

Auteurs d'une centrale nucléaire (Centrale 1200M)

Étude du circuit primaire

Q1 - Un crayon combustible posé de sa surface latérale

$$S = 2\pi R_4 H = \pi dH. \text{ Soit le module proposé, pour des } N \text{ crayons}$$

exposent cette surface \$S\$ à l'eau : $S_{\text{tot}} = N S = \pi dHN$.

A.N.: (non-demandée) : Soit = $\pi \times 9,50 \times 10^{-3} \times 3,66 \times 10^4 \text{ m}^2$

\$\Rightarrow\$ Soit \$\approx 1527,5 \text{ m}^2\$.

Q2 - On étudie le système transmission de chaleur combustible comprise entre les systèmes coaxiaux de rayons \$r\$ et \$r+d\$ et de hauteur \$H\$.

Le système est supposé inflexible et rose immobile, donc selon la première loi de la thermodynamique : $dU = \delta Q$.

En , en régime stationnaire : $dU = U(r, t+dt) - U(r, t) = 0$.

On en déduit : $\delta Q = \phi(r) |dr - \phi(r+d) |dr + P_0 dr dt$

avec $dr = 2\pi r H dr$.

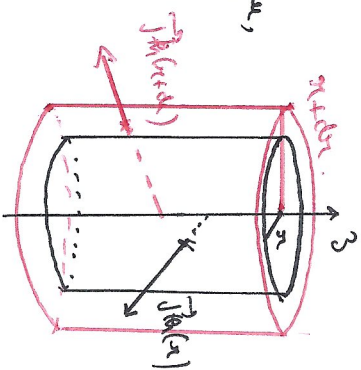
le système étant de forme cylindrique,

\$j_{\text{th}}\$ est radial : $j_{\text{th}} = -\lambda \frac{dT}{dr}$

selon la loi de Fourier.

On $\phi(r) = \int_{r+d}^r j_{\text{th}}(r) \cdot dS = j_{\text{th}}(r) 2\pi r H$

$\phi(r+d) = j_{\text{th}}(r+d) \cdot 2\pi(r+d)H$



car $j_{\text{th}}(r)$ est unitaire sur la surface de rayon \$r\$.

Ainsi : $\delta Q = 0 \Rightarrow [r j_{\text{th}}(r) - (r+d) j_{\text{th}}(r+d)] 2\pi r H dr + P_0 dr dt = C$

\$\Rightarrow -\frac{d}{dr} (r j_{\text{th}}) 2\pi r H dr + P_0 \cdot 2\pi r H dr = 0\$

\$\Rightarrow \frac{d}{dr} (r \frac{dT}{dr}) + \frac{P_0}{\lambda_2} r = 0\$ (1) pour \$r \in [0; R_3]\$

On recherche l'expression demandée en posant $A = \frac{R_0}{\lambda_2}$.

Q3 - \$P_0\$ et \$\lambda_2\$ sont des constantes. On écrit (1) :

$r \frac{dT}{dr} = -\frac{R_0}{2\lambda_2} r^2 + B$ (\$B\$: constante scalaire)

\$\Rightarrow \frac{dT}{dr} = -\frac{R_0}{2\lambda_2} r + \frac{B}{r}\$ (\$r \neq 0\$)

\$\Rightarrow T(r) = -\frac{R_0}{4\lambda_2} r^2 + B \ln(r) + C\$ (\$C\$: constante scalaire)

la température ne pouvant diverger quand \$r \to 0\$: $B = 0$

De plus \$T(R_3) = T_2 \Rightarrow -\frac{R_0}{4\lambda_2} R_3^2 + C = T_2 \Rightarrow C = T_2 + \frac{R_0 R_3^2}{4\lambda_2}\$

On en déduit : $T(r) = \frac{R_0}{4\lambda_2} (R_3^2 - r^2) + T_2$

Q4 - Pour connaître les flux thermiques à l'interface \$r = R_3\$:

$j_{\text{th}}(r = R_3^-) = j_{\text{th}}(r = R_3^+)$ avec $j_{\text{th}} = \frac{dQ}{dS} = h(T_3 - T_2)$

\$\Rightarrow \lambda_2 \frac{dT}{dr} (R_3) = h_2 (T_3 - T_2)\$

Rq : $\frac{dT}{dr} < 0$ et $T_3 - T_2 < 0$ (ce qui est physiquement la conséquence). On en déduit : $-\frac{h_2 R_3}{\lambda_2} = h_2 (T_3 - T_2)$

$$\Rightarrow T_3 = T_2 - \frac{P_{v, \text{tot}} R_3}{2 R_2}$$

avec $P_{v, \text{tot}}$ la puissance volumique totale générée par les N diodes
de semiconducteur : $P_{v, \text{tot}} = \frac{P_1}{\pi R_3^2 H N}$

Annexi : $T_3 = T_2 - \frac{P_1}{2 R_2 \cdot \pi R_3^2 H N}$

Avec $R_3 = \frac{d}{2} - e$: $T_3 = T_2 - \frac{P_1}{2 \pi H N R_2 \left(\frac{d}{2} - e \right)} = T_2 - \frac{P_1}{N R_2 \cdot \pi H (d - 2e)}$

95- La gamme est restreinte au pour thermique différent. En supposant le raisonnement de q2, en l'absence de sources de chaleur :

$$\frac{d}{dx} \left(x \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad \text{pour } x \in [R_3; R_4]$$

$$\Rightarrow \frac{dT}{dx} = \frac{A'}{x} \quad \text{avec } A' = \text{constante réelle}$$

$$\Rightarrow T(x) = A' \ln(x) + B' \quad \text{avec } B' = \text{constante réelle}$$

Or $T(R_4) = T_u \Rightarrow A' \ln(R_4) + B' = T_u \Rightarrow B' = T_u - A' \ln(R_4)$

Donc $T(x) = T_u + A' \ln\left(\frac{x}{R_4}\right)$. Par ailleurs, par continuité de la température dans la garniture :

$$P_1 = \int_{R_3}^{R_4} j_{\text{th}}(x) \cdot 2 \pi x H N dx$$

car toute la puissance générée dans la couche doit traverser la surface latérale des N garnitures de largeur x .

