

LA DECARBONISATION DU SECTEUR AERIEN: etude énergétique d'un moteur à hydrogène



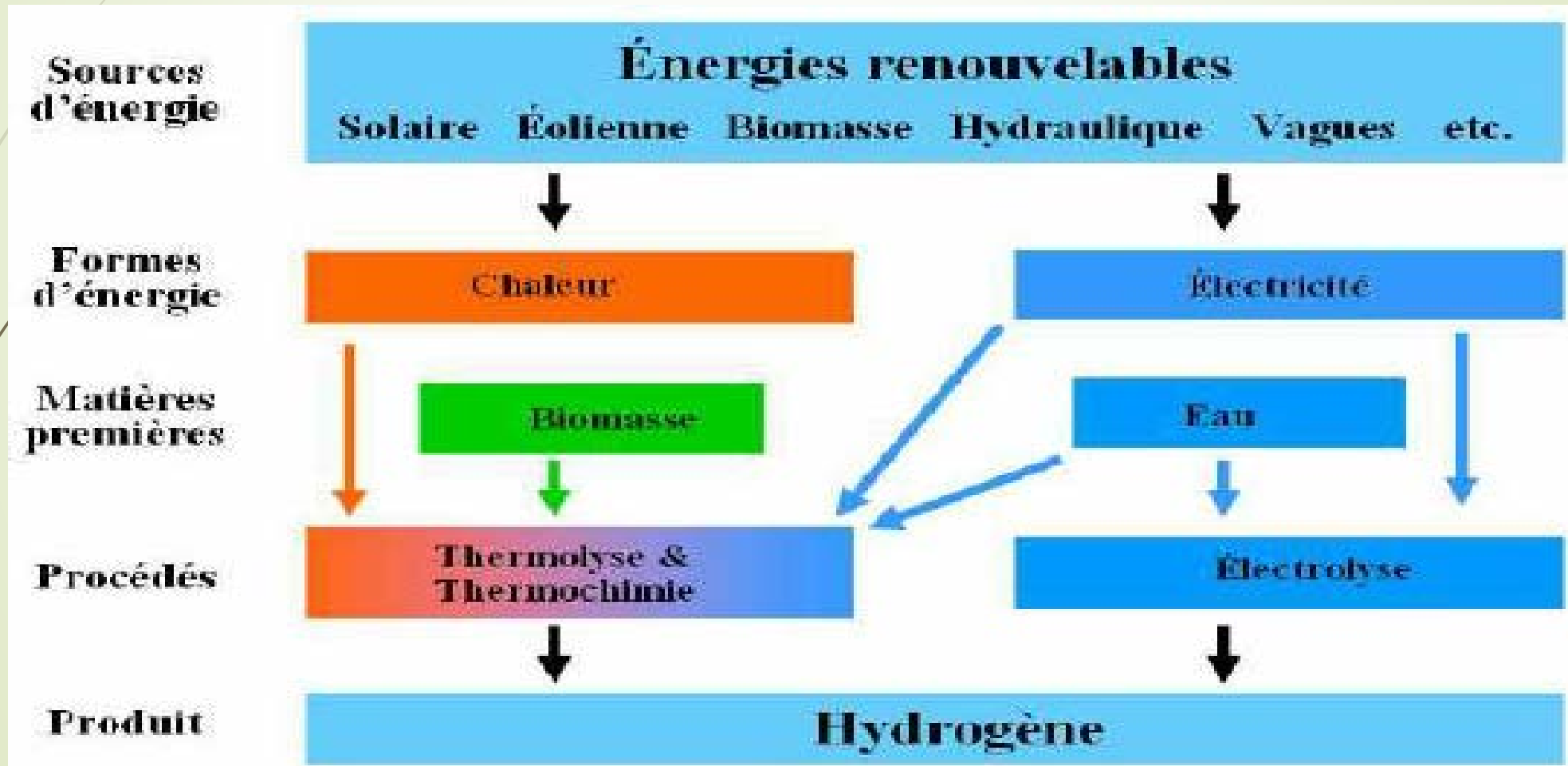
TIPE 2020-2021: " Enjeux sociétaux: énergie,
environnement, sécurité "




PLAN

- I) Quelques procédés de production d'hydrogène
- II) Méthodes de stockage de l'hydrogène
- III) Analyse exergétique du cycle de Rankine

I) Quelques procédés de production de l'hydrogène

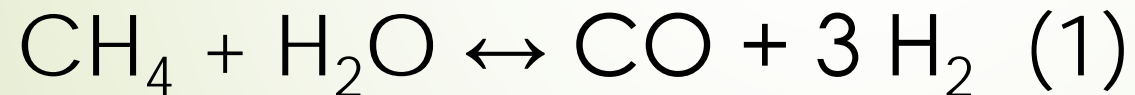




Nous nous intéresserons à ces deux procédés de production d'hydrogène qui utilisent les énergies fossiles.

