

Agrégation externe SII

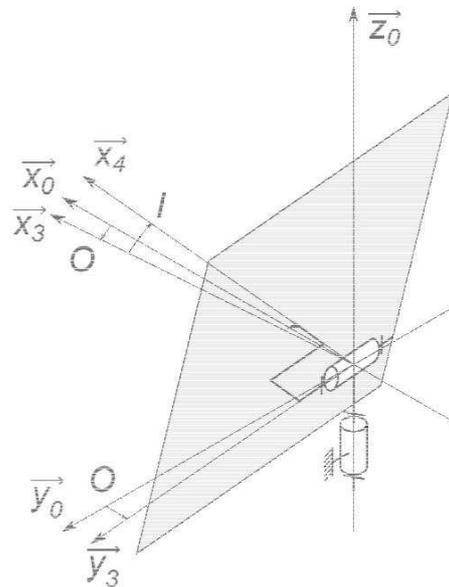
Éléments de correction de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur

Question 1

Un héliostat est positionné par deux motoréducteurs d'orientation et d'inclinaison.

La GTC transmet à l'héliostat les coordonnées de pointage A et H. L'héliostat acquitte la demande, calcule les angles de position O et I à atteindre, détermine le sens de rotation des motoréducteurs et les alimente. Lorsque la position demandée est atteinte, l'héliostat arrête les motoréducteurs et il envoie la confirmation de positionnement à la GTC.

Question 2



Question 3

Le vecteur \vec{x}_4 est bissecteur de (\vec{u}, \vec{x}_2) , c'est-à-dire colinéaire à la somme de ces deux vecteurs unitaires. Les angles O et I respectent donc l'équation :

$$\vec{x}_4 \wedge (\vec{u} + \vec{x}_2) = \vec{0}.$$

$$\begin{vmatrix} \cos I \cdot \cos O & u_x + \cos H \cdot \cos A \\ \cos I \cdot \sin O & u_y + \cos H \cdot \sin A \\ -\sin I & u_z - \sin H \end{vmatrix} = \vec{0}$$

$$\begin{cases} \cos I \cdot \sin O \cdot (u_z - \sin H) + \sin I \cdot (u_y + \cos H \cdot \sin A) = 0 - \\ \sin I \cdot (u_x + \cos H \cdot \cos A) - \cos I \cdot \cos O \cdot (u_z - \sin H) = 0 \\ \cos I \cdot \cos O \cdot (u_y + \cos H \cdot \sin A) - \cos I \cdot \sin O \cdot (u_x + \cos H \cdot \cos A) = 0 \end{cases}$$

Les inconnues sont O et I. La troisième équation permet d'obtenir O en fonction des données :

$$\tan O = \frac{u_y + \cos H \cdot \sin A}{u_x + \cos H \cdot \cos A}$$

La première équation permet d'obtenir l en fonction de O et des données :

$$\tan l = -\sin O \cdot u_y + \frac{u_z - \sin H}{\cos H \cdot \sin A}.$$

Le facteur d'inclinaison s'écrit comme le cosinus de l'angle entre la normale au panneau et la direction du soleil, soit :

$$f_i = \frac{S}{S_h} = \cos \theta = u_x \cdot \cos l \cdot \cos O + u_y \cdot \cos l \cdot \sin O - u_z \cdot \sin l.$$

Question 4

Le programme permettant de calculer le facteur d'inclinaison moyen annuel sur un héliostat s'écrit en langage Scilab par exemple :

```

function fi=fi(xp,yp)
    Hr=93
    L=sqrt( xp^2+yp^2+Hr^2 )
    Ux=-xp/L
    Uy=-yp/L
    Uz=Hr/L
    fi=0 // initialisation de fi
    for j =1:365 // boucle sur tous les jours de l'année
        for m=1:24*60 // boucle sur les minutes d'une journée
            A=Azimut(j,m)
            H=Hauteur(j,m)
            O=Orientation(A,H)
            l=Inclinaison(A,H)
            if (H>0) then // test si le soleil est au-dessus de l'horizon
                fi=fi+Ux*cos(l)*cos(O)+Uy*cos(l)*sin(O)-Uz*sin(l)
            end
        end
    end
    fi=fi/(365*24*60)
endfunction

```

Question 5

Le rendement de l'ensemble de captation est exprimé par :

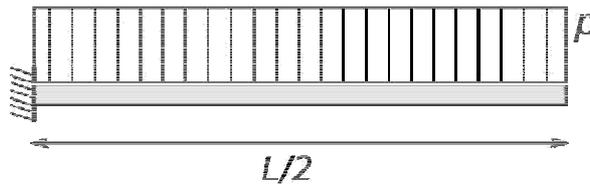
$$\eta_{capt} = \eta_{incl} \cdot \eta_{refl} \cdot \eta_{trans} \cdot \eta_{omb} \cdot \eta_{mas} = 0,86 \times 0,88 \times 0,95 \times 0,96 \times 0,97 = 0,67.$$

La puissance rayonnée sur le récepteur thermique s'en déduit :

$$E = \eta_{capt} \cdot I_{SG} \cdot S_{rt} = 50,5 \text{ MW}.$$

Question 6

Par symétrie, le problème se ramène à une poutre simplement encastrée soumise à une charge répartie uniforme.



L'angle à l'extrémité de la poutre est approché par la dérivée de la flèche : $\varepsilon \cong \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=L/2}$.

L'effort tranchant vaut : $T(x) = -p \cdot \frac{L}{2} - x$ (axe des ordonnées ascendant).

Le moment fléchissant se déduit par la relation : $\frac{dM_f(x)}{dx} = -T(x) = p \cdot \frac{L}{2} - x$.

En intégrant, on obtient : $M_f(x) = -p \cdot \frac{L}{2} \cdot x + \frac{x^2}{2} + cste$.

Les conditions limites (moment fléchissant nul à l'extrémité droite) permettent de calculer la constante : $cste = 0$.

Sous l'hypothèse de Bernoulli, la flèche s'exprime en fonction du moment fléchissant :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M_f}{E \cdot I_z} \quad \frac{dy}{dx} = \frac{p}{6 \cdot E \cdot I_z} \cdot \frac{L}{2} \cdot x^2 + cste$$

Les conditions limites (pente nulle à l'encastrement) permettent de calculer : $cste = -\frac{p \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_z}$.