Annexi : $P_1 = -\lambda_3 \frac{dT}{dx} \cdot 2 \pi H N x = -\lambda_3 A' \frac{2 \text{Sect} \cdot x \pi}{d}$

$$\Rightarrow P_1 = -\lambda_3 A' \frac{\text{Sect}}{R_4} \Rightarrow A' = -\frac{P_1}{\lambda_3 \text{Sect}} \frac{R_4}{x}$$

Annexi : $T(x) = T_u - \frac{P_1}{\lambda_3 \text{Sect}} \ln\left(\frac{x}{R_4}\right)$

96- Par continuité de la température en R_4 :

$$P_1 = R_{th} \cdot \text{Sect} \cdot (T_u - T_5)$$

$$\Rightarrow T_u = T_5 + \frac{P_1}{R_{th} \text{Sect}}$$

A.N. : $T_u - T_5 = \frac{2,776 \times 10^9}{25 \times 10^3 \times x} = 24,5 \text{ K}$

donc $T_u = 322,5^\circ \text{C}$ avec $T_5 = 303^\circ \text{C}$.

$T(R_3) = T_3 = T_u - \frac{P_1}{\lambda_3 \text{Sect}} \ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right)$ avec $R_3 = R_4 - e = \frac{d}{2} - e$

$$\Rightarrow T_3 = T_u - \frac{P_1}{\lambda_3 \text{Sect}} \ln\left(1 - \frac{e}{R_4}\right)$$

A.N. : $T_3 - T_u = -\frac{2,776 \times 10^9}{16} \times \frac{3,5 \times 10^{-3}}{2 \times 4577,5} \ln\left(1 - \frac{0,60}{9,5/2}\right)$

$$\Rightarrow T_3 \approx 352,1^\circ \text{C} \quad (T_3 - T_u = 29,6 \text{ K})$$

$$T_2 = T_3 + \frac{P_1}{N R_2 \pi H (d - 2e)}$$

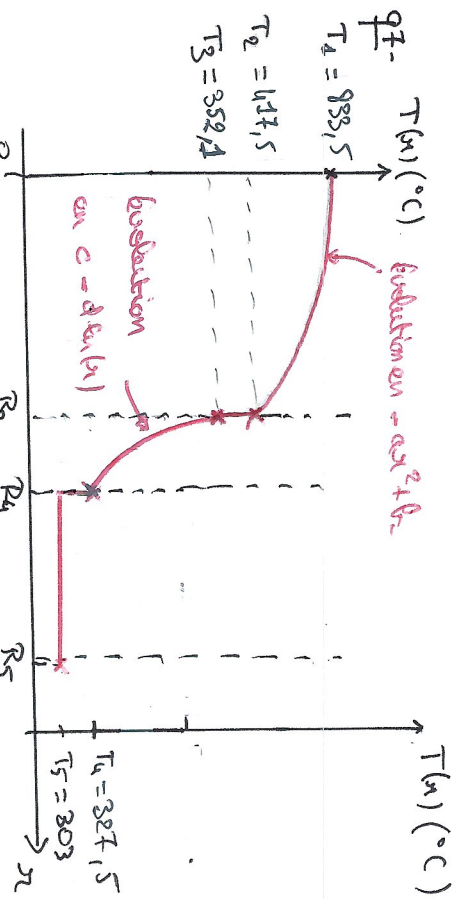
$$\Rightarrow T_2 - T_3 = \frac{2,776 \times 10^9}{42614,8 \times 10 \times 10^3 \times \pi \times 3,66 \times (9,5 - 0,6) \times 10^{-3}} = 65,4 \text{ K}$$

$$\Rightarrow T_2 \approx 417,5^\circ\text{C}$$

$$T_2 = T_{\text{air}} (g=0) = \frac{P_V}{4\lambda_2} R_3^2 + T_2 \quad \text{avec } R_V = \frac{R_1}{N \cdot \pi R_3^2 H}$$

$$\Rightarrow T_2 - T_2 = \frac{R_1}{4\lambda_2 N \pi R_3^2 H} R_3^2 = \frac{R_1}{4\pi \lambda_2 H N}$$

$$A.N.: \quad T_1 - T_2 = \frac{2,776 \times 10^9}{4\pi \times 3,5 \times 3,66} \approx 416 \text{ K} \Rightarrow T_1 \approx 833,5^\circ\text{C}$$



98 - Si la puissance est déficiente, il y a des dangers pour le circuit. Pour ce voltage, on n'a pas de refroidissement du combustible, qui fait voler le réacteur et fondre, entraînant au mieux un arrêt du réacteur, au pire un engorgement et un risque majeur de danger nucléaire.

• Pour éviter une panne plus importante, on peut envisager le contact de l'eau du circuit primaire avec une partie de l'eau froide du circuit secondaire (solution évitée pour empêcher la contamination de l'eau du circuit secondaire en cas d'accident nucléaire), ou utiliser un autre fluide que l'eau du secondaire de vaporisation pour l'eau (huile).

99 - On effectue un bilan enthalpique sur une tranche de l'eau liquide d'épaisseur dy en contact au contact du combustible pendant dt . Le système étant ouvert, on définit :

• $\Sigma_1 (H)$: le volume de contrôle entre z et $z+dy$, posé avant

l'énergie thermique $Q = \rho_V dt \pi R_4^2 dz$ depuis le combustible ;

• Σ_2 : masse d'eau entrante dans Σ_0 entre t et $t+dt$;

• Σ_3 : restant

de bilan enthalpique donne, en négligeant les variations d'énergie mécanique et en l'absence de fluxes molaire :

$$H_3 - H_2 = Q = \rho_V \pi R_4^2 dz dt$$

$$\Rightarrow \rho_V \pi R_4^2 (T_3 + dy) - \rho_V \pi R_4^2 T_3 = \rho_V \pi R_4^2 dz dt$$

Or $\rho_V \pi R_4^2 dz dt$ par définition du débit massique, comme un régime stationnaire. d'après :

$$\rho_V \pi R_4^2 (T_3 + dy) - \rho_V \pi R_4^2 T_3 = \rho_V \pi R_4^2 dz dt$$

910 - On définit l'expression précédente :

$$\rho_V \pi R_4^2 \frac{dT}{dz} dz = \rho_V \pi R_4^2 \frac{\pi R_3^2}{H} T dz$$

$$\Rightarrow \frac{dT}{dz} = \frac{\rho_V \pi R_4^2}{\rho_V \pi R_3^2} \frac{\pi R_3^2}{H} T$$

$$\Rightarrow dT = \frac{\rho_V \pi R_4^2}{\rho_V \pi R_3^2} \frac{\pi R_3^2}{H} T dz$$

Rq : flux positif du 1er point à l'autre

On en déduit, par intégration entre 0 et H :

$$\int_{T(H)=T_3}^{T(H)=T_5} dt = \frac{2\alpha H R_a^2}{c_s D_m} \int_0^H \sin\left(\frac{\pi y}{H}\right) dy$$

$$T(0) = T_e$$

$$\Rightarrow T_5 - T_e = \frac{2\alpha H R_a^2}{c_s D_m} \left[\cos\left(\frac{\pi x_0}{H}\right) - \cos\left(\frac{\pi x H}{H}\right) \right]$$

$$\Rightarrow T_5 - T_e = \frac{2\alpha H R_a^2}{c_s D_m} \quad (> 0, \text{ comme attendu}).$$

On obtient de même : $T(y) = -\frac{2\alpha H R_a^2}{c_s D_m} \cos\left(\frac{\pi y}{H}\right) + \alpha$ (K: cste R)

Or $T(0) = T_e$ et $\frac{2\alpha H R_a^2}{c_s D_m} = \frac{T_5 - T_e}{2}$, donc : $\alpha = T_e + \frac{T_5 - T_e}{2}$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{T_e + T_5}{2}$$

$$T(y) = \frac{T_e + T_5}{2} + \frac{T_e - T_5}{2} \cos\left(\frac{\pi y}{H}\right)$$

q11 - Soit la tranche de fluide en écoulement entre y et $y+dy$.

