

SESSION 2016

AGRÉGATION CONCOURS EXTERNE

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Options : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique,
Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique,
Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des
constructions.

ÉPREUVE DE SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Durée : 6 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : *La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.*

Tournez la page S.V.P.

Ce sujet comporte :

- la présentation et le travail demandé pages 2 à 23 ;
- les documents réponses pages 24 à 30.

CENTRALE SOLAIRE A TOUR PS 10

1. PARTIE 1 - PRÉSENTATION

1.1. Contexte

Les ressources en énergie fossile étant limitées, nos sociétés s'orientent peu à peu vers le développement des technologies permettant l'exploitation d'énergies dites renouvelables. Parmi ces énergies, l'énergie solaire est la mieux répartie sur terre et elle est capable de couvrir les besoins énergétiques mondiaux. Ainsi 1 % des surfaces arides et semi-arides terrestres serait capable de couvrir les consommations mondiales en énergie électrique.

Les solutions technologiques permettant d'exploiter la ressource solaire sont nombreuses et aujourd'hui suffisamment matures pour construire des centrales solaires industrielles. Parmi ces solutions technologiques, on compte les centrales thermiques à concentration à tour, telles que la centrale PS 10, installée dans la province de Séville dans le sud de l'Espagne, qui est un prototype des centrales à tour commercialisées aujourd'hui par la société ABENGOA Solar.

1.2. Centrale à tour PS 10

La centrale à tour PS 10 est composée d'un champ d'héliostats pour une surface réceptrice de 75 500 m², réfléchissant les rayons solaires sur un récepteur, ou « bouilleur », placé en haut d'une tour.

Ce récepteur convertit le flux solaire rayonnant en un débit de vapeur d'eau saturante à une pression de l'ordre de 40 bars et une température de 250°C.



Figure N°1 : vue du champ d'héliostats et de la tour de la centrale PS10

Le débit de vapeur saturante produit alimente une turbine à vapeur qui convertit la puissance thermodynamique de la vapeur en une puissance mécanique. Cette turbine entraîne un alternateur d'une puissance utile nominale de 11 MW qui convertit la puissance mécanique en puissance électrique délivrée au réseau.

