

A.1) On observe un phénomène d'induction quand le **flux du champ magnétique** à travers un circuit **varie** dans le temps. Ceci est possible avec un champ variable si le circuit est immobile ou bien avec un champ quelconque lorsque le circuit est mobile ou se déforme.

A.2) Le champ magnétique est **stationnaire** et à l'équilibre, ni le supraconducteur ni l'aimant **ne bougent**.

A.3 & 4) $\vec{j} = \gamma \vec{E}$ Pour un conducteur parfait $\gamma \rightarrow \infty \Rightarrow \vec{E} = \vec{0}$ car la densité de courant est finie. On peut aussi faire référence à la distance de pénétration de \vec{E} , $\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \gamma \omega}} \rightarrow 0$ (le champ ne pénètre pas)

A.5) $\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} \rightarrow \vec{B}$ Stationnaire

A.6 & 7) $\vec{\mu} = \pi R^2 I \vec{n}$ $B \sim \frac{\mu_0 \mathcal{M}_1}{4\pi r^3} \sim 1 \text{ T}$ Avec $r \sim 1 \text{ cm}$

A.8) On applique la 2^{ème} et 3^{ème} loi de Newton à l'aimant, il subit le poids et la force $\vec{F} = -\overrightarrow{\text{grad}}(\vec{\mu} \cdot \vec{B}) \rightarrow \pi R^2 I \left| \frac{dB}{dr} \right| \sim mg \rightarrow I \sim 2 \text{ A}$ $\left(\left| \frac{dB}{dr} \right| \sim 6.10^2 \text{ T} \cdot \text{m}^{-1}, R \sim 1 \text{ cm} \right)$

B.1 & 2) $[\mu_0 \vec{j}] = [\text{rot } \vec{B}] \rightarrow [\mu_0 \text{rot } \vec{j}] = [\vec{B}] \cdot L^{-2}$ $\lambda = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ m}$

B.3) L'énoncé veut dire "stationnaire" ($\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{0}$) ! $\text{rot } \text{rot } \vec{B} = \mu_0 \text{rot } \vec{j} \Leftrightarrow \Delta \vec{B} = \frac{1}{\lambda^2} \vec{B}$ Car $\text{div } \vec{B} = 0$

B.4) Le système est invariant par translation suivant \vec{e}_y et \vec{e}_z donc la norme de \vec{B} ne dépend que de x .

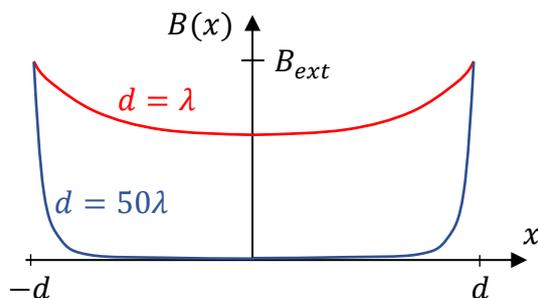
On suppose que les plans (xy) sont **plans de symétrie** pour la distribution créant \vec{B}_{ext} .

De plus, la géométrie de la plaque n'entre pas en conflit avec ces plans. Il est probable que $\vec{B} = B(x) \vec{e}_z$!

B.5) Les continuités imposent $A \text{ch}(d/\lambda) + C \text{sh}(d/\lambda) = A \text{ch}(d/\lambda) - C \text{sh}(d/\lambda) = B_{ext} \rightarrow A = \frac{B_{ext}}{\text{ch}(d/\lambda)}$

et $C = 0 \rightarrow \mathbf{B(x) = B_{ext} \frac{\text{ch}(x/\lambda)}{\text{ch}(d/\lambda)}}$

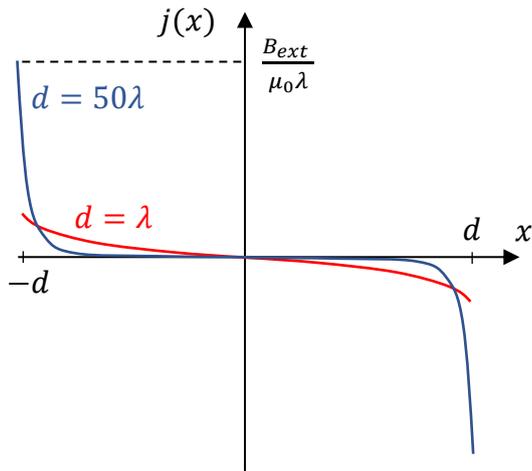
B.6-8) Il s'agit de l'**effet de peau**, phénomène que l'on rencontre lors de la propagation d'une onde dans un métal (λ est **une distance caractéristique de pénétration**).