En régime stationnaire, la flux qui s'écoule à l'égale à la puissance thermique de ce régime par la section de finion dans le volume $dt = TR_a^2 dy$. Ainsi :

$$\phi_{cc} = \int_0^{2\pi} \int_0^H \left(\frac{\pi y}{H}\right) TR_a^2 dy$$

$$\Rightarrow \phi_{cc} = 2\pi R_a^2 \int_0^H (T(y) - T_e) dy = \int_0^H \int_0^{2\pi} \left(\frac{\pi y}{H}\right) TR_a^2 dy$$

$$\Rightarrow T_p(y) - T_e = \frac{2\alpha H R_a^2}{2R_a^2} \sin\left(\frac{\pi y}{H}\right)$$

$$\Rightarrow T_H(y) = \frac{T_e + T_5}{2} + \frac{T_e - T_5}{2} \cos\left(\frac{\pi y}{H}\right) + \frac{2\alpha H R_a^2}{2R_a^2} \sin\left(\frac{\pi y}{H}\right)$$

On se donne q_{10} , $P_0 = \frac{T_5 - T_e}{2} \times \frac{c_s D_m}{H R_a^2}$, donc :

$$T_H(y) = \frac{T_e + T_5}{2} + \frac{T_e - T_5}{2} \cos\left(\frac{\pi y}{H}\right) + \frac{T_5 - T_e}{2} \times \frac{c_s D_m}{2R_a^2 H R_a^2} \sin\left(\frac{\pi y}{H}\right)$$

$$\Rightarrow T_H(y) - T_e = \frac{T_5 - T_e}{2} + \frac{T_5 - T_e}{2} \cos\left(\frac{\pi y}{H}\right) + \frac{T_5 - T_e}{2} \times \frac{c_s D_m}{2R_a^2 H R_a^2} \sin\left(\frac{\pi y}{H}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{T_H(y) - T_e}{T_5 - T_e} = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi y}{H}\right) + \frac{c_s D_m}{2R_a^2 H R_a^2} \sin\left(\frac{\pi y}{H}\right) \right]$$

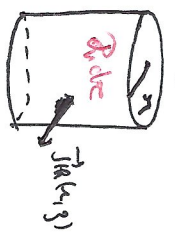
On substitue la valeur de B dans l'équation précédente : $B = -1$

$$dt = \frac{c_s D_m}{2R_a^2 H R_a^2}$$

q12 - On considère la tranche de combustible située en r et de hauteur dr

de flux thermiquement la surface $dS = 2\pi r dr$ est égale, en régime stationnaire, à la puissance thermique dans le volume $dt = TR_a^2 dy$. Ainsi :

$$P_r dt = \int_0^{2\pi} \int_0^H \vec{j}_H \cdot d\vec{S} = -\lambda_e \frac{\partial T}{\partial r} (r, z) \cdot 2\pi r dz$$



$$\Rightarrow \frac{\partial T}{\partial r} (r, z) = -\frac{P_r dt}{2\pi r dz}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial T}{\partial r} (r, z) = -\frac{P_r dt}{2\pi r dz}$$

$$\Rightarrow T(r, z) = -\frac{P_r dt}{4\lambda_e} \left(\frac{r^2}{2} + \beta(z) \right) + \text{fonction arbitraire}$$

On a $T(R_{a1}, \beta) = T_h(\beta) + \frac{D_0}{4\lambda_2} \sin\left(\frac{\pi\beta}{H}\right) R_{a1}^2$.

Annexi: $T_e(\alpha, \beta) = \frac{D_0 R_{a1}^2}{4\lambda_2} \left[1 - \frac{\alpha^2}{R_{a1}^2} \right] \sin\left(\frac{\pi\beta}{H}\right) + T_h(\beta)$

d'Alaïde de q_{10} :

$$\frac{T_e(\alpha, \beta) - T_e}{T_s - T_e} = \frac{D_0 R_{a1}^2}{4\lambda_2 \alpha^2 (1 - \frac{\alpha^2}{R_{a1}^2})} \left[1 - \frac{\alpha^2}{R_{a1}^2} \right] \sin\left(\frac{\pi\beta}{H}\right) + \frac{T_h(\beta) - T_e}{T_s - T_e}$$

$$\Rightarrow \frac{T_e(\alpha, \beta) - T_e}{T_s - T_e} = \frac{D_0 R_{a1}^2}{4\lambda_2 \alpha^2 (1 - \frac{\alpha^2}{R_{a1}^2})} \left[1 - \frac{\alpha^2}{R_{a1}^2} \right] \sin\left(\frac{\pi\beta}{H}\right) + \frac{T_h(\beta) - T_e}{T_s - T_e} + \frac{S_{Dm} \sin\left(\frac{\pi\beta}{H}\right)}{4k_c H \lambda_2}$$

$$\Rightarrow \frac{T_e(\alpha, \beta) - T_e}{T_s - T_e} = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi\beta}{H}\right) \right] + \left[\frac{S_{Dm}}{4k_c H \lambda_2} + \frac{D_0 R_{a1}^2}{(S - \beta) \lambda_2} \left(1 - \frac{\alpha^2}{R_{a1}^2} \right) \right] \sin\left(\frac{\pi\beta}{H}\right)$$