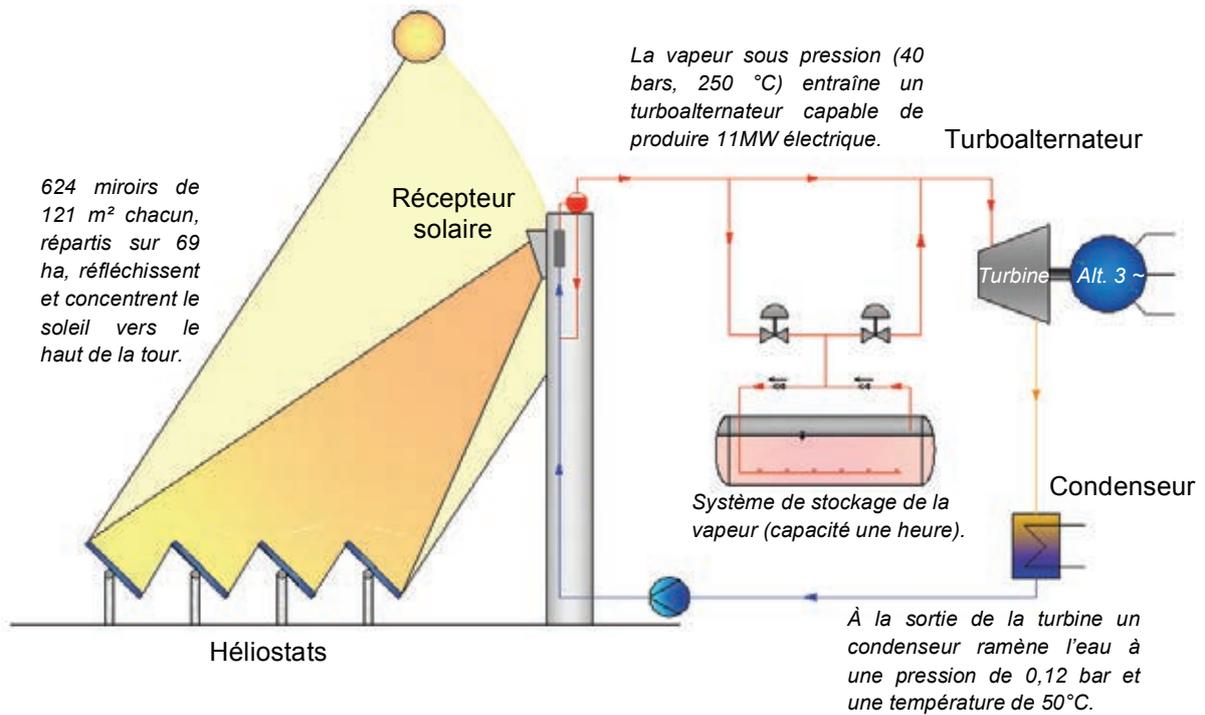


Figure N°2 : schéma de principe de la centrale PS10

1.3. Modélisation structurelle et fonctionnelle de la centrale

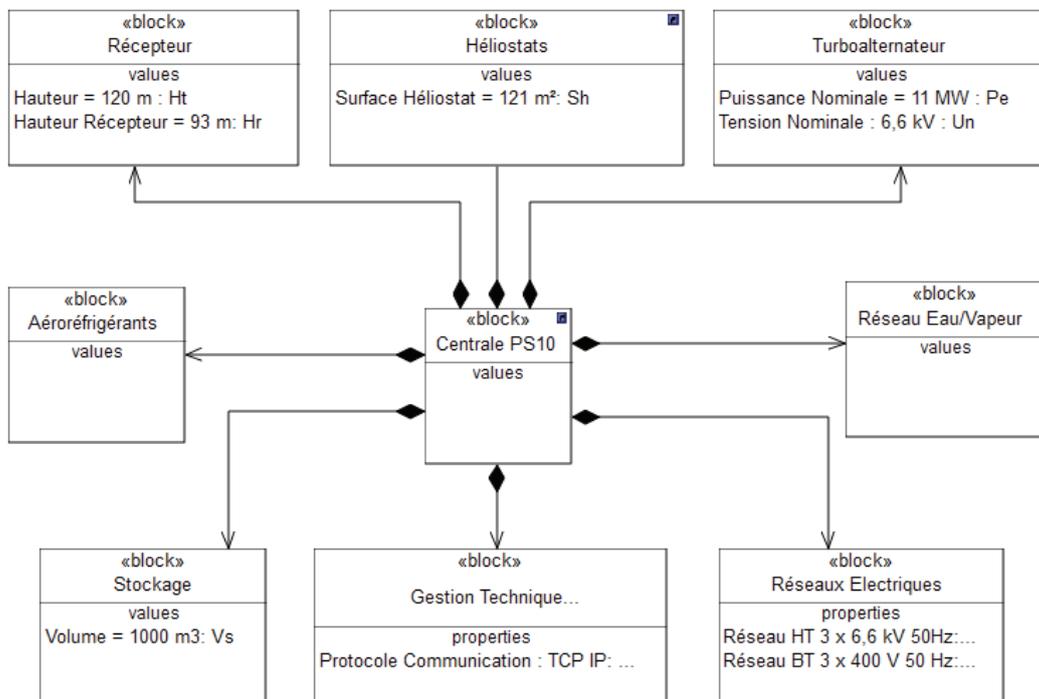


Figure N°3 : diagramme de définition de bloc de la centrale PS 10

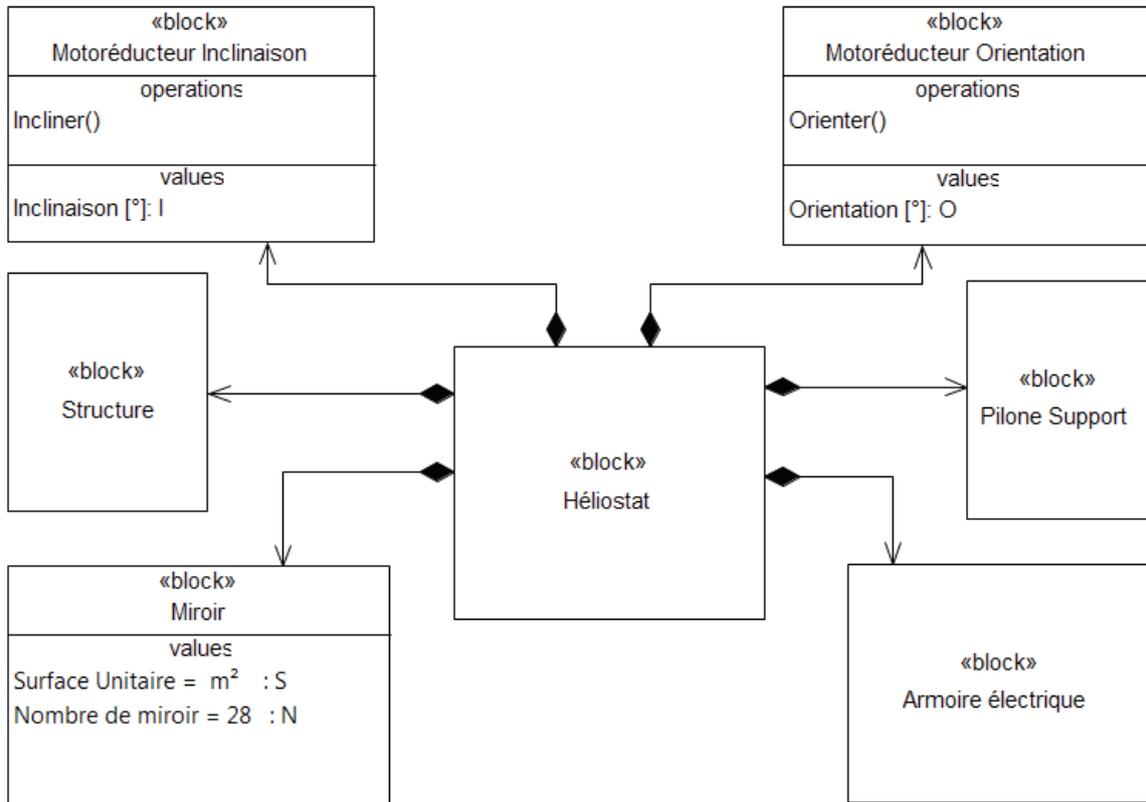


Figure N°4 : diagramme de définition de bloc d'un héliostat

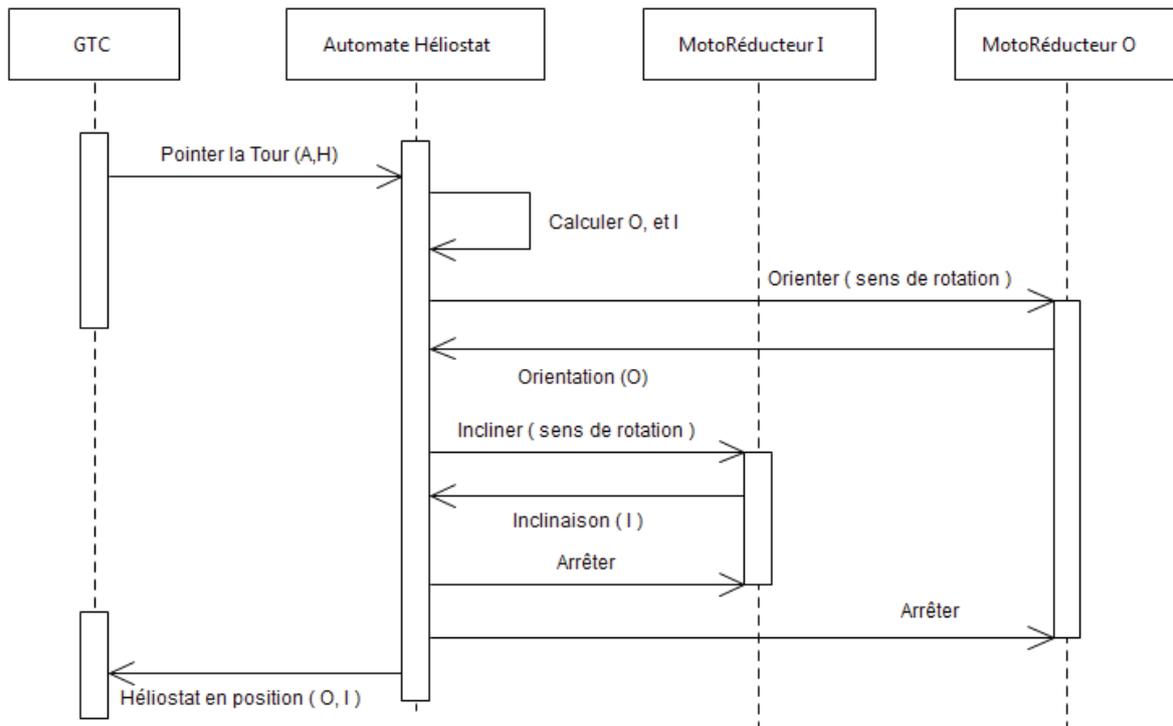


Figure N°5 : diagramme de séquence du pointage d'un héliostat

1.4. Problématique

L'étude proposée vise à évaluer les performances énergétiques et la viabilité économique d'une centrale solaire à tour, à partir d'une modélisation des transferts et conversions de puissances depuis la captation sur les surfaces réfléchissantes, jusqu'à la réinjection sur le réseau de distribution de l'électricité produite.

La partie 2 s'intéresse au champ d'héliostats. La modélisation des pertes permet de déterminer le flux de puissance rayonnée parvenant au récepteur. Par ailleurs, l'analyse des héliostats permet de calculer la capacité de concentration du flux lumineux, dont dépendent directement la taille et les performances du récepteur.

La partie 3 vise à modéliser les flux de chaleur dans le récepteur afin d'en déterminer le rendement.

La partie 4 cherche à déterminer le rendement du cycle thermodynamique permettant de convertir le flux de chaleur en puissance mécanique.

La partie 5 s'intéresse à la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique pour en déduire le rendement.

Enfin, la partie 6 conduit à mettre en perspective les coûts d'investissement et de fonctionnement face à la production d'électricité, de façon à évaluer le coût de l'électricité produite par cette centrale solaire et la viabilité économique de l'installation à moyen terme.

2. PARTIE 2 - MODÉLISATION DE LA CAPTATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Objectif : évaluer la puissance rayonnée vers le récepteur, le rendement du champ d'héliostats et déterminer la capacité de concentration du système de captation.

L'objectif recherché lors de la conception du champ héliostatique est de récupérer, au niveau du récepteur thermique, l'équivalent de la puissance rayonnée par le soleil sur les 75 500 m² de surface réfléchissante, tout en limitant la surface du champ héliostatique.

