

Notes à NPI 2015

Un moteur à essence turbocompressé

A - Rendement du moteur:

$$1 - \eta = \frac{W}{Q_c}$$

$W$  = travail reçu par l'air ( $< 0$ )

$Q_c$  = énergie thermique reçue par l'air de la part de la source chaude.

$$Q_c > 0 \quad Q_F < 0$$

Sur un cycle:  $\Delta U = 0 = W + Q_c + Q_F$  (1)

$$\Delta S = 0 = \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_c}{T_c} + \Delta S_{irr}$$

$$S_{irr} \geq 0 \Rightarrow \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_c}{T_c} \leq 0 \Rightarrow \frac{Q_F}{T_F} \leq -\frac{Q_c}{T_c}$$

$$(1) \Rightarrow \eta = \frac{Q_c + Q_F}{Q_c} = 1 + \frac{Q_F}{Q_c}$$

$$\boxed{\eta \leq 1 - \frac{T_F}{T_c}} \quad \text{égalité si le cycle est réversible}$$

1 - Pour 100 km cad pour  $\Delta t = 3600$  s, l'énergie fournie par la combustion des carburants

$$\text{valeur } Q_c = 5,4 \times 3,6 \cdot 10^7 \text{ J}$$

le travail fourni vaut  $W_F = P \times \Delta t = 18 \cdot 10^4 \text{ W}$

$$\eta_r = \frac{18 \times 10^4 \times 10^3}{5,4 \times 3,6 \times 10^7} = \frac{18}{5,4} \times 10^{-1} = 0,33$$

$$\eta_r \leq 1 - \frac{T_F}{T_c} \quad \frac{T_F}{T_c} \leq 1 - \eta_r$$

$$T_c \geq \frac{T_F}{1 - \eta_r} = \frac{273 + 17}{1 - 0,33}$$

$$T_c \geq 448 \text{ K} \quad \text{inégalité vérifiée pour } T_c \geq 2000 \text{ K}$$

B - Thermodynamique des gaz:

1 - Dans le cadre du modèle gaz parfait,  $U$  et  $H$  ne dépendent que de la température.

$$dU = C_V dT \quad H = U + pV = U + nRT$$

$$dH = C_P dT \quad dH = dU + nRdT$$

$$\Rightarrow C_P - C_V = nR$$

$$\frac{C_P}{C_V} = \gamma$$

$$C_V = \frac{nR}{\gamma - 1} \quad C_P = \frac{\gamma nR}{\gamma - 1}$$

4 - dans le cas d'une évolution adiabatique

$$\Delta S(T, V) - \Delta S(T_0, V_0) = 0$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\gamma - 1} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) = 0$$

$$\ln\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \left(\frac{V}{V_0}\right) = 0$$

$$\Rightarrow \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\gamma - 1} = 1 \Rightarrow T^{\frac{1}{\gamma - 1}} V^{\gamma - 1} = T_0^{\frac{1}{\gamma - 1}} V_0^{\gamma - 1}$$

$$\text{or } T = \frac{pV}{nR} \quad T_0 = \frac{p_0 V_0}{nR}$$

$$\text{Donc } \frac{p V^\gamma}{p_0 V_0^\gamma} = 1$$

(3)

C - le cycle moteur à quatre temps :

5- AA transformation adiabatique réversible en tout point

$$pV^\gamma = p_A V_A^\gamma$$

$$\ln p + \gamma \ln V = \ln(p_A V_A^\gamma)$$

$$\ln p = -\gamma \ln V + \ln(p_A V_A^\gamma)$$

De même pour la transformation C-D

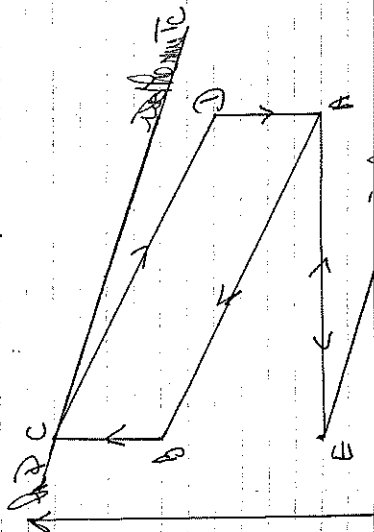
$$pV^\gamma = p_C V_C^\gamma$$

$$\ln p = -\gamma \ln V + \ln(p_C V_C^\gamma)$$

Les courbes A-B et C-D sont donc 2 droites parallèles de pente  $-\gamma$

6- Pour une isotherme  $pV = \text{cte}$

$$\ln p = -\ln V + \ln(p_C V_C) \text{ droite de pente } -1$$



$p(V)$   
isotherme AB  
adiabate BC  
adiabate CD  
isotherme DA

(4)

