chaudière de récupération/économiseur

Le générateur de vapeur dans un ORC peut être tout simplement un économiseur de fumée ou un échangeur de chaleur avec une source chaude vu sa capacité de s'adapter aux sources à basse température.

Le fluide organique utilisé est ainsi évaporé par échange de chaleur dans une chaudière de récupération de fumée ou un échangeur de chaleur qui peut être installé même dans la cheminée d'une maison résidentielle.



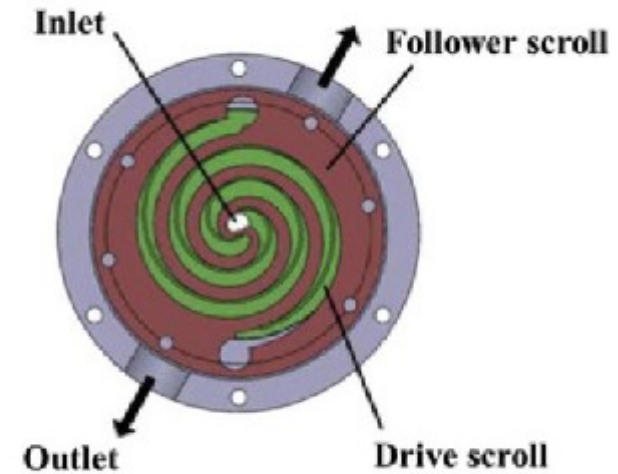
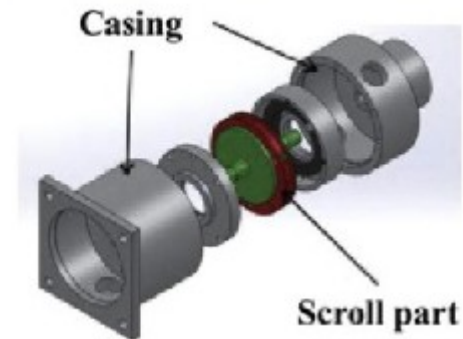
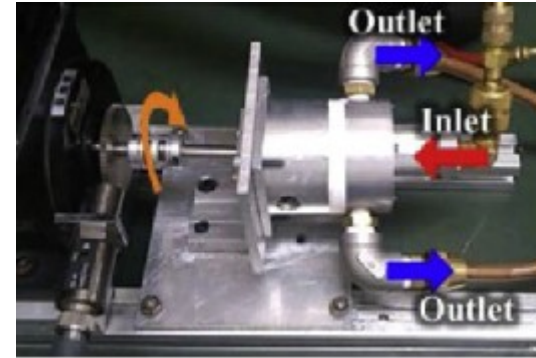
Turbine / Expandeur

Les modules ORC sont une sortes de mini-centrale électrique qui, à nos jours, peut être installée à domicile.

Plusieurs technologies de détente ont vu le jour avec le développement des ORC, en plus des turbines classiques.

Les expandeurs Scroll, qui sont sous la forme d'escargo et qui sont adaptés aux faibles puissances avec de meilleurs rendements.

L'avantage majeur des expandeur Scroll est leur petite taille comparé à la turbine.



Turbine / Expandeur

Des moteurs linéaires sont aussi utilisés et en voie de développement dans l'industrie. Premier moteur « Energine » développé par « Assystem » en 2015.