1) **Le reformage à la vapeur du méthane**

Ce procédé se résume en deux étapes(réactions chimiques).



$$\underline{\Delta H^\circ}_{298} = +206,2 \text{ kJ mol}^{-1}$$

Cette transformation a lieu à haute température (840 à 950 °C), sous une pression modérée (20 à 30 bar) et selon une réaction fortement

endothermique, pour produire du dihydrogène.

D'où la nécessité de la seconde étape:

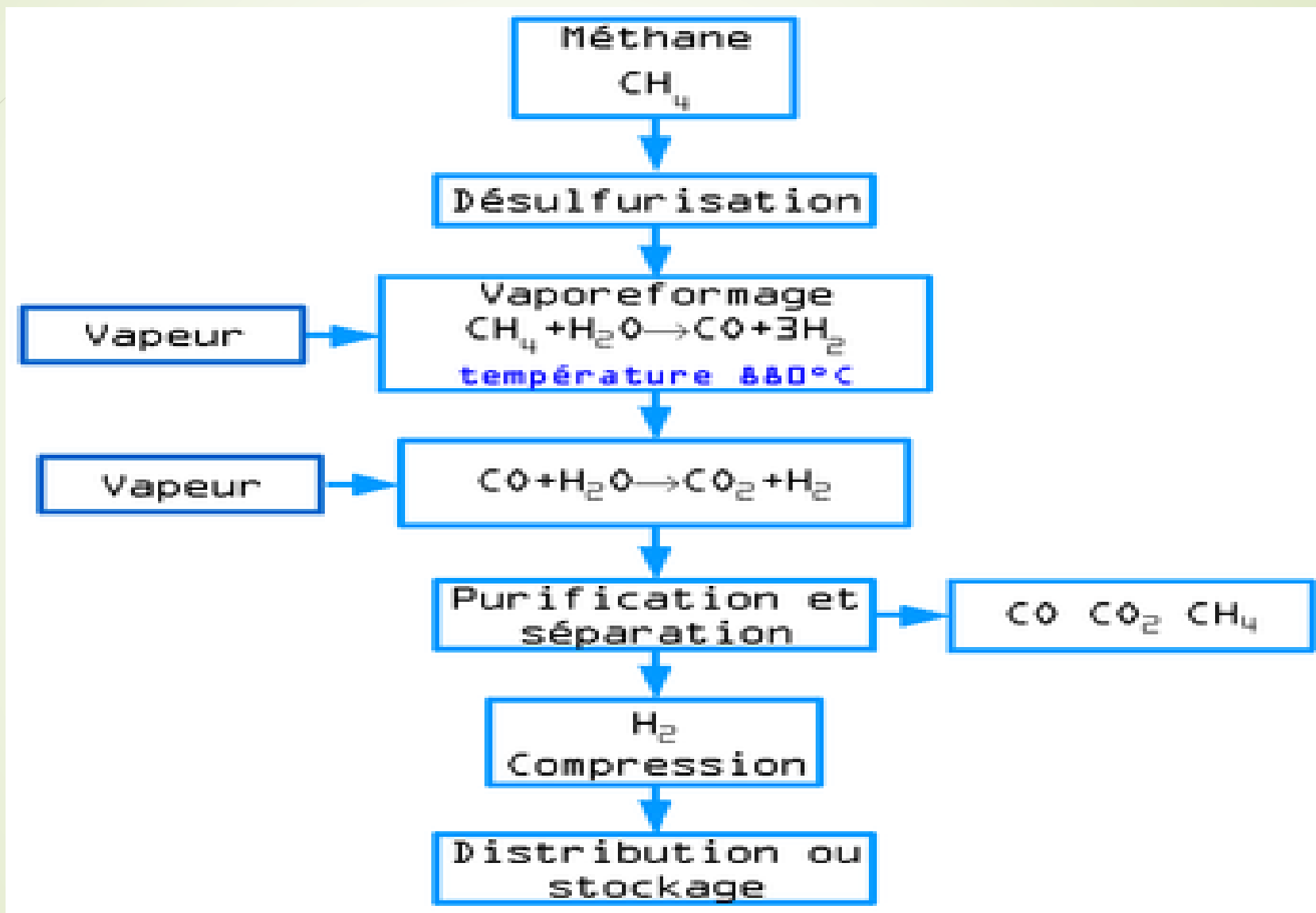
Le monoxyde de carbone produit dans la réaction précédente réagit aussi avec l'eau selon une réaction faiblement exothermique :



$$\Delta H^\circ_{298} = -41,1 \text{ kJ mol}^{-1}$$

Le taux d'hydrogène obtenu est plus important une fois purifié.