D'où : $\frac{dy}{dx} = \frac{p}{6 \cdot E \cdot I_z} \cdot \frac{L}{2} \cdot x^2 - \frac{p \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_z}$.

L'angle à l'extrémité de la poutre vaut alors : $\varepsilon \cong \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=L/2} = \frac{p \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_z}$.

Question 7

L'application numérique pour la poutre IPN80 : $\varepsilon = 7,5 \times 10^{-3} \text{ rad} > 10^{-3} \text{ rad}$.

La poutre IPN80 ne convient donc pas.

Question 8

Soit α le coefficient d'homothétie (coefficient de longueur). Les valeurs du problème deviennent :

$$\left| \begin{array}{l} p' = 5,9 \times \alpha^2 \times 10 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \\ L = 10 \text{ m} \\ E = 210 \text{ GPa} \\ I'_z = \alpha^4 \times 78 \times 10^{-8} \text{ m}^4 \\ \varepsilon' = 10^{-3} \text{ rad} \end{array} \right.$$

L'expression de l'angle conduit alors à : $\frac{\varepsilon}{\varepsilon'} = \frac{p \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_z} \cdot \frac{48 \cdot E \cdot I'}{p' \cdot L^3} = \alpha^2 = 7,5$.

La hauteur de la nouvelle poutre vaut alors $h' = \sqrt{7,5} \cdot h = 219 \text{ mm}$ et la masse de la poutre vaut $m' = 5,9 \cdot \alpha^2 \cdot L = 442 \text{ kg}$.

Ces valeurs sont évidemment inacceptables donc la solution d'une poutre IPN n'est pas adaptée.

Question 9

La charge répartie est due au poids propre de la poutre et au poids des miroirs, soit

$$: p'' = 2 \cdot a^2 \cdot \rho_a \cdot g + \rho_m .$$

L'angle en bout de poutre est toujours égal à $\varepsilon'' = 10^{-3}$ rad, ce qui permet d'écrire la relation :

$$\varepsilon'' = \frac{p'' \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I''} = \frac{(2 \cdot a^2 \cdot \rho_a \cdot g + \rho_m) \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot \frac{a^2 \cdot h_m^2}{2}} .$$

Cette expression permet de déduire la valeur de $a = \sqrt{\frac{\rho_m \cdot L^3}{24 \cdot E \cdot h_m^2 \cdot \varepsilon'' - 2 \cdot L^3 \cdot \rho_a \cdot g}} = 2,8$ cm.

La masse de la poutre treillis vaut alors 110 kg, ce qui s'avère adapté.

Question 10

Si le cumul d'erreur vaut $\pm 2,5 \times 10^{-3}$ rad, alors le secteur angulaire qui élargit la tache vaut 5×10^{-3} rad. 600 m, la tache s'élargit de 3 m. L'image du soleil étant déjà large de 5,6 m, la tache finale sera large de 8,6 m, ce qui est bien inférieur aux dimensions du récepteur (12 m x 14 m). La tâche est donc totalement incluse dans le récepteur.

Le facteur de concentration du champ de captation s'exprime donc comme un rapport de surfaces. C'est en effet le rapport de la surface utile du champ héliostatique ($75\,000 \text{ m}^2$) et de la surface de la tache perçue par le récepteur. Soit :

$$F = \frac{75\,500}{\frac{\pi \cdot 8,6^2}{4}} = 1\,299,8 .$$

On en déduit la valeur de la puissance surfacique incidente sur le récepteur dans des conditions nominales de fonctionnement telles que $\varphi = \eta_{capt} \cdot I_{SG} \cdot F_C$:

$$\varphi = \eta_{capt} \cdot I_{SG} \cdot F_C = 870 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} .$$

Question 11

Une lecture du tableau N°1, nous permet d'observer que le coefficient correspondant aux pertes thermiques du bouilleur en face arrière est numériquement 22 à 67 fois plus faible que les coefficients d'échanges thermiques de la face avant.

Le fait de négliger ces pertes est alors tout à fait justifié.

Question 12

Si l'on pose un bilan énergétique sur le bouilleur en se basant sur la figure N°13, on peut écrire en régime permanent établi (régime statique) :

$$E = \varphi_{utile} + r \cdot E + K_{conv-av} \cdot (T_s - T_a) + K_{ray-av} \cdot (T_s - T_c) ,$$

avec $\varphi_{utile} = K_{tube-av} \cdot (T_s - T_f)$.

On en déduit :

$$E = \varphi_{\text{utile}} \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{\text{conv-av}}}{K_{\text{tube-av}}} + \frac{\kappa_{\text{ray-av}}}{K_{\text{tube-av}}} \right) + r \cdot E + K_{\text{conv-av}} \cdot (T_f - T_a) + K_{\text{ray-av}} \cdot (T_f - T_c).$$

Ou encore :

$$\varphi_{\text{utile}} = \frac{E - r \cdot E - K_{\text{conv-av}} \cdot (T_f - T_a) - K_{\text{ray-av}} \cdot (T_f - T_c)}{1 + \frac{\kappa_{\text{conv-av}}}{K_{\text{tube-av}}} + \frac{\kappa_{\text{ray-av}}}{K_{\text{tube-av}}}}.$$

Le rendement du récepteur s'exprime comme le rapport de la puissance utile sur la puissance absorbée, soit :

$$\eta_{\text{rec}} = \frac{\varphi_{\text{utile}}}{E} = \frac{1 - r - \frac{\kappa_{\text{conv-av}}}{E} \cdot (T_f - T_a) - \frac{\kappa_{\text{ray-av}}}{E} \cdot (T_f - T_c)}{1 + \frac{\kappa_{\text{conv-av}}}{K_{\text{tube-av}}} + \frac{\kappa_{\text{ray-av}}}{K_{\text{tube-av}}}},$$

$$\eta_{\text{rec}} = \frac{1 - 0,02 - \frac{2,54 \cdot 10^3}{50 \cdot 10^6} \cdot (250 - 10) - \frac{6,65 \cdot 10^3}{50 \cdot 10^6} \cdot (250 - 0)}{1 + \frac{2,54}{5000} + \frac{6,65}{5000}}.$$