On retrouve la même chose dans le cas sans point $D = -1$, $E = \frac{S_{Dm}}{4k_c H \lambda_2}$ et

$$F = \frac{D_0 R_{a1}^2}{4\lambda_2 (R_e - T_e)} = \frac{S_{Dm}}{8H \lambda_2}$$

q13 - Pour $\alpha = 0$: $\frac{T_e(0, \beta) - T_e}{T_s - T_e} = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi\beta}{H}\right) \right] + \left[\frac{S_{Dm}}{4k_c H \lambda_2} + \frac{S_{Dm}}{8H \lambda_2} \right] \sin\left(\frac{\pi\beta}{H}\right)$

$$\Rightarrow T_e(0, \beta) = T_e + \frac{T_s - T_e}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi\beta}{H}\right) \right] + (T_s - T_e) \frac{S_{Dm}}{4H} \left[\frac{1}{k_c R_{a1}} + \frac{1}{2\lambda_2} \right] \sin\left(\frac{\pi\beta}{H}\right)$$

q14 - On calcule $\frac{dT_e}{d\beta} = 0 \Rightarrow \frac{T_s - T_e}{2} \times \frac{\pi}{H} \sin\left(\frac{\pi\beta}{H}\right) + (T_s - T_e) \frac{S_{Dm}}{4H} \left[\frac{1}{k_c R_{a1}} + \frac{1}{2\lambda_2} \right] \cos\left(\frac{\pi\beta}{H}\right) = 0$

$$\Rightarrow \sin\left(\frac{\pi\beta}{H}\right) = - \frac{S_{Dm}}{2H} \left[\frac{1}{k_c R_{a1}} + \frac{1}{2\lambda_2} \right] \cos\left(\frac{\pi\beta}{H}\right)$$

$$\Rightarrow \tan\left(\frac{\pi\beta}{H}\right) = - \frac{S_{Dm}}{2H} \left[\frac{1}{k_c R_{a1}} + \frac{1}{2\lambda_2} \right] \quad \text{avec } 0 \leq \beta \leq H$$

On a $\tan(\alpha) < 0$ pour $\alpha \in]\frac{\pi}{2}, \pi[$ ($+\pi$) si $\alpha > 0$ ($\beta \in \mathbb{Z}$).

$$\beta_m = \frac{H}{\pi} \left[\arctan\left(-\frac{S_{Dm}}{2H} \left[\frac{1}{k_c R_{a1}} + \frac{1}{2\lambda_2} \right] \right) + \pi \right]$$

A.N.: $\beta_m = \frac{3,66}{\pi} \arctan\left(-\frac{5750 \times 0,30}{2 \times 3,66} \left[\frac{1}{33 \times 10^3 \times \frac{9,5 \times 10^{-3}}{2 \times 3,15}} + \frac{1}{2 \times 3,15} \right] \right)$

$$\Rightarrow \beta_m \approx 1,97 \text{ m (est proche de } \frac{H}{2} \text{)}$$

et $T_e(0, \beta_m) \approx 370^\circ \text{C}$. $T_e(0, \beta_m) < T_{\text{fus}}$: le critère de nécessité en température est respecté.

q15 - Pour $\beta \ll H$: $\cos\left(\frac{\pi\beta}{H}\right) \approx 1$ et $\sin\left(\frac{\pi\beta}{H}\right) \approx \frac{\pi\beta}{H}$.

On en déduit : $T_p(\beta) \approx \frac{T_e + T_s}{2} + \frac{T_e - T_s}{2} + \frac{T_s - T_e}{2} \times \frac{S_{Dm}}{2k_c H R_{a1}} \times \frac{\pi\beta}{H}$

$$\Rightarrow T_p(\beta) = T_e + \frac{T_s - T_e}{2} \times \frac{S_{Dm}}{2k_c H R_{a1}} \beta = a + b\beta$$

$T_e(\beta)$ évolue de manière affine avec β . Quand $\beta = 0$, on retrouve $T_p(0) = T_e = 284^\circ \text{C}$ comme montré par le graphique.

On remarque que certains gas d'eau se séparent au contact du combustible nucléaire, ce qui entraîne une augmentation de la température de la phase au fur et à mesure de l'écartement.

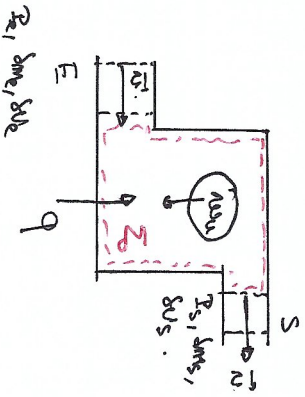
Elle atteint un maximum vers 2,5m. Il y a compétition entre l'eau qui se sépare quand β augmente et puissance émise

maximale en $\beta \approx \frac{H}{2} (\beta_m)$, ce qui conduit à son maximum au centre de β_m .

À 3,66m, on retrouve $T_s = 322^\circ \text{C}$.

$T_p < 325^\circ \text{C}$ $\forall \beta \in [0; H]$: la vitesse de réaction "l'eau ne se vaporise pas" est respectée ($T_{\text{vap}}(325^\circ \text{C}) = 325^\circ \text{C}$).

Étude du circuit pédonculaire



916-

On considère les systèmes :

- Z_1 (1) : volume de contrôle S_1 contenant la floue présente dans la machine ;
- Z_2 : masse S_m de fluide entrant dans la machine entre t et $t+dt$;
- Z_3 : masse S_m entrant

On définit le système pompe $Z^*(t)$ tel que $Z^*(t) = Z_0(t) \cup Z_2$ et $Z^*(t+dt) = Z_0(t+dt) \cup Z_3$. En application du premier principe de la thermodynamique à Z^* , en négligeant les variations d'énergie mécanique :

$$dU_{Z^*} = S_1 u_1 + S_0 u_0 + S_m u_m$$

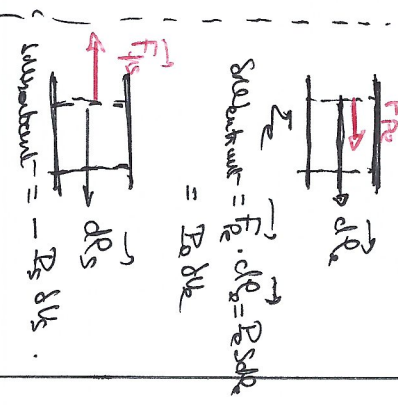
On obtient $dU_{Z^*} = U_{Z^*}(t+dt) - U_{Z^*}(t) = U_{Z_0}(t+dt) - U_{Z_0}(t) + U_{Z_2} - U_{Z_3}$ avec $U_{Z_0}(t+dt) = U_{Z_0}(t)$ en écoulement stationnaire, et $U_{Z_2} - U_{Z_3}$ l'énergie interne des systèmes Z_2 .