Au cœur du matériau, $\vec{B} \sim \vec{0}$ si $d \gg \lambda$.

C'est effectivement le cas dans l'expérience qui nous intéresse.

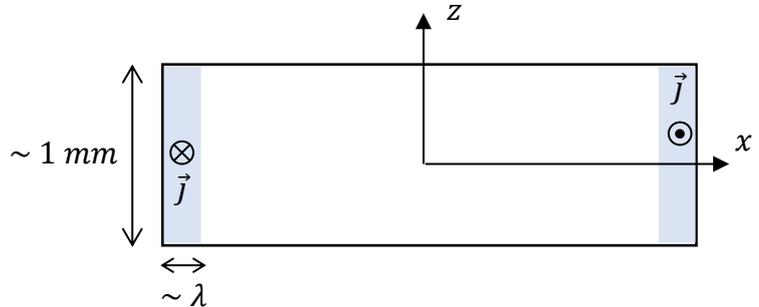
B.9-11) $\frac{\partial j}{\partial x} = -\frac{B(x)}{\mu_0 \lambda^2} \rightarrow \vec{j} = -\frac{B_{ext} \operatorname{sh}(x/\lambda)}{\mu_0 \lambda \operatorname{ch}(d/\lambda)} \vec{e}_y$



Au cœur du matériau, $\vec{j} \sim \vec{0}$ si $d \gg \lambda$.

La distribution de courant est alors **surfactive**.

Dans ce cas, $j \sim \frac{B_{ext}}{\mu_0 \lambda}$ sur une profondeur de quelques λ



$$I \sim \frac{B_{ext}}{\mu_0 \lambda} \underbrace{10^{-3} \lambda}_s \sim 4 \text{ A}$$

On retrouve le même ordre de grandeur mais avec un champ extérieur nettement moins intense.

C) L'erreur serait de se lancer dans une résolution de l'équation de la chaleur avec $T(r, t)$. Principalement, pour deux raisons : l'absence de données concernant les conductivités thermiques et la très grande difficulté de résolution de l'équation en régime quelconque. Nous traiterons donc le problème d'un point de vue global avec un premier principe appliqué à l'ensemble cuivre-gaine de température uniforme $T(t)$. Pour un mètre de câble, en négligeant la capacité thermique de la gaine, on a :

$$\pi a^2 \rho_{Cu} c_{Cu} \frac{dT}{dt} = RI^2 - 2\pi ah(T(t) - T_{ext}) \quad \text{Avec } a \text{ le rayon et } R = \frac{1}{\pi a^2 \gamma_{Cu}}, \text{ la résistance linéique.}$$

$$\rightarrow T(t) - T_{ext} = \frac{RI^2}{2\pi ah} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) \quad \text{Avec } \tau = \frac{a\rho_{Cu}c_{Cu}}{2h}, \text{ le temps caractéristique d'évolution.}$$

A.N. $a \sim 13 \text{ mm}$ $R \sim 3 \cdot 10^{-5} \Omega$ $I \sim 4 \cdot 10^3 \text{ A}$ $\tau \sim 5 \cdot 10^3 \text{ s}$ ($h = 5 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

La fusion serait atteinte en un peu plus de **trois heures**

Avec ventilation ou immersion dans de l'eau ($h = 50 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), la fusion ne serait pas atteinte.

D.1) Lorsqu'un quanton d'énergie \mathcal{E} aborde une barrière d'énergie potentielle de hauteur $V > \mathcal{E}$, la densité de probabilité de présence au-delà de la barrière n'est pas nulle. Ce phénomène appelé "effet tunnel" n'est possible qu'en mécanique quantique car il repose sur la notion de fonction d'onde.