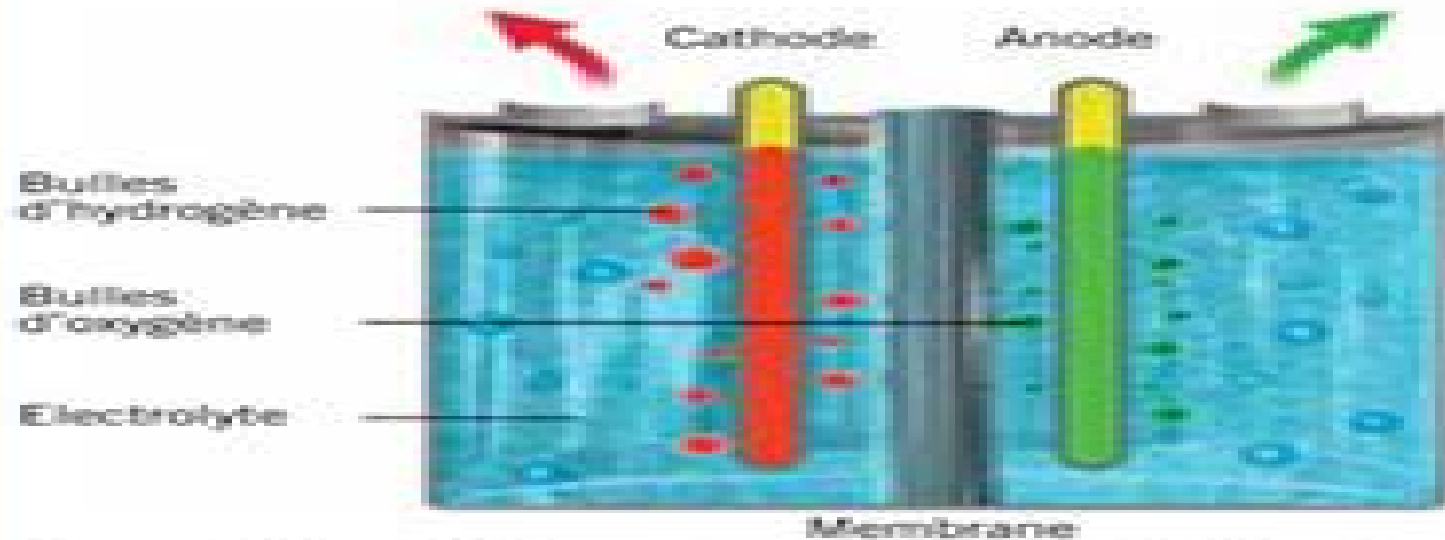
[2]



2) L'électrolyse

[3]

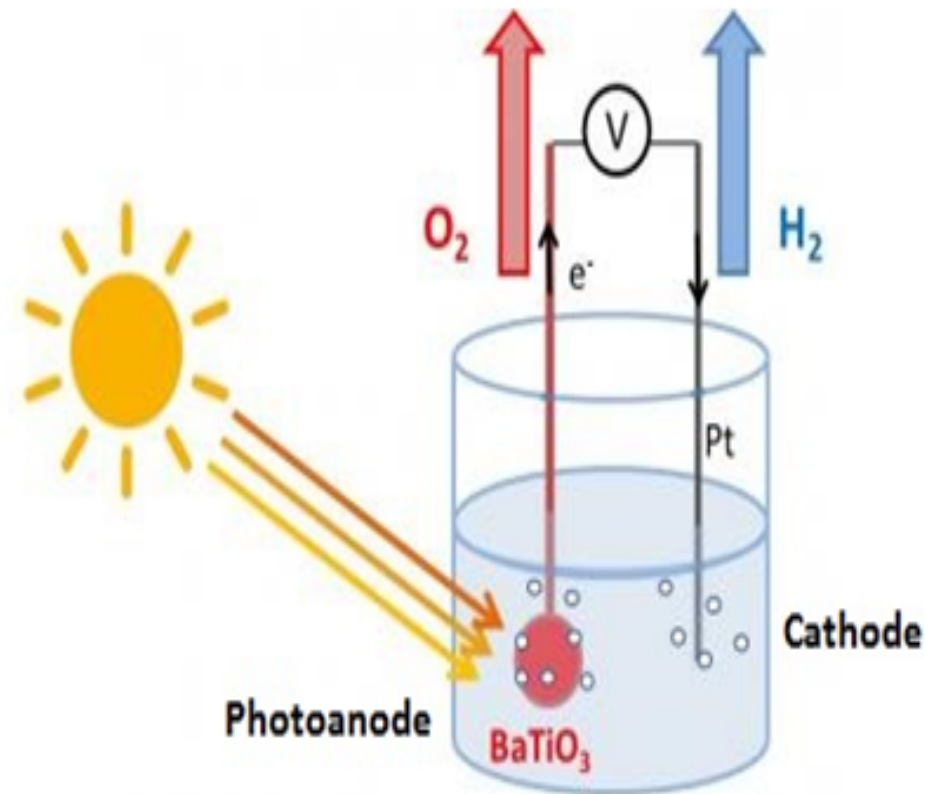
ÉLECTROLYSE



Une cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes (anode et cathode) plongées dans un électrolyte (solution conductrice d'ions) et reliées à un générateur de courant.