On en déduit : $U_{Z_2} - U_{Z_3} = S_1 u_1 + S_0 u_0 + S_m u_m$. Travail des forces pressurantes : $S_1 u_1 = S_1 u_1 + S_0 u_0 + S_m u_m$

Donc $(U_{Z_2} + P_2 S_2) - (U_{Z_3} + P_3 S_3) = S_1 u_1 + S_0 u_0$

En régime stationnaire, $S_1 u_1 = S_m u_m = S_m (S_m dt)$

donc :



$$P_{Z_2} - P_{Z_3} = \frac{S_1 u_1}{S_m} + \frac{S_0 u_0}{S_m}$$

$$\Rightarrow P_2 - P_3 = \rho u_1 + \rho u_0$$

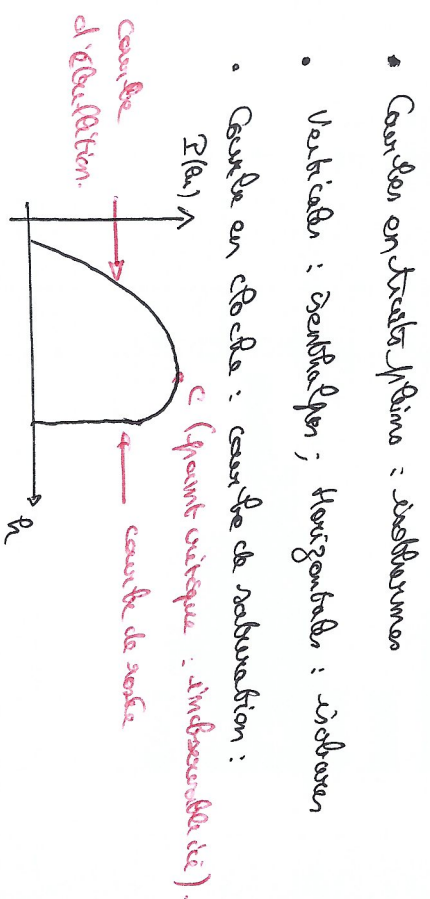
917- R' eau liquide est une phase incompressible. La pompe fournit de manière isentropique :

$$\Delta P_{0 \rightarrow 1} = S_{eau} P_n \left(\frac{T_1}{T_0} \right) = 0 \Rightarrow T_1 = T_0$$

En négligeant la travail utile de la pompe : $W_{0 \rightarrow 1} = 0$ et comme $P_{0 \rightarrow 1} = 0$: $\Delta P_{0 \rightarrow 1} = P_1 - P_0 = 0 \Rightarrow P_1 = P_0$. La transformation $0 \rightarrow 1$ est donc à la fois isentropique, isobare et isothermique.

Une transformation isentropique d'une phase liquide (incompressible) est donc une verticale dans le diagramme des forces.

918- Courbes en pointillés : isothermiques



Cycle : p. diagramme.

919 - Selon la troisième des moments appliquée en (3) :

$$x_{1,3} = \frac{h_3 - h_{air}(29^\circ\text{C})}{h_{vap}(29^\circ\text{C}) - h_{air}(29^\circ\text{C})} =$$

$$\Rightarrow x_{1,3} = \frac{6,61 - 0,42}{8,47 - 0,42} \approx 0,78$$

$$\text{car } h_3 = h_{e'} = 6,68 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

On en déduit : $x_{1,3} = \frac{h_3 - h_{air}(29^\circ\text{C})}{h_{vap}(29^\circ\text{C}) - h_{air}(29^\circ\text{C})}$

$$\Rightarrow h_3 = h_{air}(29^\circ\text{C}) + x_{1,3} (h_{vap}(29^\circ\text{C}) - h_{air}(29^\circ\text{C}))$$

A.N. : $h_3 = 121 + 0,78 \cdot (2554 - 121) \approx 2019 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Pq: cette valeur est cohérente avec celle du diagramme.

920 - Efficacité : $\eta = \left| \frac{\text{utile}}{q_{cv}} \right|$ avec q_{cv} la steam fait

Provenant dans le générateur de vapeur et dans le strouard inverse que échange avec la machine.

Tout dans calorifuge : $\Delta h_{1 \rightarrow 3} = \text{utile} + q_{2 \rightarrow 3} = \text{utile}$ car $q_{2 \rightarrow 3} = 0$

Donc $\text{utile} = h_3 - h_{e'}$

• Générateur de vapeur : pas de réaction métrén, donc $\text{utile} = 0$

Annex : $q_{cv} = \Delta h_{1 \rightarrow 2} = h_2 - h_1$

On en déduit : $\eta = \left| \frac{h_3 - h_{e'}}{h_2 - h_1} \right| \Rightarrow \eta = \left| \frac{2019 - 3394}{3394 - 121} \right| \approx 0,42$

921 - Pour une machine de Carnot :

$$\eta_c = -\frac{w}{Q_c}$$

avec Q_c : Steam fait le moins que de la machine à vapeur

• w : travail dérivé par le moteur

• Sur un cycle : $\Delta U = 0$

$$\Rightarrow Q_c + Q_h + w = 0 \Rightarrow w = -(Q_c + Q_h)$$

Donc : $\eta_c = 1 + \frac{Q_h}{Q_c}$

• $\Delta S = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_h}{T_h} = 0$ (cycle réversible)

Donc $\eta_c = 1 + \frac{Q_h}{Q_c}$ et $\frac{Q_h}{Q_c} = -\frac{T_c}{T_h}$

$$\Rightarrow \eta_c = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

A.N. : $T_c = 550^\circ\text{C} = 773\text{K}$ et $T_h = 29^\circ\text{C} = 302\text{K}$

$$\Rightarrow \eta_c = 1 - \frac{302}{773} \approx 0,61$$

Le cycle de Carnot est exempt d'irréversibilités (pas de frottements, pas de pertes dans les systèmes mécaniques, pas de diffusion thermique entre fluides et composants...). Ceci n'est jamais réalisé en pratique.

922. La mesure d'efficacité est calculée à partir des transformations :

• $1 \rightarrow 2'$: $q_{ev} = R_{2'} - R_1$

• $2' \rightarrow u$: $w_{turb,1} = R_u - R_{2'}$

• $u \rightarrow u'$: $q_{condens,1} = R_{u'} - R_u$

• $u' \rightarrow 5$: $w_{turb,2} = R_5 - R_{u'}$

Année : $\eta' = \frac{w_{turb,1} + w_{turb,2}}{q_{ev} + q_{condens,1}} = \frac{R_5 + R_u - (R_{2'} + R_{u'})}{(R_{2'} + R_{u'}) - (R_u + R_1)}$

A.N. : $\eta' = \frac{2220 + 3020 - (3391 + 3450)}{3391 + 3450 - (121 + 3020)}$

$\Rightarrow \eta' \approx 0,43$

d'efficacité est donc légèrement augmentée. On remarque par ailleurs

que $\eta_{1,5} = \frac{R_5 - R_{1q}(29^\circ C)}{R_{1q}(29^\circ C) - R_{1q}(29^\circ C)} = \frac{2220 - 121}{2554 - 121} \approx 0,86 > \eta_{1,3}$.