D.2) La première équation donne $i\hbar e^{i\theta_1} \left[\frac{1}{2\sqrt{N_1}} \frac{dN_1}{dt} + i \frac{d\theta_1}{dt} \sqrt{N_1} \right] = K\sqrt{N_2} e^{i\theta_2}$

que l'on réécrit sous la forme $\frac{1}{2\sqrt{N_1}} \frac{dN_1}{dt} + i \frac{d\theta_1}{dt} \sqrt{N_1} = \frac{K}{i\hbar} \sqrt{N_2} e^{i(\theta_2 - \theta_1)}$

La relation demandée correspond à l'identification des **parties réelles**.

D.3) Cette égalité traduit la **conservation du nombre total de paires** de Cooper.

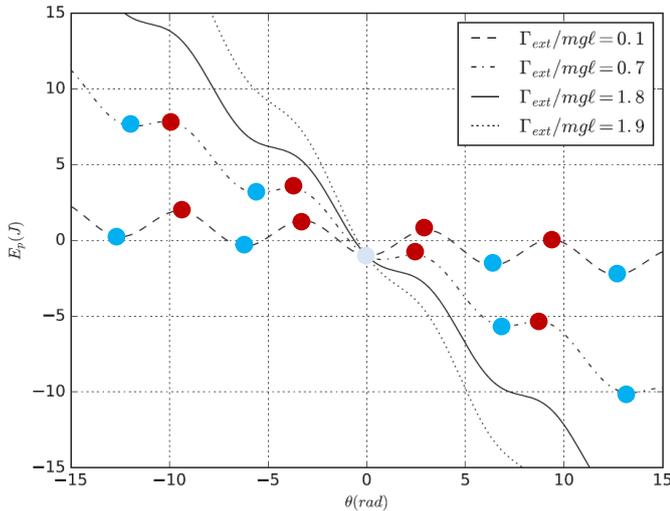
D.4) Le courant entrant dans le supraconducteur 1 est $I_s = -2e \frac{dN_1}{dt} = \frac{4eK}{\hbar} \sqrt{N_1 N_2} \sin(\theta_1 - \theta_2)$

E.1) $I_{ext} = I_c \sin \phi + \frac{V}{R} + C \frac{dV}{dt}$ D'où l'équation différentielle demandée.

E.2) $R \leftrightarrow \frac{\hbar}{2e\eta}$ $\phi \leftrightarrow \theta$ $I_{ext} \leftrightarrow \Gamma_{ext}$ $C \leftrightarrow \frac{2eJ}{\hbar}$ $I_c \sin \phi \leftrightarrow mgl \sin \theta$ $V \leftrightarrow \frac{\hbar}{2e} \dot{\theta}$

E.3) On multiplie l'équation par $\dot{\theta}$ et on intègre : $\frac{1}{2}J\dot{\theta}^2 - mgl \cos \theta - \Gamma_{ext}\theta = cste \Leftrightarrow \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_p = cste$

E.4 & 5) Les **minimums** de \mathcal{E}_p correspondent aux équilibres **stables** et les **maximums** aux équilibres **instables**. Il n'y a **aucune** position d'équilibre si $\Gamma_{ext} > mgl$ (La dérivée de \mathcal{E}_p ne s'annule jamais).



- Equilibre stable
- Equilibre stable pour $\Gamma_{ext}/mgl < 1$ Et $\Gamma_{ext}/mgl > 1$
- Equilibre instable

E.6) $\frac{d\phi}{dt} = \omega_J \frac{d\phi}{d\tau}$ et $\frac{d^2\phi}{dt^2} = \omega_J^2 \frac{d^2\phi}{d\tau^2} \rightarrow \omega_J = \sqrt{\frac{2eI_c}{C\hbar}}$ et $\beta_J = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{\hbar}{2eCI_c}}$

E.7) La condition $\beta_J \gg 1$ correspond à une **petite** capacité, on peut supprimer la branche avec C .