7- AA : adiabatique  $Q_{AA} = 0$

$$BC : \text{isochore } W_{BC} = 0 \Rightarrow Q_{BC} = \Delta U_{BC} = C_V(T_C - T_B)$$

$$Q_{BC} = \frac{nR}{\gamma-1}(T_C - T_B)$$

$$CD : \text{adiabatique } Q_{CD} = 0$$

$$DA : \text{isochore } W_{DA} = 0 \Rightarrow Q_{DA} = \Delta U_{DA}$$

$$Q_{DA} = \frac{nR}{\gamma-1}(T_A - T_D)$$

$$\text{Pour un cycle : } -W = Q_{BC} + Q_{DA}$$

$$\eta_{\text{cv}} = \frac{Q_{BC} + Q_{DA}}{Q_{BC}} = 1 + \frac{Q_{DA}}{Q_{BC}}$$

$$\eta_{\text{cv}} = 1 + \frac{T_A - T_D}{T_C - T_B} = 1 - \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B}$$

$$V_C = \alpha V_A$$

$$AA \text{ ad. rev} : T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$$

$$CD : T_D V_D^{\gamma-1} = T_C V_C^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_C}{T_D} = \alpha^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_A}{T_D} = \alpha^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_A}{T_D} = \frac{T_B}{T_C}$$

$$\eta_{\text{cv}} = 1 - \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B} = 1 - \frac{1}{\alpha^{\gamma-1}}$$

$$\eta_{\text{cv}} = 1 - \alpha^{1-\gamma}$$

8- AN :  $\eta_{\text{cv}} = 0,58$  rendement élevé pour un moteur.

⑧

8 - AB' adiabatique d'où  $S_{AB'} = 0$   

$$\Delta S_{AB'} = \frac{N_A}{\gamma-1} \ln\left(\frac{T_{B'}}{T_A}\right) + N \ln\left(\frac{V_{B'}}{V_A}\right) > 0$$

$$\Delta S_{AB'} = \frac{N_A}{\gamma-1} \ln\left(\frac{T_{B'}}{T_A}\right) + N \ln\left(\frac{V_{B'}^{\gamma-1}}{V_A^{\gamma-1}}\right) > 0 \quad \begin{matrix} P_{B'} V_{B'} = N k T_{B'} \\ P_A V_A = N k T_A \end{matrix}$$

$$= \frac{N_A}{\gamma-1} \ln\left(\frac{P_{B'} V_{B'}^{\gamma}}{P_A V_A^{\gamma}}\right) > 0$$

Or  $V_A = V_B \quad V_{B'} = V_B$

$$\Rightarrow \ln(P_{B'}) - \ln(P_A) > -\gamma \ln(V_{B'}) + \ln(V_A)$$

$$\ln(P_{B'}) - \ln(P_A) < -\gamma \ln(V_B) + \ln(V_A)$$

$$\Rightarrow \frac{P_{comp}}{P} < -\gamma = \frac{P_{rev}}{P}$$

De même  $\Delta S_{CB} = S_{rev} > 0$

$$\frac{N_A}{\gamma-1} \ln\left(\frac{P_{B'} V_{B'}^{\gamma}}{P_C V_C^{\gamma}}\right) > 0$$