En faisant circuler un courant électrique, on obtient une réaction chimique par laquelle l'eau se décompose en ses deux composants : oxygène et hydrogène.

[4]



Les charges émises dans le semi-conducteur utilisé ici en photoanode permettent la production d'oxygène et d'hydrogène. De récentes recherches ont démontré l'effet de la polarisation électrique sur l'efficacité de la réaction. L'installation peut présenter une photoanode ainsi qu'une photocathode, ou seulement l'une des deux.

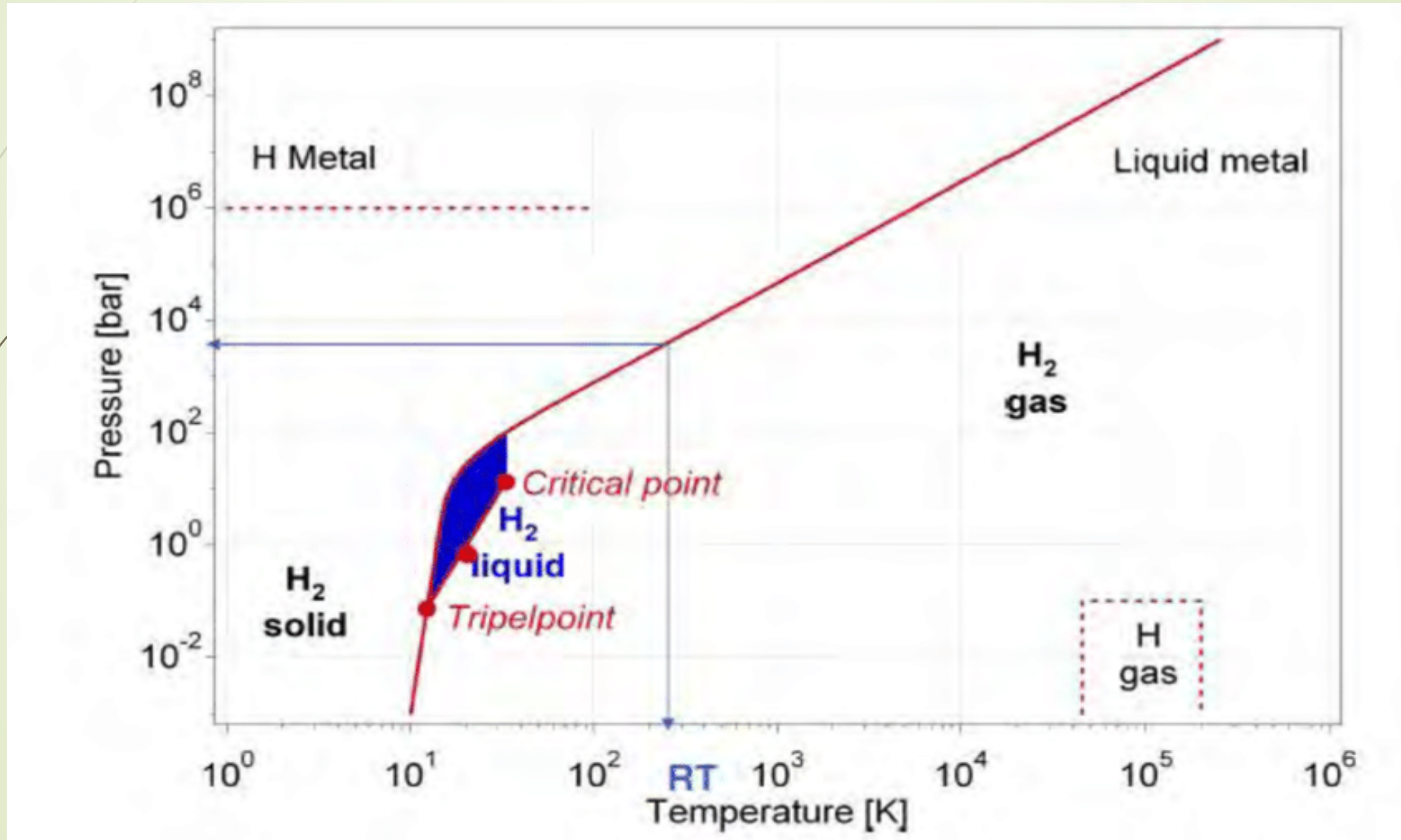
II) Le stockage de l'hydrogène


L'hydrogène produit peut être stocké sous deux formes :

- une forme liquide obtenue après avoir conservé l'hydrogène à une température d'environ $-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- sa forme gazeuse naturelle par la méthode de cryo-compression.

1) conservation de l'hydrogène liquide

[5]





Une technique de pointe pour stocker un maximum d'hydrogène dans un volume restreint consiste à transformer de l'hydrogène gazeux en hydrogène liquide en le refroidissant à très basse température.