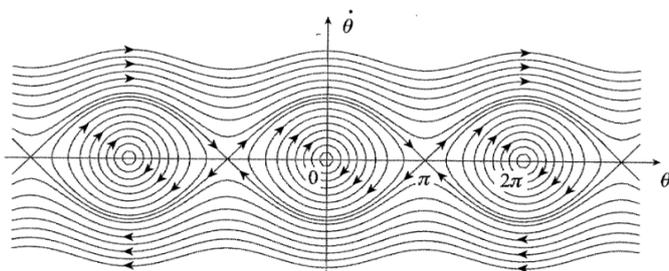
E.8) Si $|I_{ext}| \gg I_c$, le circuit se réduit à la **résistance**, ce que confirme la solution $\langle V \rangle = \pm RI_{ext}$

E.9) La pente des asymptotes ($|I_{ext}| \gg I_c$) correspond à R : $R = 6,3 \Omega$

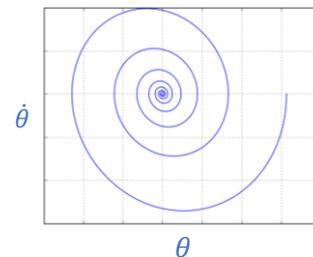
Les extrémités du palier horizontal correspondent à $\pm I_c$: $I_c = 0,8 \mu A$

E.10) Il faut $\beta_J = 0$ (et $\kappa = 0$ si on veut des oscillations autour de 0).

On obtient des courbes fermées (mouvement périodique) si la vitesse initiale ne permet pas au pendule d'atteindre la position haute. Dans le cas contraire, la fonction $\dot{\theta}(\theta)$ est périodique (mouvement évolutif).



$\beta_J = 0$ $\kappa = 0$



$\beta_J \neq 0$ $\kappa = 0$

E.11) Figure 8, on voit que les oscillations **disparaissent dans tous les cas** avec une valeur finale pour ϕ égale à $\frac{\pi}{6}$ [2π] selon la tension initiale ($\arcsin 0,5 = \frac{\pi}{6}$).

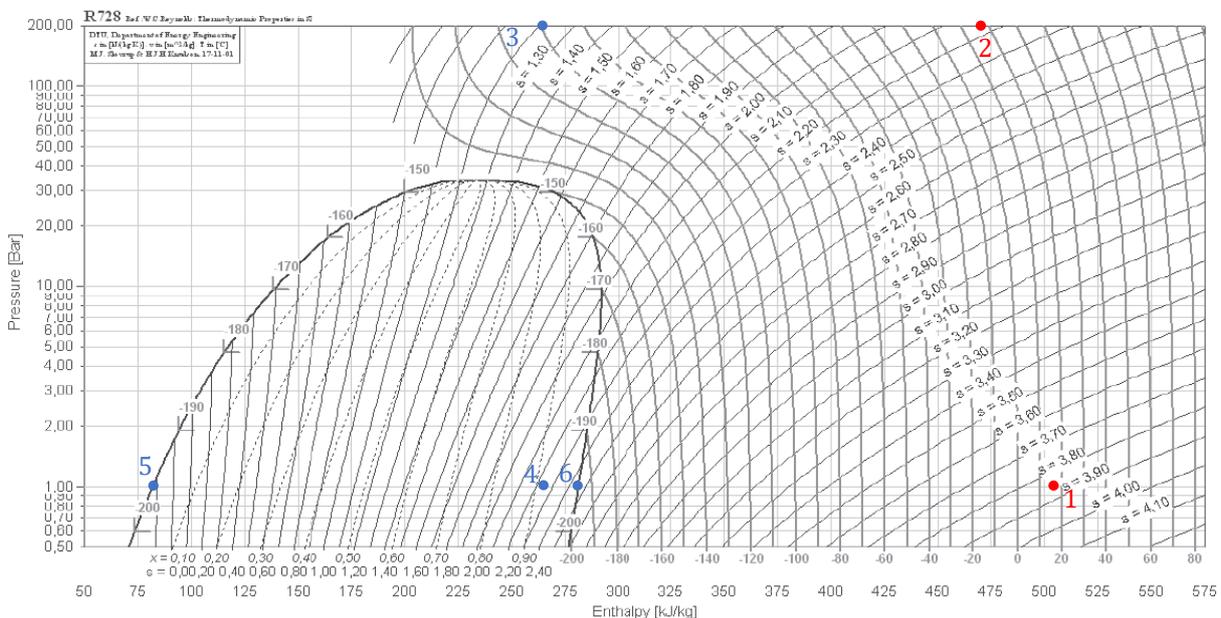
L'intensité I_{ext} est insuffisante pour permettre la traversée de l'isolant de façon pérenne.