Question 13

Il s'agit ici de déterminer à partir de quelle valeur de l'éclairement E, le récepteur peut commencer à débiter un flux utile dans le réseau vapeur. À la limite, il faut trouver la valeur de E telle que le rendement soit nul, cette valeur de E vérifiant :

$$0 = E - r \cdot E - K_{\text{conv-av}} \cdot (T_f - T_a) - K_{\text{ray-av}} \cdot (T_f - T_c),$$

$$0 = E \cdot (1 - r) - (K_{\text{conv-av}} + K_{\text{ray-av}}) \cdot (T_f - T_a) - K_{\text{ray-av}} \cdot (T_a - T_c).$$

L'expression de l'éclairement E permettant de débiter la production de vapeur se déduit alors :

$$E = \frac{(K_{\text{conv-av}} + K_{\text{ray-av}}) \cdot (T_f - T_a) + K_{\text{ray-av}} \cdot (T_a - T_c)}{1 - r},$$

$$E = \frac{(6,65 + 2,54) \cdot (250 - 10) + 2,54 \cdot (10)}{0,98} \cdot 10^3,$$

$$E = 2,28 \text{ MW}.$$

En utilisant la relation de la question 5, on en déduit l'irradiance minimale :

$$I_{SG} = 45,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Question 14

Le cycle de Carnot est une modélisation externe du cycle thermodynamique, dont le rendement est le rapport entre le travail mécanique $-W$ délivré par la machine thermodynamique, et la quantité de chaleur Q_C apportée à la machine sur la source chaude.

$$\eta_{\text{carnot}} = -W/Q$$

Le premier principe de la thermodynamique donne : $Q_c = -W - Q_f$.

On en déduit : $\eta_{carnot} = 1 + \frac{Q_c}{Q_f}$.

Le second principe appliqué au cycle dans le cas d'un cycle idéal réversible nous permet d'écrire que :

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0$$

Soit :

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{273,15 + 50}{273,15 + 250} = 0,38$$

Question 15

Les valeurs des températures et des pressions sont :

$$T_c = 273 + 250 = 523 \text{ K ;}$$

$$T_f = 273 + 50 = 323 \text{ K ;}$$

$$P_c = 39,78 \text{ bar (pression absolue) ;}$$

$$P_f = 0,12 \text{ bar (pression absolue).}$$

Le tracé de l'allure du cycle thermodynamique est donné sur le document réponse N°1.

Le rendement thermodynamique est le rapport entre la puissance libérée à la turbine et la puissance absorbée par l'évaporateur. On a :

$$\eta_{cycle} = \frac{q_{mvsat} \cdot (H_{et} - H_{st})}{q_{mvsat} \cdot (H_{et} - H_{spomp})} \approx \frac{q_{mvsat} \cdot (H_{et} - H_{st})}{q_{mvsat} \cdot (H_{et} - H_{scond})}$$

En effet, on peut évaluer la variation d'enthalpie massique apportée par le pompage :

$$H_{spomp} - H_{scond} = \frac{p}{\rho} = \frac{(39,78 - 0,12) \cdot 10^5}{988} = 4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

On en déduit que cette variation d'enthalpie est négligeable et que l'on peut numériquement confondre H_{spomp} et H_{scond} .

Il reste donc à déterminer les valeurs des enthalpies. Grâce au tableau (DT N°1), on peut lire :

$$H_{et} = 2,8 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$S_{et} = S_{sis} = 6069 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Sur le diagramme de Mollier (H,S), on observe que, dans l'espace liquide vapeur (sous la « cloche » ou courbe de saturation), l'enthalpie et l'entropie massique sont liées par une relation de proportionnalité pour des changements d'état isobares. On a donc : $H = S \cdot T$, avec T la température absolue de changement d'état.

Il est donc possible connaissant S_{et} de déterminer H_{sis} , puis d'en déduire H_{st} .

En effet, en sortie de la turbine, la température du mélange diphasique est de 50 °C, soit 323 K. On peut sur cette isotherme et isobare écrire :

$$\left(\frac{H_{sis} - H_{vsa(50^\circ\text{C})}}{S_{sis} - S_{vsa(50^\circ\text{C})}} \right) = \left(\frac{S_{sis} - S_{vsa(50^\circ\text{C})}}{S_{isa(50^\circ\text{C})} - S_{vsa(50^\circ\text{C})}} \right) \cdot \left(\frac{H_{isa(50^\circ\text{C})} - H_{vsa(50^\circ\text{C})}}{S_{isa(50^\circ\text{C})} - S_{vsa(50^\circ\text{C})}} \right)$$

Soit :

$$H_{sis} = 209,3 + (6,07 - 0,71) \cdot \frac{(2592 - 209,3)}{(8,07 - 0,71)},$$
$$H_{sis} = 1944 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

On en déduit donc H_{st} :

$$H_{st} = H_{et} - (H_{et} - H_{sis}) \cdot \eta_{is},$$
$$H_{st} = 2801 - (2801 - 1944) \cdot 0,90,$$
$$H_{st} = 2023 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

On en déduit donc le rendement thermodynamique du cycle :

$$\eta_{cycle} = \frac{(H_{et} - H_{st})}{(H_{et} - H_{scond})},$$
$$\eta_{cycle} = \frac{(2801 - 2023)}{(2801 - 209,3)},$$
$$\eta_{cycle} = 0,3.$$

Question 16

Le cycle de Carnot est une modélisation thermique externe de la machine qui part de l'hypothèse que toutes les transformations thermodynamiques subies par le fluide sont réversibles et idéales.

Le cycle de Rankine est une modélisation interne, qui tient compte des caractéristiques thermodynamiques du fluide utilisé. Dans le cadre de la modélisation faite ici, nous avons pris en compte les transformations irréversibles et imparfaites de la détente dans la turbine ; il est donc normal que ce rendement soit plus faible que le rendement de Carnot.