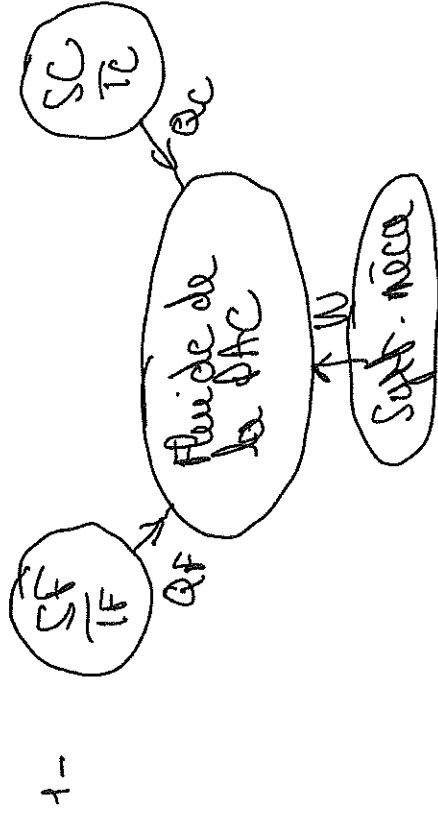
$$\ln(P_{B'}) - \ln(P_C) > -\gamma \ln(V_C) + \ln(V_{B'})$$

$$P_{B'} > P_C$$

D'où  $\frac{P_{comp}}{P} < \frac{P_{rev}}{P} < \frac{P_{B'}}{P}$

## Résumé PT 2014

### Partie A : Modèle d'effort :



Le but de la PAC est de fournir de l'énergie thermique à la source chaude  $\Rightarrow Q_C < 0$

Pour cela le milieu extérieur lui fournit du travail  $W > 0$  et il se crée de l'énergie à la source froide  $Q_F > 0$

$$\text{3- } \text{COP} = \frac{-Q_C}{W}$$

Pour d'un cycle  $W + Q_C + Q_F = 0$

$$W = -Q_C - Q_F$$

$$\text{COP} = \frac{Q_C}{Q_C + Q_F} = \frac{1}{1 + \frac{Q_F}{Q_C}}$$

4- D'après le 2<sup>e</sup> principe écrit pour un cycle :

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} + S_C = 0 \quad (1)$$

$$Q_C + Q_F = -W \quad (2)$$

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_C} = -\frac{W}{T_C} \quad (2')$$

$$(1) - (2') \Rightarrow Q_F \left( \frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_C} \right) = \frac{W}{T_C} - S_C$$

$$\text{De même : } \frac{Q_C}{T_F} + \frac{Q_F}{T_F} = -\frac{W}{T_F} \quad (3)$$

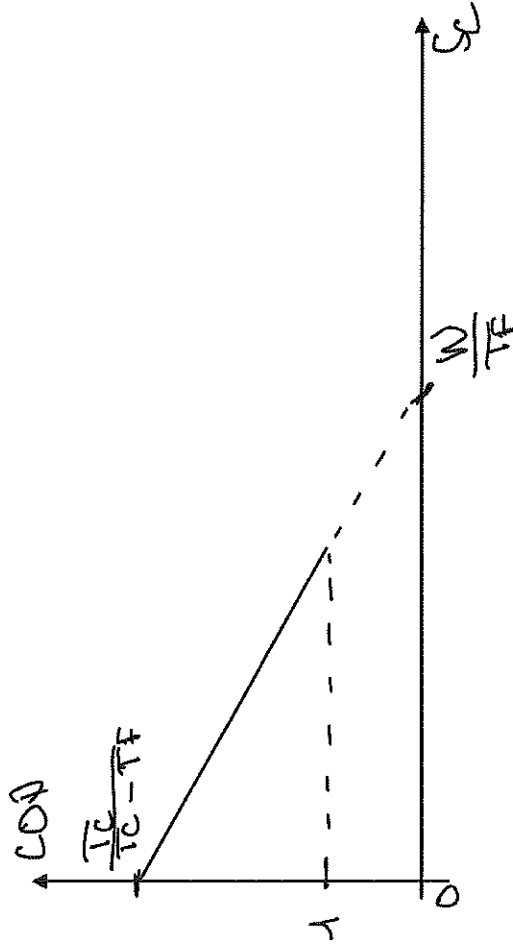
$$(1) - (3) \Rightarrow Q_C \left( \frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_F} \right) = -S_C + \frac{W}{T_F}$$

$$\text{COP} = \frac{1}{1 - \frac{\frac{W}{T_C} - S_C}{\frac{W}{T_F} - S_C}} = \frac{\frac{W}{T_F} - S_C}{\frac{W}{T_F} - \frac{W}{T_C}}$$

$$COP = \frac{W - T_F S_C}{W \left(1 - \frac{T_F}{T_C}\right)}$$

$$COP = \frac{T_C}{T_C - T_F} \left(1 - T_F \frac{S_C}{W}\right)$$

$$COP \geq 3-4$$



$$COP > 1 \quad \text{car } T_C > T_F$$

6-  $S_C = 0$  car réversible.