Cette puissance théorique est réduite suite à différents effets :

- l'inclinaison des panneaux par rapport à la direction du rayonnement solaire direct conduit à une surface apparente plus faible (facteur d'inclinaison η_{inc}) ;
- la réflexion sur les miroirs n'est pas parfaite (facteur de réflexion η_{refl}) ;
- la distance parcourue par le rayonnement entre l'héliostat et le récepteur thermique conduit à une absorption dans l'air (qui dépend de l'humidité de l'air, de la quantité d'aérosols et des particules de poussière en suspension). Cette absorption dépend de la distance entre chaque héliostat et la tour. Le rendement associé est appelé rendement de transmission, il est noté η_{trans} ;
- la position relative des héliostats peut générer une ombre d'un héliostat sur l'autre réduisant la surface réfléchissante. Le rendement associé à ce phénomène est noté η_{omb} ;
- la position relative des héliostats peut générer un masque empêchant une partie du rayonnement réfléchi par un héliostat d'atteindre la tour. Le rendement associé à ce phénomène est noté η_{mas} .

2.1. Facteur d'inclinaison

Objectif : déterminer le facteur d'inclinaison en un point quelconque du champ d'héliostats.

La position du soleil dans le ciel est variable au cours de la journée et selon les saisons.

La figure N°6 définit les paramètres géométriques à prendre en compte à un instant donné pour décrire la réflexion du rayonnement solaire de chaque héliostat sur le récepteur.

La direction \vec{x}_2 indiquant la position du soleil dans le ciel est définie par deux angles : l'azimut noté A et la hauteur notée H .

Les héliostats doivent se déplacer angulairement de façon à faire converger les rayons du soleil vers le récepteur thermique situé en haut de la tour, quelle que soit la position du soleil.

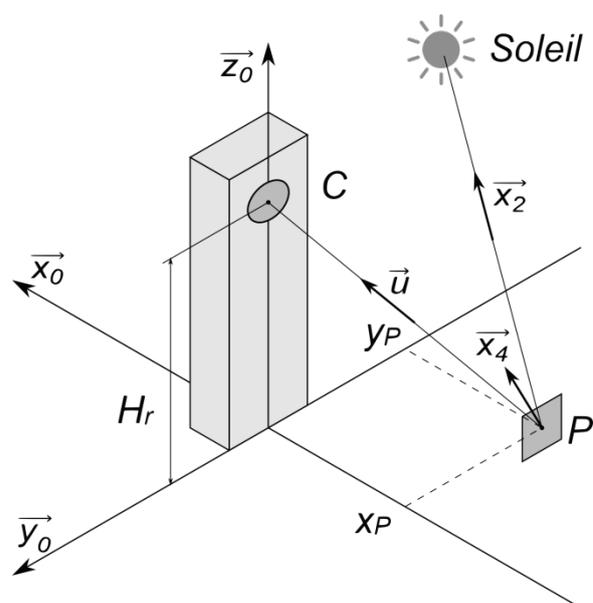


Figure N°6 : paramétrage

La motorisation de chaque héliostat se fait suivant deux axes :

- le premier axe assure une rotation d'axe vertical par rapport au sol, d'angle noté O ;
- le second axe assure une rotation d'axe horizontal, d'angle noté I .

Suite aux mouvements coordonnés du soleil et de l'héliostat, la surface réfléchissante n'est pas perpendiculaire aux rayons du soleil et la surface apparente captée est d'autant plus faible que la normale à l'héliostat \vec{x}_4 est inclinée par rapport à la direction des rayons solaires \vec{x}_2 .

La figure N°7 définit les changements de bases.

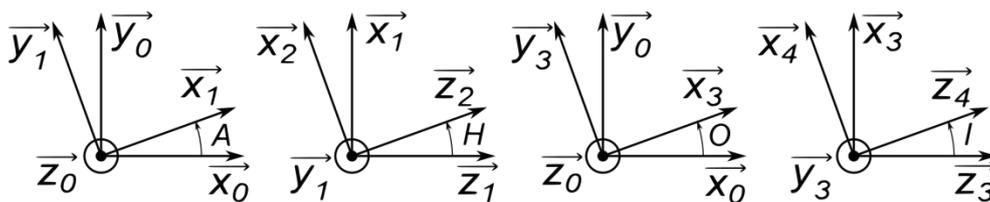


Figure N°7 : changements de bases

Question 1 : à partir du diagramme fourni figure N°5, expliciter la manière dont les héliostats adoptent leur position de fonctionnement.

Question 2 : proposer un schéma cinématique en perspective représentant les mouvements de l'héliostat, en précisant le paramétrage (bases et angles).

La position du soleil est définie par deux angles, l'azimut A et la hauteur H , calculés à partir de l'heure, et de la date par un calculateur central. Ces deux angles sont transmis au système de contrôle de chaque héliostat qui détermine lui même la position à atteindre pour renvoyer le flux rayonné vers le récepteur thermique.

Le vecteur unitaire pointant de l'héliostat vers le récepteur thermique est noté :

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix}$$

Question 3 : déterminer les expressions permettant de calculer explicitement les paramètres de position de l'héliostat (orientation O et inclinaison I) en fonction des paramètres de position du soleil (azimut A , hauteur H) et des composantes du vecteur \vec{u} .

En déduire l'expression du facteur d'inclinaison $f_i = \frac{S_a}{S_H}$ liant la surface de la section du flux lumineux incident (surface apparente) S_a et la surface réfléchissante de l'héliostat S_H , en fonction de : O, I, u_x, u_y, u_z .

Le facteur d'inclinaison f_i n'est pas constant et dépend de la position du soleil. Afin de réaliser le dimensionnement de la centrale solaire, il faut connaître une valeur moyenne de ce facteur d'inclinaison sur l'ensemble d'une année. Ce calcul ne peut être fait que numériquement.

Une bibliothèque informatique propose quatre fonctions :

Azimut (jour,minute), Hauteur (jour,minute), Orientation (Azimut,Hauteur) et Inclinaison (Azimut,Hauteur).

Les fonctions Azimut (jour,minute) et Hauteur (jour,minute) renvoient les angles A et H en fonction du paramètre jour (numéro du jour de l'année, entre 1 et 365) et du paramètre minute (nombre de minutes écoulées depuis le début du jour, à 0h00, admettant une valeur entre 1 et 24×60). Ces angles peuvent être négatifs (en particulier la nuit).

Les fonctions Orientation (Azimut,Hauteur) et Inclinaison (Azimut,Hauteur) renvoient les angles O et I en fonction des paramètres et de la position du soleil, à partir des relations établies précédemment.

Question 4 : proposer une fonction $f_i(X_p, Y_p)$ permettant de calculer par simulation numérique le facteur d'inclinaison moyen annuel diurne d'un héliostat situé aux coordonnées : $(X_p ; Y_p) = (-200 \text{ m} ; 100 \text{ m})$ à partir des résultats précédents et de la bibliothèque, dans un langage de calcul numérique courant (Scilab, C, Python, Java ou Fortran) ou en pseudo-code.

2.2. Rendement de l'ensemble de captation

Objectifs : déterminer le rendement du champ d'héliostats.

Pour obtenir des valeurs moyennes annuelles représentatives des rendements définis précédemment, il convient de réaliser (comme dans la question 4) des calculs numériques. Les résultats de ces calculs conduisent aux valeurs suivantes :

- le facteur d'inclinaison $\eta_{inc} = 0,86$;
- le facteur de réflexion $\eta_{refl} = 0,88$;
- le facteur de transmission $\eta_{trans} = 0,95$;
- le facteur d'ombrage $\eta_{omb} = 0,96$;
- le facteur de masque $\eta_{mas} = 0,97$.