Question 17

Conditions qui permettent de réduire l'étude à une seule phase :

- l'alternateur doit être de construction symétrique (condition de découplage des phases) ;
- l'alimentation électrique doit être sinusoïdale et équilibrée (condition de découplage des phases) ;
- l'alternateur doit être de type à pôles lisses à l'exclusion des pôles saillants (limite de validité) ;
- l'état magnétique de la machine ne doit pas être saturé (limite de validité) ;
- l'alternateur doit fonctionner en régime permanent à l'exclusion des régimes transitoires (limite de validité).

Question 18

Voir le corrigé sur le document réponse N°2

Question 19

De la puissance apparente nominale $S_n = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n = 3 \cdot V_n \cdot I_n$, on déduit :

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{12 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \times 6,6 \cdot 10^3} = 1050 \text{ A}.$$

Au point nominal, le facteur de puissance est tel que :

$$F_{pn} = \cos(\phi_n) = \frac{P}{S} = \frac{11}{12} = 0,917 \quad \text{et} \quad \phi_n \approx 23^\circ 33'.$$

Sachant que les phases de l'induit sont couplées en étoile et connaissant la résistance mesurée entre deux bornes de l'induit, on déduit :

$$R_i = \frac{R_c}{2} = \frac{64 \cdot 10^{-3}}{2} = 32 \text{ m}\Omega.$$

Question 20

Par application du théorème de Pythagore, l'annulation de la tension d'induit $V_{\text{c}}^{\text{induit}}$ conduit à la relation suivante sur les normes des vecteurs (voir le diagramme de Fresnel sur le document réponse N°2) :

$$E_{rcc} = I_{rcc} \sqrt{R_i^2 + (L\omega)^2}.$$

Connaissant l'intensité du courant d'excitation, on déduit la force électromotrice en court-circuit de la caractéristique interne présentée sur le document réponse N°3 :

$$E_{rcc} = \frac{44}{40} \cdot \frac{4 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 2,54 \text{ kV}.$$

On en déduit la réactance synchrone :

$$X = \frac{E_{rcc}}{I_{cc}} = \frac{2,54}{32 \cdot 10^{-6}} \approx 2,54 \text{ }\Omega.$$

Pour les applications numériques, à défaut d'avoir su identifier la réactance synchrone, on pourra utiliser la valeur approximative suivante : $X = 2,6 \text{ }\Omega$. Dans les corrections qui suivent, les valeurs numériques obtenues via cette approximation seront présentées entre accolades $\{ \}$ à côté des valeurs exactes.

Question 21

L'expression de la force électromotrice interne est déterminée en exploitant le schéma équivalent représenté sur le document réponse N°2. Soit :

$$E_m = V_n + j \cdot X \cdot I_n.$$

En réutilisant le calcul du courant nominal et celui du facteur de puissance des questions précédentes, on obtient :

$$E_m = \sqrt{(V_n + X \cdot I_n \cdot \sin\phi_n)^2 + (X \cdot I_n \cdot \cos\phi_n)^2}.$$

L'application numérique donne :

$$E_m = \sqrt{\left(\frac{6,6 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} + 2,54 \times 1050 \times 0,3997 \right)^2 + \left(2,54 \times 1050 \times 0,9182 \right)^2} = 5,457 \text{ kV} \{ 5,505 \text{ kV} \}.$$

Sinon, en utilisant les puissances nominales indiquées dans l'énoncé, on trouve aussi :

$$E_m = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{1 + X \frac{Q_n^2}{U_n^2} + X \frac{P_n^2}{U_n^2}}$$

$$E_m = \frac{6,6 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{1 + 2,54 \times \frac{4,82}{6,6^2} + 2,54 \times \frac{11^2}{6,6^2}} = 5,455 \text{ kV} \{ 5,505 \text{ kV} \}.$$

Des mêmes relations, on déduit l'angle interne :

$$\theta = \arcsin \frac{X \cdot I_n \cdot \cos \phi_n}{E_m} = \arcsin \frac{X \cdot P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot E_m} \approx 26^\circ 40' \{ 27^\circ 02' \}.$$

En reportant E_m sur la caractéristique interne, on obtient en abscisse : $I_{fn} = 243 \text{ A} \{ 255 \text{ A} \}$.
Les pertes électriques de l'inducteur s'en déduisent :

$$P_{jf} = U_f \cdot I_{fn} = 420 \times 243 = 102,1 \text{ kW} \{ 107,1 \text{ kW} \}.$$

Question 22

Les phénomènes, aux origines des pertes ferromagnétiques, sont le phénomène d'hystérésis associé à l'alternance de la polarisation magnétique et la circulation de courants induits dans la masse des tôles (courants de Foucault).

Le silicium permet d'augmenter la résistivité de l'alliage et donc de réduire l'intensité des courants de Foucault. Il contribue à limiter les pertes ferromagnétiques.

Question 23

Par la loi de conservation du flux, en supposant que la longueur de l'induit L_r est identique à celle de l'inducteur :

$$B_a \cdot d_a \cdot L_r = B_e \cdot d_a + 2 \cdot \frac{b}{2} \cdot L_r = 2 \cdot B_e \cdot d_a \cdot L_r \quad B_a = 2 \cdot B_e = 2,14 \text{ T}.$$

Soit la largeur de dent à l'alésage :

$$d_a = b = \frac{\pi \cdot D_r}{2 \cdot N_d} = \frac{\pi \times 0,7}{2 \times 54} = 20,362 \text{ mm}.$$

Par le calcul de la circonférence en fond d'encoche et en retranchant la largeur d'encoche, on obtient la largeur des dents à la base :

$$d_f = \frac{p}{N} \cdot (D_r + 2 \cdot h_d) - b = \frac{p}{54} \cdot (700 + 2 \times 90) - 20,362 = 30,83 \text{ mm}.$$

Ou encore, directement :

$$d_f = \frac{\pi}{d} \cdot \frac{D}{2} + 2 \cdot h_d = \frac{\pi}{54} \cdot \frac{700}{2} + 2 \times 90 = 30,83 \text{ mm}.$$

Par la loi de conservation du flux, il vient : $B_a \cdot d_a = B_f \cdot d_f$.

On déduit alors :

$$B_f = B_a \cdot \frac{d_a}{d_f} = 2,14 \times \frac{20,36}{30,83} = 1,413 \text{ T}.$$

Voir le document réponse N°4 : $W_a = 7,45 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$; $W_m = 4,45 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$; $W_f = 2,9 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Question 24

Voir le document réponse N°4.