On voit cependant bien que $\eta_{1,5} \approx 1$ déduit dans l'énoncé...

923. d'efficacité du cycle est calculée à partir des travaux utiles développés par les turbines, HP et BP liées à l'alternateur et des échanges nécessaires pour chauffer ou refroidir le fluide.

* d'eau se refroidit et se vaporise dans les échangeurs alimentés.

Dans ces échangeurs, elle s'échauffe avec un débit $\dot{m}_m = 5 \text{ kg/s}$ à R^{-1} (température) et perd de cette énergie thermique d'entrée

$R_e = 911,785 \cdot R_g^{-1}$ et de sortie $R_s = 2788,425 \cdot R_g^{-1}$.

On en déduit : $P_{ev} = \dot{m}_m \times (R_s - R_e)$ (1^{er} principe énergétique).

$\Rightarrow P_{ev} = \frac{5442,1 \times 10^3}{3600} \times (2788,4 - 911,7)$

$\Rightarrow P_{ev} \approx 2,78 \times 10^6 \text{ W}$.

Il doit donc y avoir la puissance du réservoir - avec P_{ev} pour :

~~Non, d. Pour cela $P_{re} = \dot{m}_m \times (R_s - R_e)$ Pour cela $P_{re} = 403,7 \times 10^3 \times \frac{1}{3600} \times 2797,1 \approx 3,13 \times 10^5 \text{ W}$.~~

* La turbine HP fournit la puissance :

$P_{HP} = \dot{m}_m \text{ admission} \times h_{admission} - (\dot{m}_m R_s + \dot{m}_m R_g + \dot{m}_m R_u + \dot{m}_m R_{u'} + \dot{m}_m R_{2'})$

et d'on voit bien que $\dot{m}_m \text{ admission} = \dot{m}_m + \dot{m}_m + \dot{m}_m + \dot{m}_m$

Les valeurs admises de réservoir - avec P_{ev} pour provient de l'équilibre c'est ici que l'on prend en compte la perte d'efficacité due au réservoir.

$P_{HP} = 5001,9 \times \frac{4000}{3600} \times 2797,1 - (24,3 \times 2682,5 + 20,4 \times 2682,6 + 102,1 \times 2582,8 + 477,1 \times 2582,8) \times \frac{4000}{3600}$

$\Rightarrow P_{HP} \approx 3,04 \times 10^5 \text{ W}$.

* La machine BP fournit la puissance :

$$P_{GE} = P_{m, \text{valin, BP}} \times P_{\text{actin, BP}} + (P_{m_3} R_3 + P_{m_2} R_2 + P_{m_1} R_1 + P_{m, \text{cond}} A_{\text{cond}})$$

$$A.N.: P_{GE} = [3704,0 \times 2370,4 - (284,4 \times 2734,5 + 235,4 \times 2538,9 + 4342 \times 2377,8 + 3053,0 \times 2242,2)] \times \frac{1000}{3600}$$

$$\Rightarrow P_{GE} \approx 6,87 \times 10^5 \text{ W}$$

La puissance disponible aux bornes de l'alternateur est donc :

$$P = P_{HE} + P_{GE} = (3,01 + 6,87) \times 10^5 = 9,88 \times 10^5 \text{ W}$$

soit 988 MW.

$$\text{L'efficacité du cycle est } \eta_{\text{cyc}} = \frac{P}{P_{\text{ev}}} = \frac{9,88 \times 10^5}{2,78 \times 10^6} \approx 0,35$$

La puissance réellement disponible n'est que de 960 MW, probablement à cause de pertes d'énergie liées au fonctionnement réel de la centrale

(pertes dans les frottements, les pertes dans les transformateurs, par exemple).

Par ailleurs, l'alternateur possède aussi un rendement inférieur à 1

(conversion mécanique - électrique non-ideale).