Question 5 : à partir de ces résultats, déterminer le rendement de l'ensemble de captation, c'est-à-dire le rapport $\eta_{capt} = \frac{E}{I_{SG} \cdot S_{rt}}$ où I_{SG} est l'irradiance solaire globale au niveau du sol portée par la direction du vecteur position du soleil (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), S_{rt} est la surface de miroirs installée ($75\,500 \text{ m}^2$) et est la puissance rayonnée parvenant effectivement sur le récepteur thermique.

En déduire la valeur de E pour une irradiance solaire globale de $1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ correspondant au maximum estival.

2.3. Capacité de concentration du rayonnement

Objectif : déterminer la taille de la zone éclairée et la densité de puissance, en vue du dimensionnement du récepteur thermique.

Idéalement, une source lumineuse ponctuelle située à l'infini peut, sur une surface réfléchissante parabolique parfaite, être concentrée en un point (concentration infinie). Les héliostats sont constitués de 28 miroirs plans, réglés pour approcher globalement un miroir parabolique dont le foyer se situe sur le récepteur si \vec{x}_4 et \vec{u} sont confondus.

Dans la réalité, plusieurs effets limitent le niveau de concentration :

- le soleil n'est pas une source ponctuelle à l'infini, la taille du disque solaire conduit à une tache circulaire sur le récepteur de diamètre non négligeable ;
- les systèmes d'orientation et d'inclinaison des héliostats peuvent présenter des erreurs de positionnement ;
- les héliostats se déforment sous l'effet de la gravité de manière variable en fonction de la position angulaire de l'héliostat.

Influence du disque solaire

Le soleil a un diamètre de $1,4 \cdot 10^9$ m et se situe à une distance d'environ $150 \cdot 10^9$ m de la terre. En tout point de réflexion sur le miroir de l'héliostat, le diamètre du soleil est vu comme un secteur angulaire qui se conserve après réflexion, si bien que même avec des miroirs parfaitement paraboliques, le rayonnement solaire se répartit au niveau du récepteur sous forme d'une tache circulaire d'un diamètre de 5,6 m.

La déformation des surfaces réfléchissantes augmente encore la taille de la tache. Cet étalement du flux rayonné réduit la concentration et donc les performances du récepteur.

Déformation de la structure porteuse de l'héliostat

La structure porteuse de l'héliostat se déforme sous l'action du poids des miroirs et de la structure métallique elle-même. Cette déformation ne peut pas être compensée lors des réglages du foyer car elle dépend de l'inclinaison de l'héliostat : en position verticale, la déformation due au poids est minimale tandis qu'en position horizontale, elle est maximale. L'étude se place dans le pire des cas : la position horizontale. Les autres efforts perturbateurs, comme le vent, ne sont pas pris en compte.

La structure porteuse de l'héliostat est constituée de petites poutres de fixation des miroirs régulièrement réparties, supportées par 6 poutres transversales, elles-mêmes supportées par une poutre unique fixée au pilier (figure N°8).

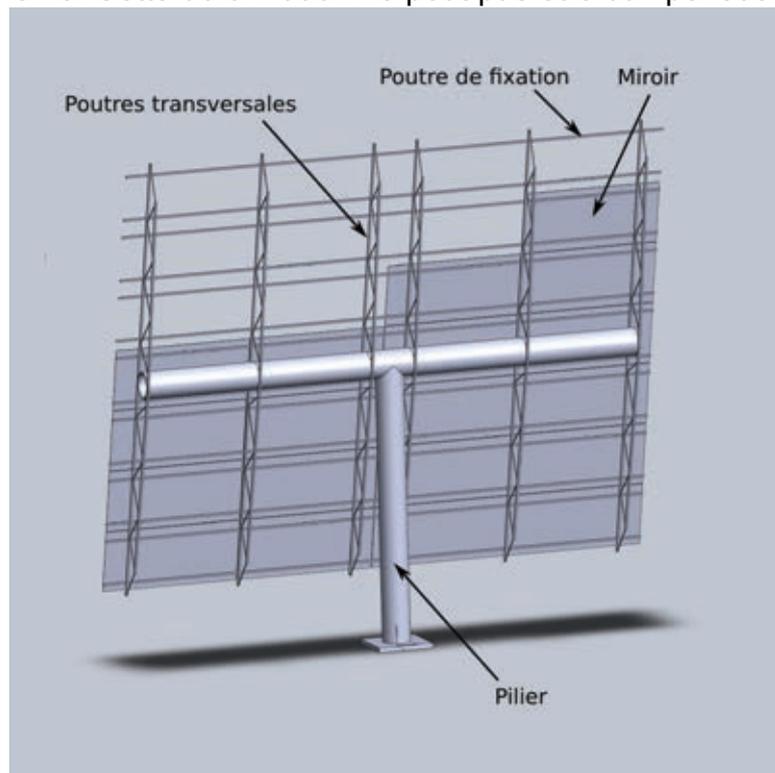


Figure N°8 : structure d'un héliostat

L'étude suivante porte sur une des 6 poutres transversales, de longueur $L = 10$ m encastée au bâti en son milieu, soumise à un chargement linéique uniforme p (figure N°9).

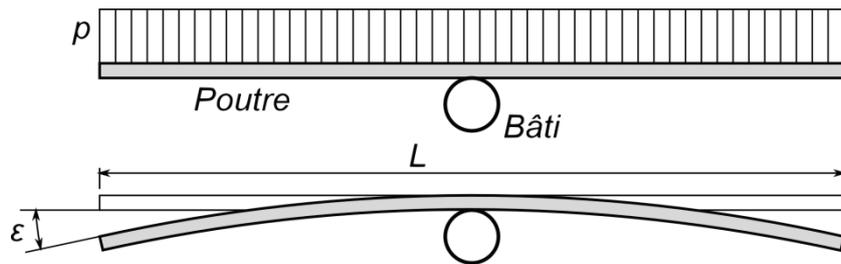


Figure N°9 : chargement et déformation de la structure porteuse d'un héliostat

Lorsque le panneau est horizontal, la charge répartie conduit à un défaut angulaire de la normale au miroir, maximal en bout de poutre. Cet angle doit se limiter à une valeur maximale de $1 \cdot 10^{-3}$ rad pour ne pas trop dégrader la concentration du faisceau.

Question 6 : déterminer littéralement, par un calcul de résistance des matériaux (dans le cadre de l'hypothèse de Bernoulli), l'angle ε en bout de poutre, suite à un chargement linéique p (en $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$), en fonction de la longueur L de la poutre, du moment quadratique de flexion I_z et du module d'Young E du matériau.

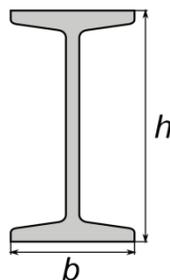


Figure N°10 : paramétrage de la section d'un IPN

Les poutres IPN sont réputées pour leur bon rapport rigidité/poids, pour les sollicitations de flexion. Les bases normalisées de poutres IPN donnent pour l'IPN80 en acier les propriétés suivantes :

- une masse linéique $5,9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$;
- une aire de la section $7,6 \text{ cm}^2$;
- un moment quadratique de flexion $I_z = 78 \text{ cm}^4$;
- une hauteur $h = 80 \text{ mm}$;
- une largeur $b = 42 \text{ mm}$;
- un module d'Young $E = 210 \text{ GPa}$.