Géométriquement ou en intégrant, on a les pertes massiques moyennes :

$$W_d = \frac{W_a + 4 \cdot W_m + W_f}{6} = \frac{7,45 + 4 \times 4,45 + 2,9}{6} = 4,692 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Question 25

Il n'est pas équivalent de calculer l'induction moyenne dans la dent pour en déterminer les pertes massiques moyennes *a posteriori* car la relation entre l'induction et les pertes n'est pas linéaire (affine).

Question 26

Soit la section des dents :

$$S_d = h_d \cdot \frac{D_a + D_f}{2} = 90 \times \frac{20,362 + 30,83}{2} = 23,04 \text{ cm}^2.$$

La masse des dents s'en déduit :

$$m_d = \rho_s \cdot N_d \cdot S_d \cdot L_r = 7\,800 \times 54 \times 2\,304 \cdot 10^{-6} \times 0,3 = 291,1 \text{ kg}.$$

On exprime alors les pertes majorées dans les dents de la manière suivante :

$$P_{Fd} = K_d \cdot W_d \cdot m_d = 2,4 \times 4,692 \times 291,1 = 3,278 \text{ kW}.$$

Soit la section de la couronne :

$$S_c = \pi \cdot \frac{D_r + h + h}{2}^2 - \frac{D_r + h}{2}^2 = \pi \cdot (35 + 9 + 24)^2 - (35 + 9)^2 = 8\,445 \text{ cm}^2.$$

La masse de la couronne s'en déduit :

$$m_c = \rho_s \cdot S_c \cdot L_r = 7\,800 \times 0,8445 \times 0,3 = 1976 \text{ kg}.$$

On exprime alors les pertes majorées dans la couronne de la manière suivante :

$$P_{Fc} = K_c \cdot W_c \cdot m_c = 1,4 \times 3,875 \times 1976 = 10,72 \text{ kW}.$$

Question 27

Par la loi de Faraday, en régime périodique alternatif, l'induction est proportionnelle à la force électromotrice. Il suffit de multiplier les inductions par E/V . Par la réponse à la question 26, il vient :

$$P_{Ft} = 1,146^{\frac{c}{V}} \cdot P_{Fd} + P_{Fc} = 1,313 \times (3,278 + 10,72) = 18,38 \text{ kW} \{18,15 \text{ kW}\}.$$

Question 28

Les pertes Joule peuvent être déterminées de trois manières différentes.

Après avoir calculé la résistance des enroulements d'induit et l'intensité nominale du courant d'induit (Question 19), les pertes Joule dans les trois phases de l'induit sont exprimées par :

$$P_{Ji} = 3 \cdot R_i \cdot I_n^2 = 3 \times 32 \cdot 10^{-3} \times 1050^2 = 105,8 \text{ kW}.$$

Une autre possibilité consiste à exprimer directement les pertes Joule à partir des puissances nominales énoncées, sans utiliser l'intensité nominale du courant d'induit :

$$P_{Ji} = R_i \cdot \frac{S^c}{U_n^2} = 32 \times \frac{12^c}{6,6^2} \cdot 10^3 = 105,8 \text{ kW}.$$

Enfin, sans connaître l'intensité nominale du courant d'induit ni la résistance des enroulements d'induit mais directement à partir de la mesure de résistance entre deux bornes sans connaître le couplage, telle qu'énoncée, on trouve :

$$P_{ji} = \frac{3}{2} R_c \cdot \frac{f_n^2}{U_n^2} = \frac{R S^2}{2 U_n^2} = \frac{64}{2} \times \frac{12^2}{6,6^2} \cdot 10^3 = 105,8 \text{ kW}.$$

Question 29

En définissant η_e , le rendement nominal de l'alternateur, le rendement du groupe réducteur-alternateur-transformateur est exprimé par :

$$\eta_n = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_{ts}.$$

La puissance électrique nominale de l'alternateur étant connue, la puissance P_a qu'il absorbe est obtenue en y additionnant, outre les trois pertes calculées plus haut (Questions 21, 27 et 28), les pertes mécaniques, des pertes non évaluées à l'induit et à l'inducteur ainsi que les pertes résiduelles :

$$P_a = P_n + P_{n, \text{pertes}} = P_n + P_{jf} + P_{Ft} + P_{ji} + P_{fp} + P_{fg} + P_v + P_{Fi} + P_{Ti} + P_{Pf} + P_{ex} + P_r.$$

L'expression du rendement du groupe, au point nominal, est donc :

$$\eta_n = \eta_r \cdot \frac{P_n}{P_n + P_{n, \text{pertes}}} \cdot \eta_{ts}.$$

L'application numérique permet d'obtenir :

$$\eta_n = 0,989 \times \frac{11 \cdot 10^6}{11 \cdot 10^6 + 226,28 \cdot 10^3 + 73,36 \cdot 10^3 + 15,34 \cdot 10^3} \times 0,993$$

$$\eta_n = 0,989 \times 0,96756 \times 0,993 = 95,02 \% \quad \{ 0,989 \times 0,9671 \times 0,993 = 94,98 \% \}.$$

Question 30

En régime nominal le rendement de la chaîne de conversion thermoélectrique hors auxiliaires est de :

$$\eta = 0,67 \times 0,92 \times 0,999 \times 0,31 \times 0,95 = 0,181.$$

La puissance délivrée étant de 11 MW, la puissance solaire collectée est alors : $P_{abs} = 60,66 \text{ MW}$.