Annexe : diagramme des frigorigères du fluide R718

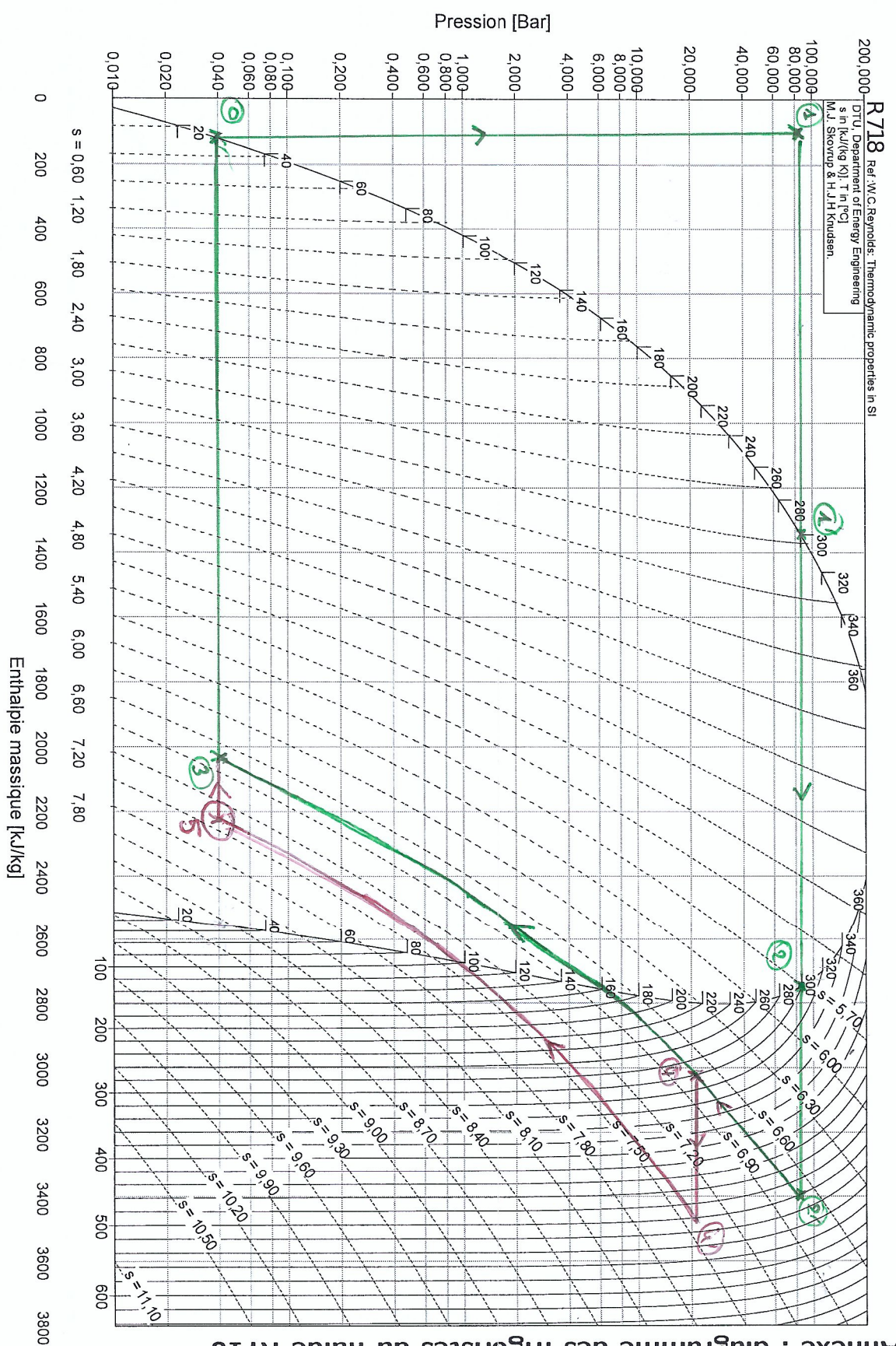


Diagramme des frigorigères.
La pression est exprimée en bar, l'entropie massique en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, l'enthalpie massique en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ et la température en $^{\circ}\text{C}$.

Étude d'un minéral d'uranium

Étude du dioxyde d'uranium

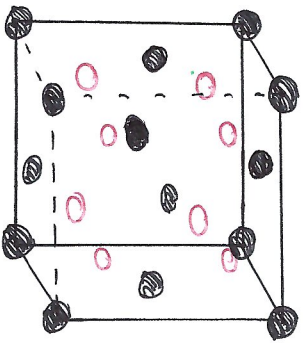
Q1- On calcule : $M_u = 0,9927 M_{U,238} + 0,0072 M_{U,235} + 0,0005 M_{U,234}$

On suppose que $M_{U,238} = x \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. Alors :

$$M_u = 0,9927 \times 238 + 0,0072 \times 235 + 0,0005 \times 234 \approx 237,97 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Q2 : Il faudrait ici ne supposer que la masse molaire d'un isotope vaut la somme de sa masse atomique et de sa masse électronique, on conserve

$$M_u \approx 238 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$



● : U^{4+}
○ : O^{2-}
Les ions U^{4+} sont situés aux centres des cubes d'arête a .

Q3- Il y a contact entre anions et cations le long de la diagonale des cubes. Alors : $r_U + r_O = \frac{a\sqrt{3}}{4}$

$$\Rightarrow a = \frac{4}{\sqrt{3}} (r_U + r_O)$$

A.N.: $a = \frac{4}{\sqrt{3}} (110 + 120) \approx 534 \text{ pm}$

Q4: on ne perdent le contact qui existe cation U^{4+} la long d'une face du cube, $a = \frac{4r_U}{\sqrt{2}} = \frac{4 \times 110}{\sqrt{2}} = 344 \text{ pm}$. La taille d'un site tétraédrique est donc $r_T = \frac{\sqrt{3}}{4} a - r_U = \frac{\sqrt{3}}{4} \times 344 - 110 \approx 25$ tout peut pour occuper O^{2-} . Cette hypothèse est donc rejetée.

Q4- Ion U^{4+} : $Z_+ = 8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$

Ion O^{2-} : $Z_- = 8 \times 1 = 8$

Coordonnées O^{2-} U^{4+} : 4, car O^{2-} est sur une site tétraédrique. U^{4+} est entouré de 8 sites tétraédriques : $4 \times \frac{1}{8} \pi$ donc 8.

Compacité : $C = \frac{\text{Volume occupé par les atomes dans une maille}}{\text{Volume de la maille}}$

$$\Rightarrow C = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi r_U^3 + 8 \times \frac{4}{3} \pi r_O^3}{a^3}$$

$$\Rightarrow C = \frac{16\pi}{3} \left(\frac{r_U^3 + 2r_O^3}{a^3} \right) \quad \text{A.N.: } C \approx 0,54$$

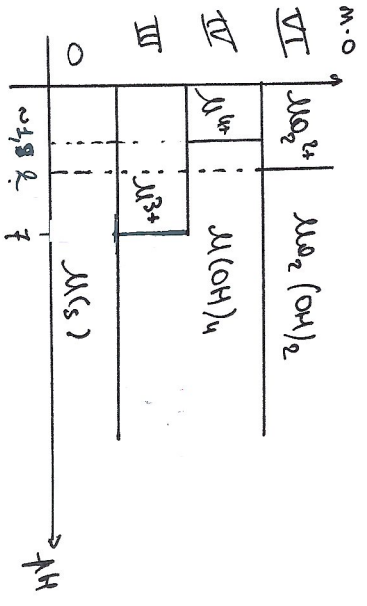
Q5- Masse volumique que : $\rho = \frac{N \times M_{\text{mol}}}{a^3}$ avec N la population en UO_2 : $N = 4$ ici. Or $M_{UO_2} = \frac{M_u}{M_A}$ avec M_A la masse d'atome d'oxygène. Alors :

$$\rho = \frac{N M_u}{M_A a^3}$$

A.N.: $\rho = \frac{4 \times (238 + 2 \times 16)}{6,08 \times 10^{23} \times (534 \times 10^{-12})^3} \approx 12 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
soit $12 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (densité de 12).

Détermination du faciès de l'uranium

96 - Diagramme simplifié :



m.o. (U) = 0 ; m.o. (U^{III}) = +III ; m.o. (U^{IV}) = +IV
 m.o. (U | UO₂²⁺) = +VII ; m.o. (U | U(OH)₃) = +III ; m.o. (U | U(OH)₄) = +IV
 m.o. (UO₂(OH)₂) = +VII

Les formes U(OH)₃(s), U(OH)₄(s) et UO₂(OH)₂ sont issues de la précipitation des cations U³⁺, U⁴⁺ et UO₂²⁺ par les ions HO⁻ présents à pH suffisamment élevé. Leur dominance de prédominance est donc à pH plus élevé que leurs cations associés.

On en déduit :

- A : UO₂²⁺ ; B : UO₂(OH)₂
- C : U^{IV} ; D : U(OH)₄
- E : U^{III}(aq)
- F : U(s) (aq)

On remarque que la forme U(OH)₃(s) ne s'observe pas ici. Il n'y a pas de frontière verticale marquant la fin du domaine d'existence de U³⁺(aq). U(OH)₃(s) se détermine on U(s) et U(OH)₄(s).