de COP est maximum (pas de perte)  
moyenne --- )

E.L. 1 m 1 ...

ressie B: tout simplement de se rendre à l'école à l'heure 14 10 h. 4

7- le compresseur échange un travail avec le fluide.

Source froide : air extérieur.

Source chaude : échange d'eau avec l'eau vers le plancher chauffant.

8- La condensation du fluide (refroidissement) va permettre de récupérer de l'énergie thermique de l'extérieur, le compresseur doit donc être mis en contact avec la source chaude. L'échangeur 2 est donc le condenseur.

9- L'évaporation nécessitant de l'énergie, l'évaporateur doit être en contact avec la source froide et constitue l'échangeur 1.

10- le détendeur évalue adiabatique et sans parties mobiles -  $q_{34} = 0$

11- R.S.P la transformation est isenthalpique.

E.L. 1 m 1 ...

11- Si le compresseur est calorigène, la transférence thermique sera être considérée comme adiabatique. En a limite des fréquences, la transférence thermique peut être considérée comme réversible.

12- cf diagramme

13- J'opère le R. des moments.

$$x_6 = \frac{h_6 - h_6'}{h_7 - h_6'}$$

$$h_6' = 169 \text{ kJ.kg}^{-1} \quad h_6 = 474 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$h_7 = 407 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$x_6 = \frac{474 - 169}{407 - 169} = 0,3$$

En accord avec la position du point 6 que se trouve sur l'isotherme 0,3.

14- 1 et adiabatique  $q_4 = 0$

$$w_4 = h_4 - h_1 = 51 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$h_4 = 411 \text{ kJ.kg}^{-1} \quad h_1 = 474 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Condenseur: 2-3

$$w_5 = 0 \quad h_5 - h_4 = q_{25}$$

$$h_5 = h_6 = 474 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$q_{25} = -480 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Evaporateur: 6-1

$$w_6 = 0 \quad q_6 = h_1 - h_6$$

$$q_6 = 179 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

15- La machine permet d'augmenter la puissance et d'éviter l'usage thermique. L'usage de la source froide ce que de plus la pompe 1 est vers la droite d'une augmentation de 195. Or, les autres augmentations identiques, ce sont donc les autres, cela permet d'augmenter le COP. De plus cela permet de laisser que le système sera également élargir de la traverser du compresseur (niveau fonctionnellement, nous de compression --)

$$w_6 \quad w_6 = -\frac{q_{25}}{w_4}$$

$$COP = \frac{330}{54} = 4,5$$

Par chauffage électrique 1 W d'énergie électrique fournir 1 W d'énergie thermique.  
Pour une PAC 1 W d'énergie électrique fournir 4,5 W d'énergie thermique.

Par fournir une puissance thermique de 17,5 kW - consommation 4,5 fois moins d'énergie électrique que un chauffage électrique.

$$17 - COP_{\text{réel}} = 0,9 \times 4,5 = 4,0$$

Soit d' le point en sortie des compresseurs -

$$COP_{\text{réel}} = \frac{h_d - h_s}{h_d - h_1}$$

$$h_d (COP_{\text{réel}} - 1) = COP_{\text{réel}} h_1 - h_s$$

$$h_d = \frac{4 \times 42,1 - 24,1}{4 - 1}$$

$$h_u = 48,1 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$T_u = 80^\circ\text{C}$  (injection directe de l'eau de la source) de l'air de 48,1 kJ.kg<sup>-1</sup>