Le rendement intégrant les auxiliaires est alors :

$$\eta = \frac{11}{60,66 + 0,180} = 0,181.$$

Question 31

Sur sa durée de vie, le coût de la centrale est :

$$C = 35 + 25 \times 2,635 = 100,875 \text{ M€}$$

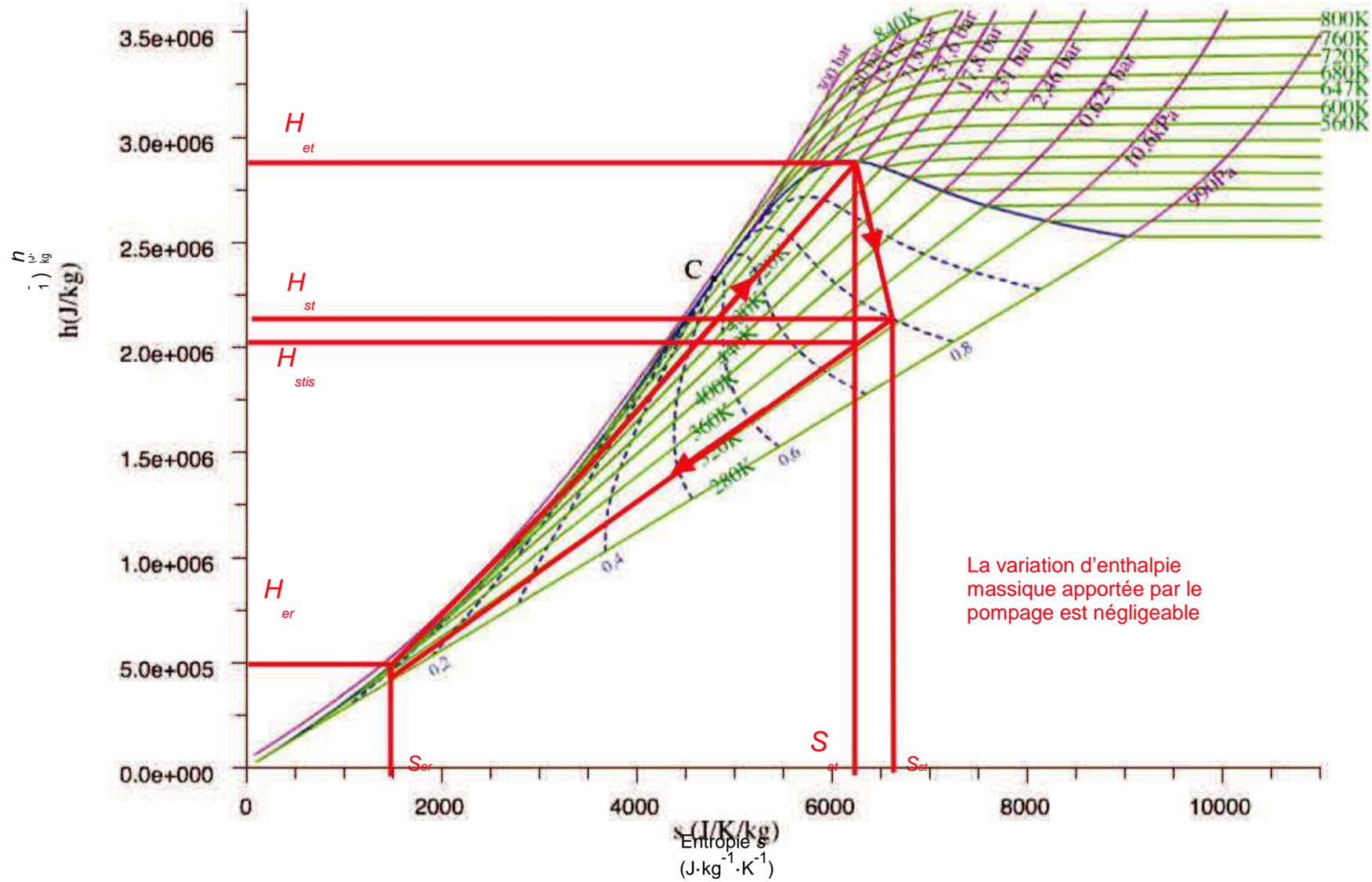
L'énergie produite sur la durée de vie est :

$$E = 24 \times 25 = 600 \text{ GW} \cdot \text{h}.$$

Le coût moyen de production est donc de 168 € par MW·h.

Cette solution ne semble pas rentable en l'état mais elle représente une alternative qui peut devenir intéressante avec la disparition progressive des énergies fossiles facilement exploitables et l'augmentation des tarifs de ces énergies.

Document Réponse N°1 : « Diagramme de Mollier de l'eau »



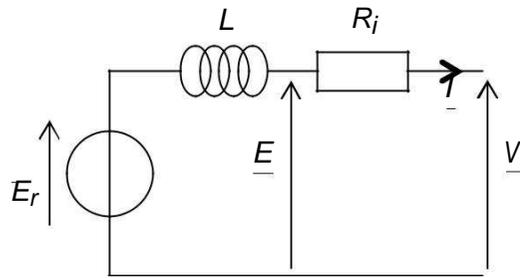


Schéma électrique du modèle de Behn-Eschenburg

Significations des paramètres du modèle de Behn-Eschenburg

R_i représente la résistance électrique d'une phase de l'induit.

L représente l'inductance cyclique.