Figure 9, au contraire, la tension V oscille de façon périodique si $V(0)$ est suffisamment grande.

La période d'oscillation de V est deux fois plus petite que celle de I_s .

F.1 & 2) Les indices e et s se réfèrent respectivement aux états en **entrée** et en **sortie** de chaque organe. Les termes h et s sont les fonctions d'état **enthalpie** et **entropie** (s_c est l'entropie créée). Le transfert thermique est noté q et w_u est le **travail utile** échangé par le fluide avec des pièces mobiles au cœur de l'organe, ce qui **exclut donc le travail des forces de pression au sein du fluide** en amont et en aval. Toutes ces grandeurs sont **massiques**. L'écoulement doit être **stationnaire** (permanent stationnaire !).

G.1 & 2) $h_1 = 505 \text{ kJ.kg}^{-1}$ $s_1 = 3,85 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ $h_2 = 470 \text{ kJ.kg}^{-1}$ $s_2 = 2,15 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
 $h_5 = 80 \text{ kJ.kg}^{-1}$ $s_5 = -0,10 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ $h_2 = 280 \text{ kJ.kg}^{-1}$ $s_6 = 2,45 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$



G.3) L'enthalpie d'un gaz parfait ne dépend que de T , les isenthalpes et isothermes **coïncident**.

G.4) A basse pression car, en bas à droite du diagramme, les isothermes sont verticales.

G.5 & 6) $s_2 - s_1 = \frac{q_{12}}{T_1} \rightarrow q_{12} = -4,9 \cdot 10^2 \text{ kJ.kg}^{-1}$ $w_{12} = h_2 - h_1 - q_{12} = 4,6 \cdot 10^2 \text{ kJ.kg}^{-1}$

G.7-10) $h_3 = h_4 = yh_5 + (1 - y)h_6 \rightarrow y = \frac{h_2 - h_1}{h_5 - h_1} = 8,2 \%$ $w_{1 \text{ kg liq}} = \frac{w_{12}}{y} = 5,6 \text{ MJ.kg}^{-1}$

G.11 & 12) $h_3 = h_4 = 265 \text{ kJ.kg}^{-1}$ $s_4 = 2,25 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ $s_3 = 1,20 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

G.13) $s_c = 1,05 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ L'irréversibilité provient d'une part du caractère **spontanée** de la transformation et d'autre part de la présence probable de **frottement** (légère viscosité).

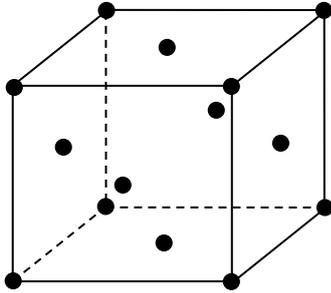
G.14) Dix litres de diazote correspond à $8,1 \text{ kg} \rightarrow W = 45 \text{ MJ} = 13 \text{ kWh} \rightarrow 1,9 \text{ €}$

[Cette partie est très proche de l'exercice F du TD Machines thermodynamiques (A.N. comprises !)]



Les structures stables sont celles contenant le maximum de sous-couches vide, pleine ou à moitié remplie.