Dans un premier temps et afin de simplifier l'étude, on ne considérera que la charge linéique due au poids propre de la poutre.

Question 7 : déterminer numériquement l'angle ε en bout de poutre dans le cas d'un IPN80. Cette poutre peut-elle convenir ?

Question 8 : déterminer la hauteur et la masse d'une poutre IPN de section homothétique à celle de l'IPN80 qui permettrait de satisfaire l'angle maximal de $1 \cdot 10^{-3}$ rad. Conclure sur le choix d'une solution par poutre IPN.

La solution adoptée par le constructeur est une poutre en treillis, constituée de deux longerons en acier de section carrée de côté a , reliés par des barres transversales. La sollicitation de flexion est supposée intégralement supportée par les longerons. Dans la réalité cette poutre a un moment quadratique variable et h varie le long de la poutre. Pour simplifier le calcul, on adoptera une constante $h = 0,4$ m.

Le poids des miroirs conduit à une charge répartie $p_m = 500 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ sur la poutre et l'acier a pour masse volumique $\rho_a = 7,8 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

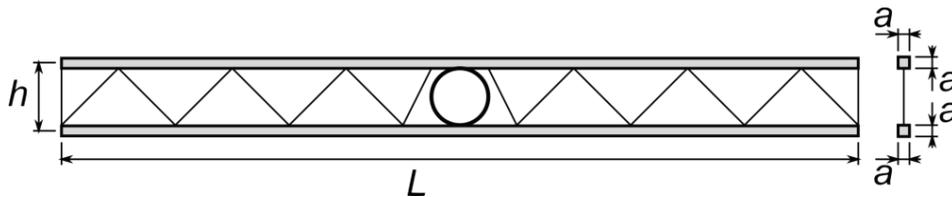


Figure N°11 : paramétrage de la poutre treillis

Question 9 : déterminer le moment quadratique de flexion de la poutre constituée des deux longerons, en négligeant a devant h , ainsi que la masse linéique, en fonction de L , a et h .

En déduire la valeur de a permettant d'assurer un angle ε maximal de $1 \cdot 10^{-3}$ rad pour une charge linéique supportée de $500 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, en tenant compte du poids propre de la poutre et en négligeant la participation des barres transversales.

Conclure quant au choix d'une solution de réalisation de la poutre sous forme d'un treillis.

Le cumul des diverses sources d'erreurs (erreur de positionnement de l'héliostat, déformation de la structure, réglages imparfaits, planéité des miroirs, irrégularités microscopiques, etc.) conduit à un écart maximal entre la normale au miroir et la direction théorique parfaite de l'héliostat de $\pm 2,5 \cdot 10^{-3}$ rad. Cette erreur affectant aléatoirement les 28 miroirs des 624 héliostats, il en résulte une tache plus large que la tache due au disque solaire, diminuant d'autant la capacité de concentration du flux de rayonnement. Les héliostats s'étendent jusqu'à une distance de 600 m environ de la tour.

Question 10 : déterminer la taille de la tache lumineuse sur le récepteur solaire ainsi que la puissance thermique surfacique moyenne reçue par le récepteur. En déduire le facteur de concentration.

La cavité du récepteur présente une hauteur de 12 m et une largeur de 14 m. Conclure sur l'adéquation des dimensions du four à la capacité de concentration du champ de captation.

3. PARTIE 3 - MODÉLISATION THERMIQUE DU RÉCEPTEUR

Objectif : modéliser le comportement thermique du récepteur et déterminer les ordres de grandeur du rendement de conversion.

3.1. Description du récepteur

Le récepteur solaire de la centrale thermique PS10 a une forme de cavité orientée au nord. Il est composé d'un échangeur de chaleur appelé bouilleur permettant de transformer le rayonnement concentré par les héliostats en chaleur. Cette chaleur sert à produire de la vapeur saturante à une température de l'ordre de 250 °C, permettant d'alimenter la turbine.

Sur la face arrière du bouilleur est disposée une paroi isolante. Cette paroi est composée d'une tôle d'acier ayant subi un traitement de surface, lui conférant une faible émissivité, et de laine minérale sur une épaisseur moyenne de 30 centimètres. Sur la face avant, une large ouverture permet au rayonnement d'entrer dans la cavité (figure N°12).

Le bouilleur est composé de 4 panneaux rectangulaires dont la hauteur h et la largeur l valent respectivement 12 mètres et 5,3 mètres. Ces panneaux sont disposés en arc de cercle sur un rayon de 7 m.

L'ensemble de l'énergie portée par le rayonnement solaire incident sur ce bouilleur n'est pas intégralement converti en chaleur. Ce dernier fait en effet l'objet de nombreuses pertes :

- par réflexion ;
- par réémission sous forme de rayonnement infrarouge ;
- par échange convectif avec l'air ;
- par transmission au travers de la paroi isolante disposée en face arrière.

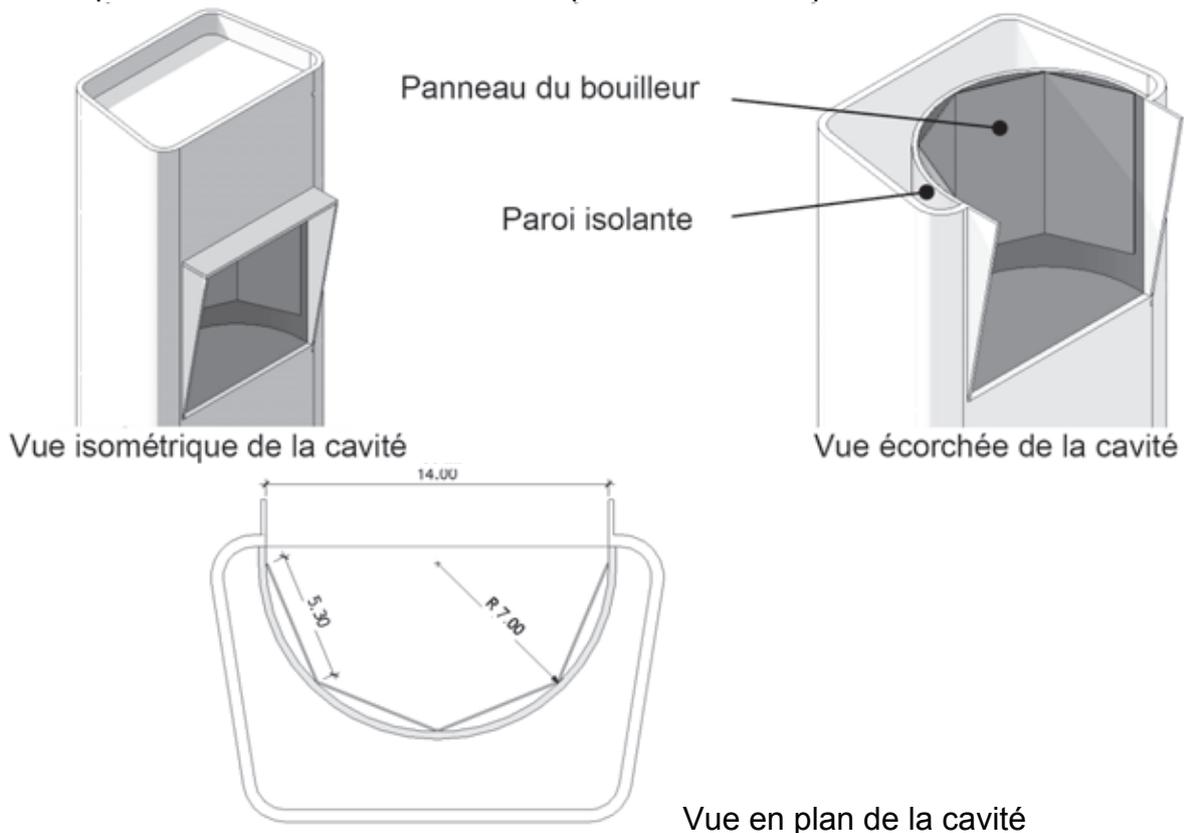
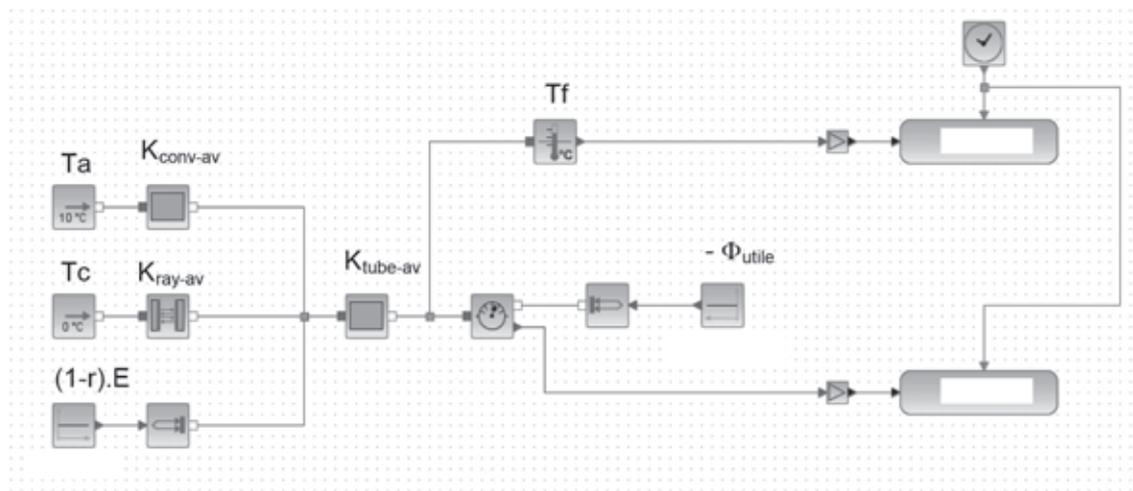