L'hydrogène se liquéfie lorsqu'on le refroidit à une température inférieure de $-252,87^{\circ}\text{C}$.

Ainsi, à -252.87°C et à 1,013 bar, l'hydrogène liquide possède une masse volumique de près de 71 kg/m^3 . À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 75 litres.

Afin de pouvoir conserver l'hydrogène liquide à cette température, les réservoirs doivent être parfaitement isolés.



[7]

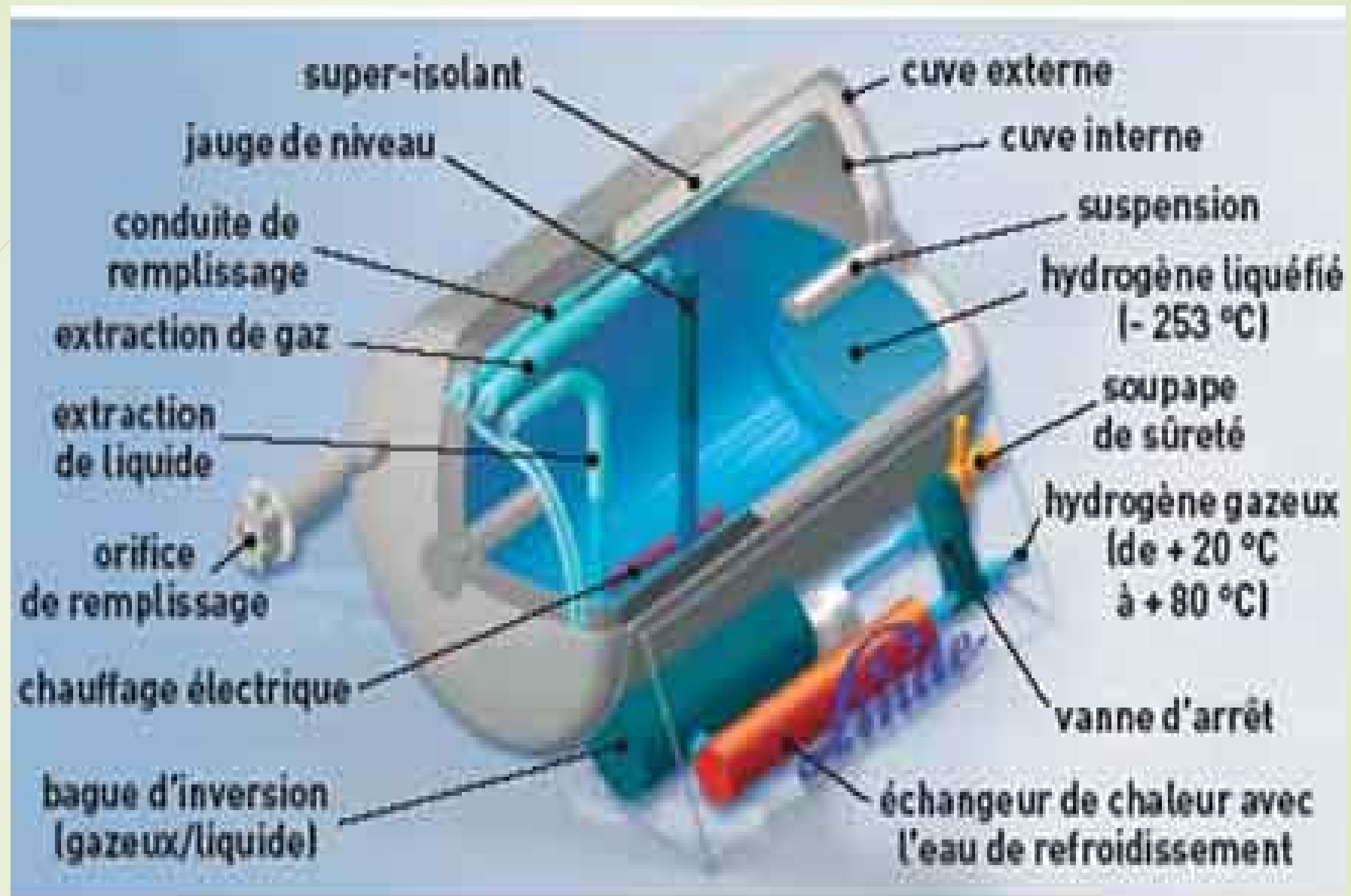



Schéma de structure d'un réservoir d'hydrogène liquide.




2) **La cryo-compression**

La difficulté est alors de porter et de maintenir l'hydrogène à une température de $-252,8\text{ °C}$. Le réservoir doit alors résister à de hautes pressions et disposer de systèmes secondaires maintenant l'hydrogène à basse température, et à une pression au moins légèrement supérieure à la pression atmosphérique. En outre, la liquéfaction de l'hydrogène et son maintien en température ont un coût énergétique élevé et, par là, sont polluants. C'est la raison pour laquelle la cryo-compression est utilisée, et ce afin de contourner ce problème.