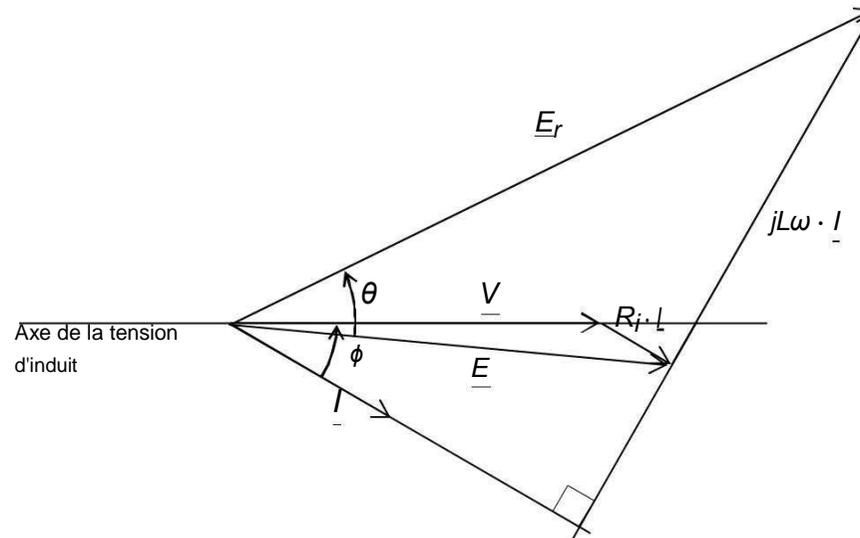
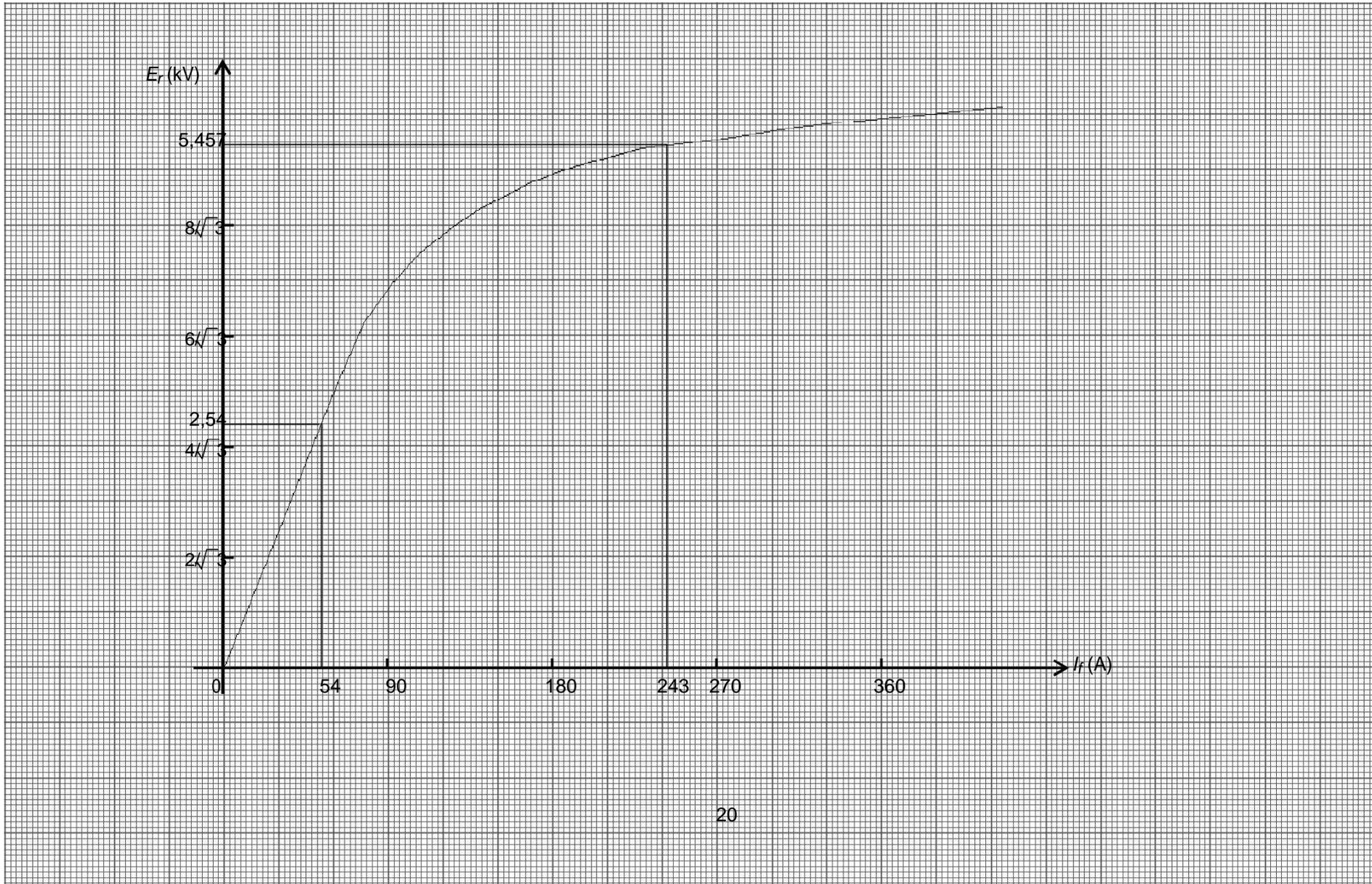
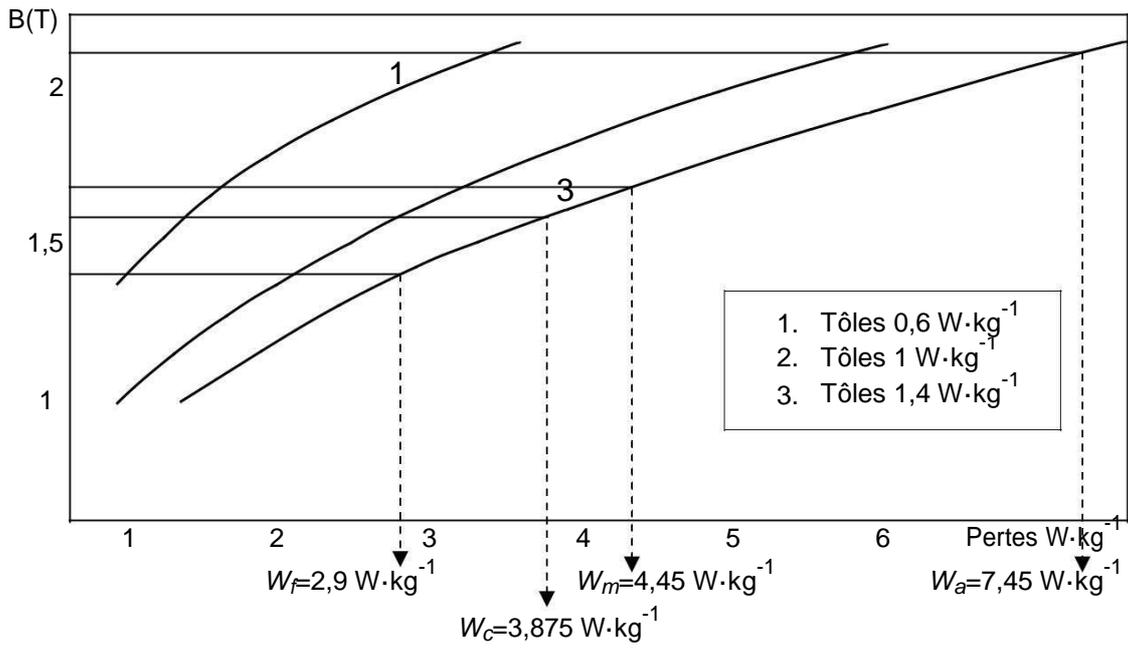