I.3-6) $N_{CC} = 8 * \frac{1}{8} + 1 = 2$ $N_{CFC} = 8 * \frac{1}{8} + 6 * \frac{1}{2} = 4$ $\sqrt{3}a_{CC} = 4r$ Contact sur la diagonale du cube



$\sqrt{2}a_{CFC} = 4r$ Contact sur la diagonale d'une face

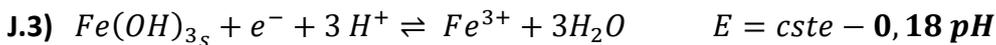
$$\mu_{CC} = \frac{3\sqrt{3}M}{32N_a r^3} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\mu_{CFC} = \frac{\sqrt{2}M}{8N_a r^3} = 8,6 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

I.7 & 8) $N_{Ba} = 8 * \frac{1}{8} + 1 = 2$ $N_{Fe} = 8 * \frac{1}{2} = 4$ $N_{As} = 2 * 1 + 8 * \frac{1}{4} = 4$ $BaFe_2As_2$



J.2) L'eau (et ses ions) se trouve **entre les deux traits** en pointillés, O_2 au-dessus, H_2 au-dessous.

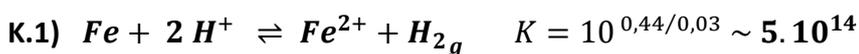


J.4) La frontière correspond **au début** de la précipitation : $10^{-2}[HO^-]^3 = 6,3 \cdot 10^{-38} \rightarrow \text{pH} = 2,3$

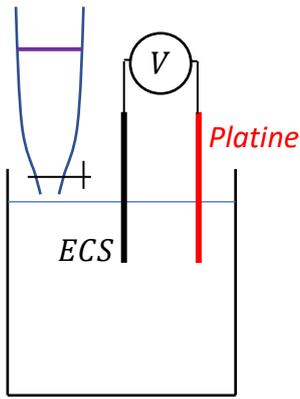
J.5 & 6) Le fer est **moins noble** que le cuivre ($E_{Fe^{2+}/Fe}^0 < E_{Cu^{2+}/Cu}^0$), en condition **hétérogène** il s'oxydera plus facilement. On aurait pu utiliser une autre technique de corrosion différentielle, la **protection cathodique** qui consiste à faire circuler un courant grâce à un générateur, la borne + (anode) est reliée à une électrode en graphite inerte et la borne - (cathode) est reliée à la pièce en cuivre à protéger. On effectue ainsi une électrolyse de l'eau présente dans le milieu ambiant ...

Il existe également une technique mettant à profit la passivation en corrosion **uniforme**, la **galvanisation** : On recouvre le câble en cuivre par du zinc qui **se passive** à l'air en formant une couche protectrice de ZnO .

J.7) $m_{Fe} = Mn_{Fe} = M \frac{n_e}{2} = M \frac{Q}{2F} = M \frac{jS\Delta t}{2F} = M \frac{j2\pi r L \Delta t}{2F} = 2,8 \cdot 10^2 \text{ kg}$



K.2-7) On ne mesure un potentiel qu'en mesurant **une tension** ! $u = E_{platine} - E_{ECS} = E_{Fe^{3+}/Fe^{2+}} - E_{ref}$



Une réaction de dosage doit être **très avancée** :



$$K' = 10^{0,74/0,012} \sim 5 \cdot 10^{61} \quad \text{Ok !}$$

On aurait pu repérer l'équivalence par la **persistance de la coloration violette** du permanganate en excès.

A la demi-équivalence, la moitié des ions Fe^{2+} ont été consommés :

$$E_{Fe^{3+}/Fe^{2+}} = E_{Fe^{3+}/Fe^{2+}}^0 \rightarrow E_{Fe^{3+}/Fe^{2+}}^0 = u_{eq}/2 + E_{ref}$$

K.8) $E_{Fe^{3+}/Fe^{2+}}^0 \sim 0,7 V$ La valeur est plus faible, certains ions MnO_4^- oxydent l'eau et non pas Fe^{2+} !

K.9) $n_{Fe^{2+}} = 5n_{MnO_4^-} = 5C_1v_{eq} = 0,05 mol$

K.10) N'y a-t-il pas une erreur d'énoncé ? On s'attend plutôt à avoir $n_{Ba^{2+}} = 0,025 mol \dots$
Ou n'avait-on pas dilué à 1/10 la solution à doser ?