Figure N°12 : définition géométrique de la cavité du récepteur solaire

3.2. Modélisation thermique statique du récepteur

On souhaite valider une modélisation multi-physique du récepteur.



Légende :

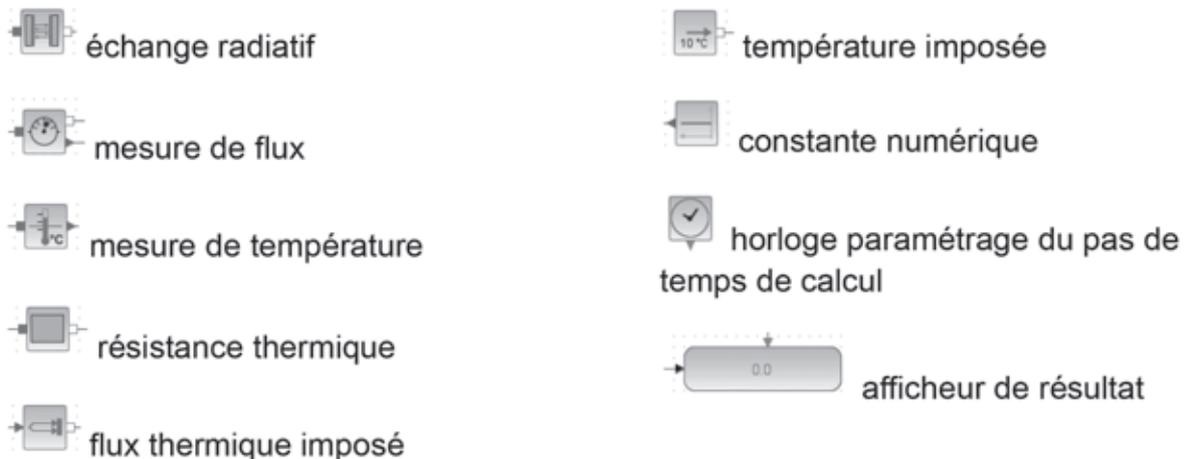


Figure N°13 : modélisation multi-physique acausale simplifiée du bouilleur en régime permanent établi

On donne :

TABLEAU N° 1 : « MODELISATION THERMIQUE »			
Notation	Nom de la grandeur	Unité	Valeur
r	coefficient de réflexion lumineuse du bouilleur	Sans	2 %
ε	émissivité infra rouge du bouilleur	Sans	92 %
K_{ray-av}	coefficient d'échange par rayonnement sur la face avant du bouilleur	$kW \cdot K^{-1}$	2,54
$K_{conv-av}$	coefficient d'échange par convection sur la face avant du bouilleur	$kW \cdot K^{-1}$	6,65
$K_{tube-av}$	coefficient de transmission global entre la surface du bouilleur et le fluide caloporteur	$kW \cdot K^{-1}$	5 000
$K_{glob-ar}$	coefficient de transmission global en face arrière du bouilleur	$kW \cdot K^{-1}$	0,098

Afin de simplifier la modélisation, les pertes thermiques du bouilleur en face arrière seront négligées.

Question 11 : discuter de la validité de cette hypothèse.

Question 12 : en se basant sur la figure N°13, montrer que l'expression du rendement du récepteur dans le cadre de cette modélisation est :

$$\eta_{rec} = \frac{1}{\left(1 + \frac{K_{conv-av}}{K_{tube-av}} + \frac{K_{ray-av}}{K_{tube-av}}\right)} \left[1 - r - \frac{K_{conv-av}}{E} \cdot (T_f - T_a) - \frac{K_{ray-av}}{E} \cdot (T_f - T_c)\right]$$

Où :

- T_f est la température du fluide caloporteur en °C ;
- T_a est la température de l'air extérieur en °C ;
- T_c est la température rayonnante du ciel en °C ;
- E est l'éclairement reçu par le récepteur en W ;
- r est le coefficient de réflexion lumineuse du récepteur.

En déduire alors la valeur du rendement du récepteur, en utilisant les valeurs suivantes :

- $E = 50 \cdot 10^6 \text{ W}$;
- $T_f = 250 \text{ °C}$;
- $T_a = 10 \text{ °C}$;
- $T_c = 0 \text{ °C}$.

Le rendement du récepteur varie avec la valeur de l'éclairement et donc de l'irradiance solaire. Afin de prévoir la productivité de la centrale, il est utile de connaître la valeur de l'irradiance minimale en dessous de laquelle aucun flux thermique utile n'est exploitable par le cycle thermodynamique.

Question 13 : en exploitant l'expression établie et les résultats de la partie 2, déterminer la valeur de l'éclairement minimal E et de l'irradiance minimale ISG_{min} permettant de commencer à produire un flux de vapeur à 250 °C. On se fixera les valeurs suivantes :

- $T_a = 10 \text{ °C}$;
- $T_c = 0 \text{ °C}$.

Pour la suite du sujet, le rendement du récepteur en fonctionnement nominal est estimé à : $\eta_{rec} = 0,92$.

4. PARTIE 4 - MODELISATION DU CYCLE THERMODYNAMIQUE

Objectif : estimer le rendement du cycle thermodynamique.