Avec la cryo-compression, pour un réservoir d'un volume donné, on mettra plus de 40 % d'hydrogène de plus qu'avec de l'hydrogène comprimé à 700 bars. Alors que le CCH₂ n'est comprimé qu'à une pression de 300 bars .





III) Analyse exergétique du cycle de Rankine

1) description du cycle de Rankine

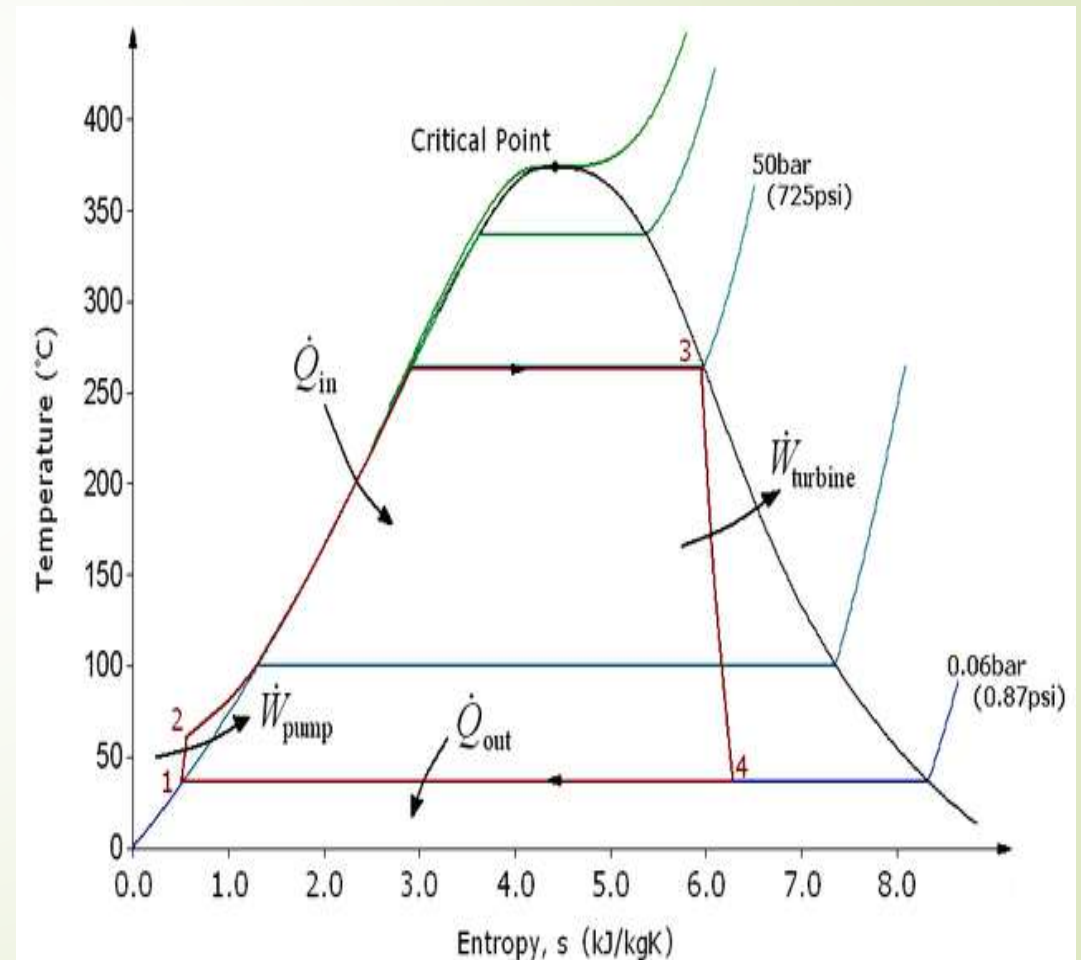
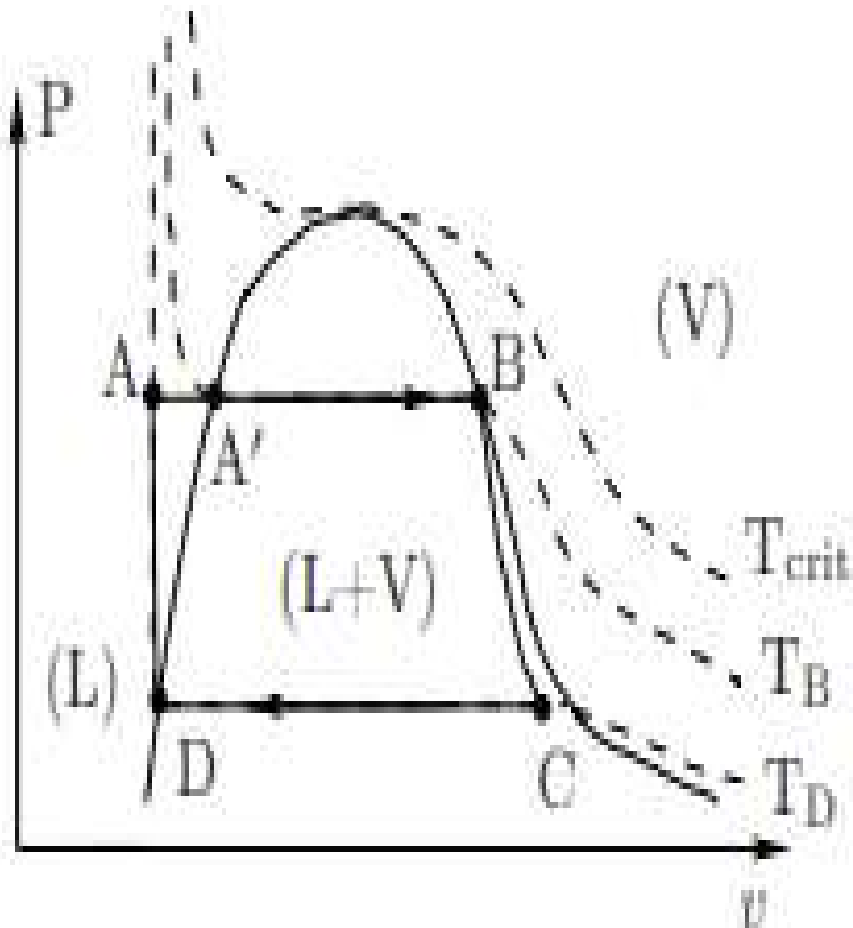
Il comporte quatre étapes principales:

- a) Échauffement isobare($A'C$)
- b) Détente adiabatique réversible($C'D$)
- c) Liquéfaction isobare(DE)
- d) Compression adiabatique réversible(EA')

[illegible]

Diagrammes thermodynamiques

[9]



2) Modelisation des composants du cycle de Rankine

a) La pompe

Elle est modélisée par l'équation suivante:


$$\dot{m}_{ft} = \frac{\rho_{ft,e} N_{pp} C_{pp}}{60}$$

avec \dot{m}_{ft} , le debit massique de fluide de travail (ft) [kg/s], N_{pp} , la vitesse de rotation de la pompe [tr/min] et C_{pp} , la cylindrée de la pompe [m³].

b) La turbine

La turbine permet de fixer la pression d'évaporation du système, connaissant la pression de condensation et le débit massique de fluide de travail fixé par la pompe. Cette pression est calculée via la relation semi-empirique de Stodola qui suppose que le régime d'écoulement n'est pas critique :

$$\dot{m}_{ft} = K_{eq} \sqrt{\rho_{ft,e,turb} P_{e,turb} \left(1 - \left(\frac{P_{e,turb}}{P_{s,turb}} \right)^{-2} \right)}$$



avec K_{eq} la section de passage équivalente [m^2] de la turbine qui est un paramètre fixe du modèle.

c) Les échangeurs

Il s'agit de l'évaporateur et du condenseur. Pour les volumes contenant du fluide, les deux lois suivantes sont appliquées :