97 - Pointe UO₂²⁺ | U^{IV} : UO₂²⁺ + 4H⁺ + 2e⁻ = U^{IV} + 2H₂O

$$E(UO_2^{2+} | U^{IV}) = E^0(UO_2^{2+} | U^{IV}) + \frac{0,05}{2} \log \left(\frac{[H^+]^4 [UO_2^{2+}]}{[U^{IV}] (C^0)^4} \right)$$

On à la frontière [UO₂²⁺] = [U^{IV}] = 1 mol. L⁻¹, donc :

$$E(UO_2^{2+} | U^{IV}) = E^0(UO_2^{2+} | U^{IV}) + 0,05 \log \left(\frac{[H^+]^4}{(C^0)^4} \right) = E^0(UO_2^{2+} | U^{IV}) - 0,12 \text{ pH}$$

car pH = $-\log \left(\frac{[H^+]}{C^0} \right)$.

La pente est donc de -0,12 V (par unité de pH).

98 - Entre A et B : UO₂²⁺ | UO₂(OH)₂(s) :



$$K_s(UO_2(OH)_2(s)) = \frac{[UO_2^{2+}]_{aq} [HO^-]_{aq}^2}{(C^0)^3 \alpha(UO_2(OH)_2(s))_{aq}}$$

Or $\alpha(UO_2(OH)_2(s))_{aq} = 1$ et à la frontière, [UO₂²⁺]_{aq} = 1 mol. L⁻¹.

Ainsi : $K_s(UO_2(OH)_2(s)) = \frac{[HO^-]_{aq}^2}{(C^0)^2} = 10^{-24}$ (cf. données).

On en déduit : [HO⁻]_{aq} = 10⁻¹² mol. L⁻¹

et $[H_3O^+]_{aq} = \frac{(C^0)^3 K_s}{[HO^-]_{aq}} = 10^{-2} \text{ mol. L}^{-1}$

Donc pH(HB) = $-\log \left(\frac{[H_3O^+]_{aq}}{C^0} \right) = 2$.

Entre C et D : U^{IV} | U(OH)₄(s) : U^{IV}(aq) + 4HO⁻(aq) = U(OH)₄(s)

$$K_s(U(OH)_4(s)) = \frac{[U^{IV}]_{aq} [HO^-]_{aq}^4}{(C^0)^5 \alpha(U(OH)_4(s))} = \frac{[HO^-]_{aq}^4}{(C^0)^4}$$

pour un même système que précédemment.

Ammoniac: $[H_3O^+]_{aq} = 10^{-4.9} \cdot (CO)_4 \Rightarrow [H_3O^+]_{aq} = 10^{-\frac{4.9}{4}} \text{ mol} \cdot L^{-1}$

D'où $[H_3O^+]_{aq} = \frac{(CO)_4}{[H_3O^+]_{aq}} = 10^{-4.9} \times 10^{\frac{4.9}{4}} = 10^{-7.14} \text{ mol} \cdot L^{-1}$

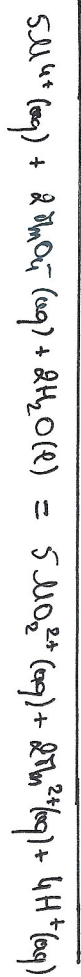
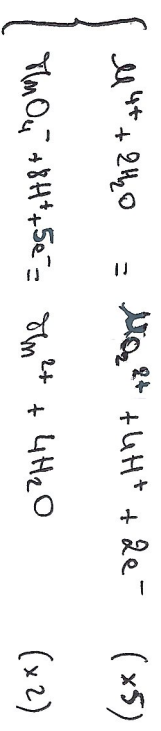
et $pH(CO) = -\log\left(\frac{[H_3O^+]_{aq}}{C_0}\right) = \frac{7}{4} \approx 1,75$.

Q3- La superposition des diagrammes montre que Mn^{2+} et Cr^{2+} précipitent les premiers d'abord. Ces espèces s'oxydent en milieu acide pour donner Cr^{3+} et Mn^{4+} , qui précipitent les derniers joints donc avant.

Après en solution. (précipitant au domaine de précipitation de Cr^{2+}).

Q4- $O_2(g)$ est un oxydant. Les ions chrome (II) sont donc oxydés en ions chrome (III), après en solution aqueuse (Rq: $Cr^{2+}(aq)$ est également oxydée).

Q4- Les ions chrome n'étant plus simplifiés, mais les ions Mn^{4+} pourrants être oxydés pour les ions permanganate MnO_4^- :



Q8- à l'équilibre entre ces deux couples:

$$\begin{aligned} E_{eq}(MnO_2/Mn^{4+}) &= E_{eq}(MnO_4^-/Mn^{2+}) \\ \Rightarrow E^0(MnO_2/Mn^{4+}) + \frac{0,06}{2} \log\left(\frac{[MnO_2]_{aq}[H^+]_{aq}^4}{[Mn^{4+}]_{aq}(CO)_4}\right) \\ &= E^0(MnO_4^-/Mn^{2+}) + \frac{0,06}{5} \log\left(\frac{[MnO_4^-]_{aq}[H^+]_{aq}^8}{[Mn^{2+}]_{aq}(CO)_8}\right) \end{aligned}$$

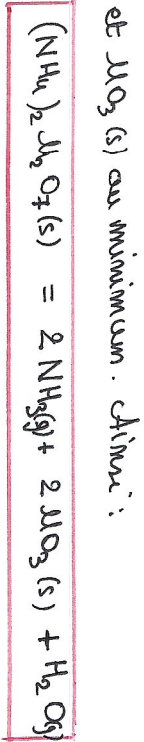
$$\Rightarrow \frac{0,06}{20} \log\left(\frac{[MnO_2]_{aq}^5 [H^+]_{aq}^{20} [Mn^{2+}]_{aq}^{10} (CO)^{20}}{[Mn^{4+}]_{aq}^5 (CO)^{20} [MnO_4^-]_{aq}^2 [H^+]_{aq}^{16}}\right)$$

$$= E^0(MnO_4^-/Mn^{2+}) - E^0(MnO_2/Mn^{4+})$$

$$\Rightarrow \frac{[MnO_2]_{aq}^5 [H^+]_{aq} [Mn^{2+}]_{aq}^2}{[Mn^{4+}]_{aq}^5 [MnO_4^-]_{aq}^2 (CO)_4} = K^0 = 10^{\frac{10(E^0(MnO_4^-/Mn^{2+}) - E^0(MnO_2/Mn^{4+}))}{0,06}}$$

A.N.: $K^0 = 10^{200}$

Q13- Calcination de $(NH_4)_2 H_2O_7(s)$; produits de réaction:



Rq: la calcination consiste à chauffer un solide pour le décomposer en de plus petites molécules.