L'étude du rendement du cycle thermodynamique est réalisée dans le cadre des hypothèses suivantes :

- la vapeur délivrée à la turbine et au stockage est saturante, et sa température est de 250°C ;
- l'eau revenant au récepteur depuis le refroidisseur est à la limite de l'ébullition, et sa température est de 50°C.

4.1. Rendement de Carnot

Question 14 : déterminer le rendement de Carnot de ce cycle thermodynamique.

4.2. Cycle de Rankine

Le cycle de Rankine est un autre modèle de comportement adapté à la description du cycle thermodynamique de la centrale.

Ce cycle est composé de quatre transformations élémentaires :

- détente réelle dans la turbine ;
- condensation isobare dans le condenseur ;
- compression adiabatique réversible (pompage isentropique) ;
- vaporisation isobare dans l'évaporateur ou bouilleur.

Afin d'intégrer les irréversibilités de la détente dans la turbine, un rendement isentropique de 90 % est adopté.

Le rendement isentropique est défini par le rapport :

$$\eta_{is} = \frac{(H_{et} - H_{st})}{(H_{et} - H_{stis})}$$

Avec :

- H_{et} enthalpie de la vapeur à l'entrée de la turbine ;
- H_{st} enthalpie de la vapeur à la sortie de la turbine ;
- H_{stis} enthalpie de la vapeur à la sortie de la turbine si la détente est isentropique.

Question 15 : tracer l'allure du cycle de Rankine intégrant les imperfections de la turbine sur le diagramme de Mollier (H-S) du document réponse N°1.

Déterminer à partir de la table thermodynamique de l'eau (voir document technique N°1 page suivante) la valeur du rendement thermodynamique du cycle tracé.

Question 16 : conclure sur les différences de résultats entre ces deux modélisations.

Pour la suite du sujet, le rendement thermodynamique est estimé à $\eta_{thermo} = 0,31$.

4.3. Caractéristiques physiques de l'eau (document technique N°1)

θ °C	P bar	Phase liquide (eau)										Phase gazeuse (vapeur)									
		ρ kg·m ⁻³	Hliqsat kJ·kg ⁻¹	Sliqsat kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Cp kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	μ·10 ⁶ Pa·s	λ W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	Pr	α _v ·10 ⁴ K ⁻¹	ρ kg·m ⁻³	Hvapsat kJ·kg ⁻¹	Svapsat kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Cp kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	μ·10 ⁶ Pa·s	λ·10 ³ W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	Pr					
0,01	0,01	999,8	0,001	0,15	4,218	1786	0,569	13,2	-0,6	0,005	2501	9,05	1,86	8,11	17,6	0,86					
10	0,01	999,6	42,0	0,27	4,194	1304	0,587	9,32	0,7	0,01	2519	8,83	1,87	8,50	18,2	0,87					
20	0,02	998,2	83,9	0,39	4,182	1002	0,603	6,95	1,8	0,02	2538	8,62	1,88	8,90	18,8	0,89					
30	0,04	995,6	125,7	0,51	4,179	798,3	0,618	5,4	3,2	0,03	2556	8,43	1,89	9,31	19,5	0,90					
40	0,07	992,2	167,5	0,63	4,179	653,9	0,631	4,33	3,9	0,05	2574	8,24	1,90	9,70	20,2	0,91					
50	0,12	988	209,3	0,71	4,181	547,8	0,643	3,56	4,5	0,08	2592	8,07	1,91	10,10	20,9	0,92					
60	0,20	983,2	251,1	0,86	4,185	467,3	0,653	2,99	5,1	0,13	2609	7,91	1,92	10,50	21,6	0,93					
70	0,31	977,7	293,0	0,97	4,191	404,8	0,662	2,56	5,7	0,20	2626	7,76	1,95	10,89	22,4	0,95					
80	0,47	971,8	334,9	1,08	4,198	355,4	0,67	2,23	6,3	0,29	2643	7,61	1,97	11,29	23,2	0,96					
90	0,70	965,3	376,9	1,19	4,207	315,6	0,676	1,96	7	0,42	2660	7,48	2,00	11,67	24	0,97					
100	1,01	958,3	419,1	1,30	4,218	283,1	0,681	1,75	7,5	0,60	2676	7,35	2,03	12,06	24,9	0,99					
110	1,43	951	461,3	1,41	4,230	254,8	0,684	1,58	8,1	0,83	2691	7,23	2,08	12,45	25,8	1,00					
120	1,99	943,1	503,7	1,52	4,244	231	0,687	1,43	8,6	1,12	2706	7,12	2,13	12,83	26,7	1,02					
130	2,70	934,8	546,3	1,62	4,262	210,9	0,688	1,31	9,2	1,50	2720	7,02	2,18	13,20	27,8	1,03					
140	3,61	926,1	589,1	1,73	4,282	194,1	0,688	1,21	9,7	1,97	2734	6,92	2,25	13,57	28,9	1,05					
150	4,76	916,9	632,2	1,83	4,306	179,8	0,687	1,13	10,3	2,55	2747	6,83	2,32	13,94	30	1,08					
160	6,18	907,4	675,5	1,93	4,334	167,7	0,684	1,06	10,7	3,26	2758	6,74	2,41	14,30	31,3	1,10					
170	7,92	897,3	719,1	2,03	4,366	157,4	0,681	1,01	11,3	4,12	2769	6,65	2,50	14,66	32,6	1,13					
180	10,03	886,9	763,1	2,13	4,403	148,5	0,677	0,967	11,9	5,16	2778	6,57	2,62	15,02	34,1	1,15					
190	12,55	876,0	807,5	2,23	4,446	140,7	0,671	0,932	12,6	6,40	2786	6,50	2,74	15,37	35,7	1,18					
200	15,55	864,7	852,4	2,33	4,494	133,9	0,664	0,906	13,3	7,86	2793	6,42	2,88	15,72	37,4	1,21					
210	19,08	852,8	897,7	2,42	4,550	127,9	0,657	0,886	14,1	9,59	2798	6,35	3,04	16,07	39,4	1,24					
220	23,20	840,3	943,7	2,52	4,613	122,4	0,648	0,871	14,8	11,62	2802	6,28	3,22	16,42	41,5	1,28					
230	27,98	827,3	990,3	2,61	4,685	117,5	0,639	0,861	15,9	13,99	2803	6,21	3,43	16,78	43,9	1,31					
240	33,48	813,6	1037,6	2,71	4,769	112,9	0,628	0,85	16,8	16,76	2803	6,14	3,66	17,14	46,5	1,35					
250	39,78	799,2	1085,8	2,80	4,866	108,7	0,616	0,859	18,1	19,98	2801	6,07	3,92	17,51	49,5	1,39					
260	46,94	784	1135,0	2,89	4,985	104,8	0,603	0,866	21,3	23,73	2796	6,00	4,22	17,90	52,8	1,43					
270	55,06	767,9	1185,2	2,97	5,134	101,1	0,589	0,882	24	28,09	2790	5,93	4,58	18,31	56,6	1,48					

5. PARTIE 5 - MODÉLISATION DE L'ALTERNATEUR

Objectif : estimer le rendement de la chaîne de conversion électromécanique.

La puissance mécanique, produite par la turbine à vapeur, subit une conversion électromécanique réalisée par une machine électrique tournante. Cette machine transfère l'énergie produite vers le réseau électrique auquel la centrale est raccordée à travers un transformateur. La machine est elle-même entraînée en rotation par la turbine à vapeur via un réducteur de vitesse. Les objectifs de cette partie consistent à établir un modèle de la machine électrique et à l'exploiter pour obtenir une estimation du rendement en puissance.