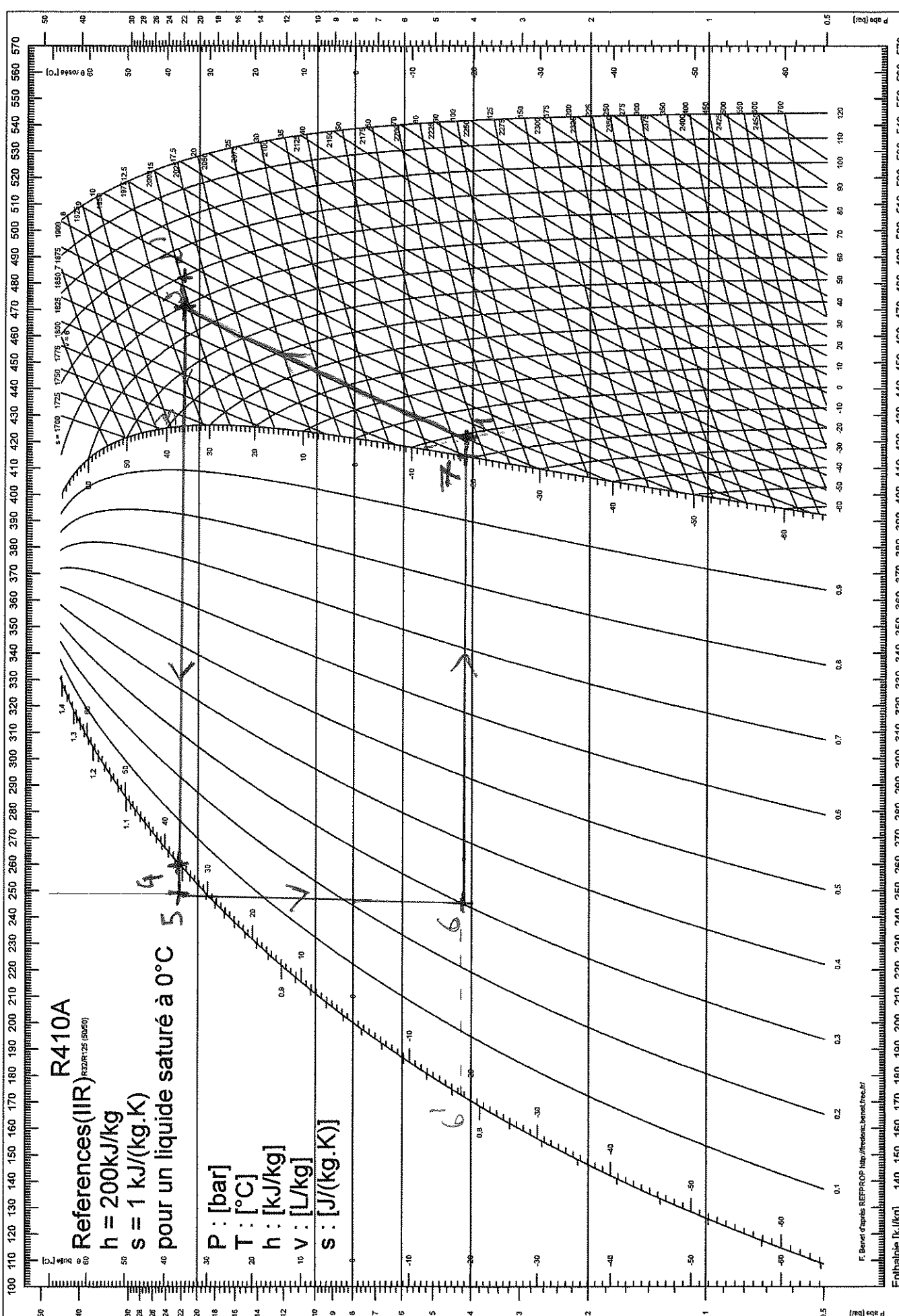
Point C : Remplacement de fluide à 410 K par le fluide à 32.

$$18 - COP' = \frac{h_u - h_s}{h_d - h_1}$$

$$COP' = \frac{58,8 - 25,4}{58,8 - 51,8} = 4,8$$

$$\text{Gain relatif : } \frac{COP' - COP}{COP} = \frac{4,8 - 4,5}{4,5} = 0,07$$

D'où un gain de 7% (par rapport au cas idéal).



F. Benet d'après REFPROP (NIST/REFPROP Team, 2012)