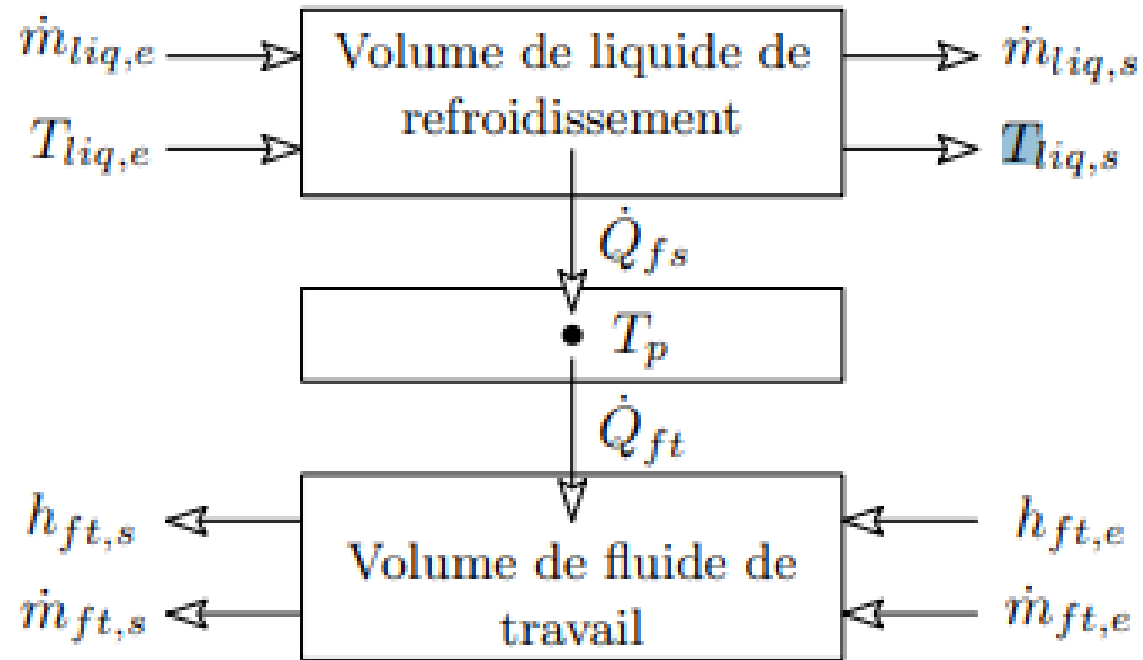


Figure 4 : Représentation d'un disque de l'évaporateur.

- Conservation de la masse :

$$V_f \frac{\partial \rho_f}{\partial t} = \dot{m}_{f,e} - \dot{m}_{f,s}; \quad (3)$$

- Conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial m_f h_f}{\partial t} = \dot{Q}_f + \dot{m}_{f,e} h_{f,e} - \dot{m}_{f,s} h_{f,s}; \quad (4)$$

En ce qui concerne le volume représentant la paroi, la conservation d'énergie s'écrit comme suit :

$$\rho_p c p_p V_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \dot{Q}_{fs} - \dot{Q}_{ft} \quad (5)$$

où l'indice “ p ” se réfère à paroi, avec $c p_p$ la capacité thermique de la paroi, les indices “ fs ” et “ ft ”, quant à eux, se réfèrent à “fluide secondaire” et “fluide de travail”.

La résolution de la conservation de l'énergie est faite via les hypothèses $h_f = h_{f,s}$, et $\dot{m}_{f,e} = \dot{m}_{f,s} = \dot{m}_f$; $h_{f,s}$ étant dès lors l'inconnue à isoler (sortie du disque). Ecrite numériquement, l'équation à résoudre devient :

$$h_{f,s}^i = \frac{h_{f,s}^{i-1} + \tau / \rho V (\dot{m}_f h_{f,e} + \dot{Q}_f)}{1 - \dot{m}_f \tau / \rho V} \quad (6)$$

avec $\tau = 0.01$ [s], le pas de résolution numérique, et $\dot{Q}_f = hS \left(\frac{T_{f,e}^{d-1} + T_{f,s}^{d-1}}{2} - T_p \right)$, où h est le coefficient d'échange [W/m²K] et S la surface d'échange [m²].


Exergie

L'exergie est une grandeur physique permettant de quantifier la part d'énergie thermique convertible en énergie mécanique d'une quantité de chaleur relativement aux conditions ambiantes.

$$dEx = dQ \cdot (1 - T_0/T) = dQ - T_0 \cdot dS$$

En appliquant le premier principe et le second principe de la thermodynamique, on obtient:

$$d(Ex)/dt = C \cdot (T - T_0) - T_0 \cdot C \cdot \ln(T/T_0)$$



Le cycle de Rankine est le cycle qui se rapproche le plus de celui de Carnot. Ainsi, son rendement est supérieur à celui des autres cycles. Il varie entre 10 et 70%. Or, le rendement exergétique n'est autre que le rapport du rendement précédent par celui du cycle de Carnot. Autrement dit, l'utilisation du cycle de Rankine permet d'obtenir un excellent rendement exergétique tout en produisant moins de CO_2 . Néanmoins, l'hydrogène s'avère très utile dans la réalisation de pile à combustible indispensable au moteur à hydrogène.

[10]



MERCI POUR VOTRE ATTENTION



ANNEXES:


[1]https://www.researchgate.net/figure/Les-modes-de-production-de-lhydrogene-vecteur-energetique-futur_fig1_257927244

[2]<https://fr.wikipedia.org/wiki/Dihydrog%C3%A8ne>

[3]<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/enouvelables/hydrogene.aspx?Type=Chapitre&numero=3>

[4]<https://www.encyclopedie-energie.org/la-production-dhydrogene-vert/>

[5]https://www.researchgate.net/figure/Diagramme-de-phase-de-lhydrogene-30-Les-procedes-les-plus-simples-de-liquefaction_fig3_316267327



[6]https://fr.wikipedia.org/wiki/Stockage_de_l%27hydrog%C3%A8ne

[7]<http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%20%204.3%20-%20Liqu%C3%A9faction%20de%20l%27hydrog%C3%A8ne%20r%C3%A9v.%20P.M.%20janv2019.pdf>

[8]<https://ecofute.blogspot.com/2014/12/cgeneration-systeme-rankine.html>

[9]https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_Rankine

[10]<https://www.generation-nt.com/airbus-avion-concept-hydrogene-zero-emission-actualite-1980191.html>