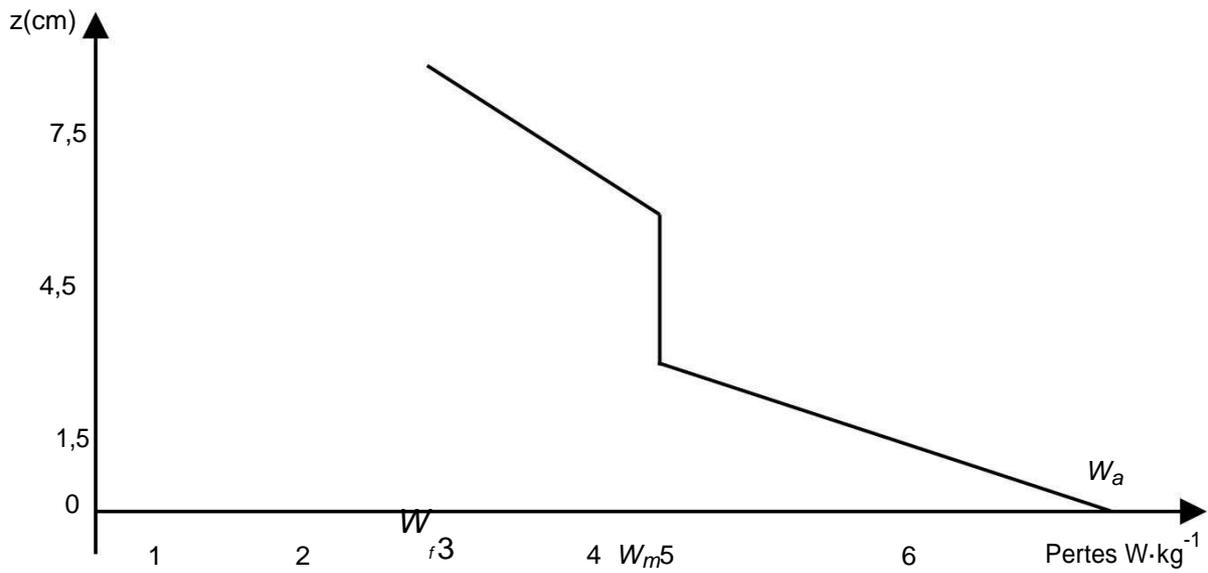
Diagramme de Fresnel



Document Réponse N°4 : « Pertes ferromagnétiques de l'induit »

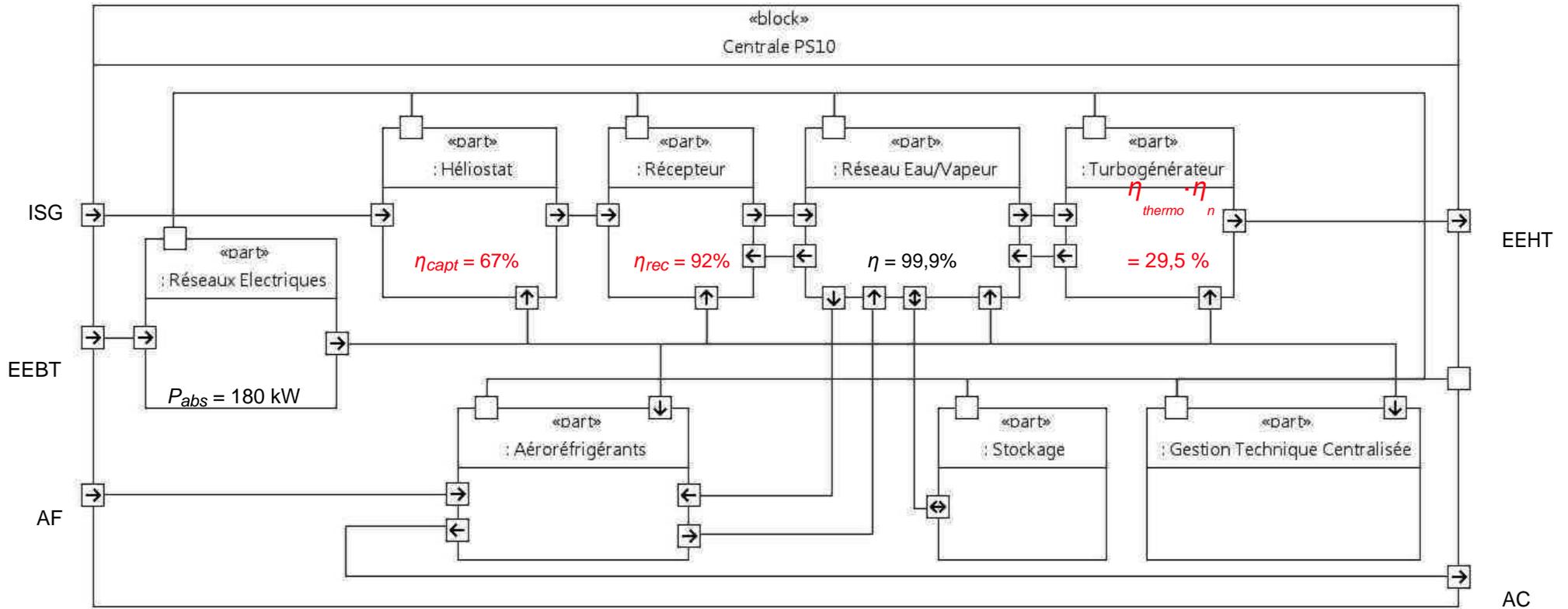


I- Estimation des pertes massiques



II- Profil des pertes massiques dans une dent

Document réponse N°5 : « Diagramme IBD Centrale PS10 »



Légende :

EEBT : Énergie Électrique BT

ISG : Irradiance Solaire Globale portée par la direction du soleil $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

AF : Air Froid

AC : Air Chaud