La machine de production électrique est un alternateur triphasé à rotor lisse, ce qui permet de négliger les effets d'une éventuelle variation de l'épaisseur d'entrefer le long de sa circonférence. Le stator accueille le bobinage de l'induit dont les phases sont couplées en étoile et connectées au réseau électrique de fréquence $f = 50$ Hz. Les tensions et courants produits sont supposés parfaitement sinusoïdaux. Le rotor reçoit le bobinage inducteur dans lequel le système d'excitation injecte un courant supposé continu.

La conception de ce genre de machines électriques très puissantes requiert une optimisation soignée du rendement. La première étape de conception est toujours conduite en utilisant des modèles analytiques. Les modèles en usage, complexes et très aboutis, conduisent à des estimations très réalistes. La seconde étape permet de valider les calculs et d'en affiner les résultats au moyen de simulations aux éléments finis.

Dans le cadre de cette étude, seule l'étape d'estimation par modèles analytiques est considérée. Premièrement, un modèle élémentaire de l'alternateur sera établi en exploitant quelques essais dont les résultats sont fournis. Deuxièmement, des pertes de différentes natures seront estimées. Troisièmement, le rendement sera évalué en prenant en compte des phénomènes physiques supplémentaires. Les résultats obtenus seront donnés avec quatre chiffres significatifs.

Les principaux paramètres du groupe turbo-alternateur sont les suivants :

- la puissance apparente nominale $S_n = 12$ MVA ;
- la puissance active nominale $P_n = 11$ MW ;
- la puissance réactive nominale $Q_n = 4,8$ Mvar ;
- la tension nominale entre phases $U_n = 6,6$ kV ;
- la tension d'alimentation de l'inducteur $U_f = 420$ V ;
- la résistance mesurée entre deux bornes de l'induit $R_c = 64$ m Ω .

Les principaux paramètres et constantes mécaniques sont les suivants :

- la vitesse de rotation nominale de la turbine $\Omega_n = 5\,300$ tr·min⁻¹ ;
- le rapport du réducteur de vitesse $R_r = 30/53$;
- la longueur active du rotor (longueur de l'alésage d'induit) $L_r = 300$ mm ;
- le diamètre du rotor $D_r = 700$ mm ;
- le diamètre extérieur de l'induit $D_e = 2$ m ;
- la masse volumique moyenne du rotor $\rho_r = 7\,650$ kg·m⁻³ ;
- la masse volumique moyenne du stator $\rho_s = 7\,800$ kg·m⁻³.

5.1. Modèle de Behn-Eschenburg

L'objectif de cette partie est l'identification des paramètres du modèle de Behn-Eschenburg (document réponse N°2) de l'alternateur en vue de déterminer le courant d'excitation nécessaire à la réalisation d'un point de fonctionnement dans la partie suivante. L'identification des paramètres R_i et L requiert, entre autres, d'exploiter la caractéristique présentée sur le document réponse N°3. Il s'agit de la caractéristique interne de l'alternateur. Sur l'axe des ordonnées, les tensions sont des tensions simples (tensions entre phase et neutre). Sur l'axe horizontal, est reporté le courant de l'inducteur (ou courant d'excitation). La caractéristique représente donc, en fonction du courant d'excitation I_f , l'évolution de la force électromotrice (FEM) interne. C'est aussi la tension d'induit lorsque l'alternateur ne débite aucun courant. Elle est obtenue à la vitesse de synchronisme.

Question 17 : les trois phases d'un alternateur ne peuvent *a priori* pas être modélisées séparément les unes des autres car elles sont couplées magnétiquement. Énoncer les conditions qui permettent cependant de réduire l'étude à celle d'une seule phase en exploitant un modèle équivalent monophasé ainsi que les limites de validité du modèle de Behn-Eschenburg.

Bien que l'une de ces conditions ne soit absolument pas vérifiée, on admettra cependant, à des fins de simplifications, que le modèle de Behn-Eschenburg peut être exploité. Dans ce cadre, on définit \underline{E}_r la force électromotrice (FEM) produite par l'inducteur, \underline{E} la FEM en charge et \underline{V} la tension d'induit tandis que \underline{I} est le courant d'induit débité par l'alternateur.

Question 18 : sur le document réponse N°2, compléter le schéma électrique associé au modèle de Behn-Eschenburg en repérant les tensions \underline{V} , \underline{E} et \underline{E}_r ainsi que le courant \underline{I} . Préciser ce que représentent les paramètres R_i et L de ce modèle. Sur le même document, compléter le diagramme de Fresnel associé au schéma électrique. Une notation symbolique complexe pourra être utilisée en association avec les vecteurs.

Question 19 : calculer, à partir des paramètres du groupe turbo-alternateur, l'intensité nominale I_n du courant d'induit de l'alternateur et son facteur de puissance nominal $F_{pn} = \cos \varphi$ ainsi que la résistance R_i du modèle de Behn-Eschenburg.

Question 20 : un essai en court-circuit est réalisé avec un courant inducteur d'intensité réduite $I_{fcc} = 54$ A. On relève l'intensité du courant d'induit $I_{cc} = 1$ kA. Établir la relation algébrique entre le courant d'induit, la force électromotrice de l'inducteur E_{fcc} et les deux paramètres du modèle. En déduire, à l'aide du document réponse N°3, la valeur de la réactance synchrone $X = L \cdot \omega$.

5.2. Pertes électriques de l'inducteur

Dans cette partie, on exploite le modèle précédent pour déterminer l'intensité du courant d'excitation nécessaire pour réaliser le point de fonctionnement nominal et en déduire les pertes de l'inducteur. On admettra que la résistance de l'induit et la chute de tension ohmique qu'elle occasionne sont négligeables devant les autres phénomènes. Pour les applications numériques, à défaut d'avoir su identifier la réactance synchrone, on pourra utiliser la valeur approximative suivante : $X = 2,6 \Omega$.

Question 21 : calculer la force électromotrice à vide (ou FEM interne) E_{r_n} au point de fonctionnement nominal. Préciser le décalage angulaire, noté θ , entre les tensions nominales E_{r_n} et V_n . En déduire l'intensité du courant d'excitation I_{fn} ainsi que les pertes électriques P_{Jf} de l'inducteur.

5.3. Pertes de l'induit

Les pertes de l'induit sont de deux natures : les pertes ferromagnétiques et les pertes électriques. On étudie successivement ces deux types de pertes.

5.3.1. Pertes ferromagnétiques

La figure N°14 représente une coupe du circuit magnétique de l'induit. Les conducteurs de l'induit sont logés dans des encoches de hauteur h_d , uniformément réparties, le long de la circonférence intérieure de l'anneau d'induit. Les encoches sont droites et de largeur b . Entre les encoches, sont situées les dents qui canalisent les lignes de champ magnétique. La largeur des dents à l'alésage est notée d_a et la largeur en fond est notée d_f . La partie extérieure de l'anneau d'induit, sans encoche ni dent, est la couronne. Sa hauteur radiale est notée h_c .

La figure N°15 illustre l'évolution de l'intensité de l'induction magnétique le long d'une ligne de champ traversant l'entrefer puis une dent. L'induction d'entrefer, à proximité immédiate de la surface du rotor, est notée B_e . Au niveau de l'alésage, l'induction à l'entrée de la dent est notée B_a . Sur le premier tiers de la hauteur de dent, l'intensité de l'induction évolue linéairement jusqu'à une valeur B_m maintenue constante sur le tiers intermédiaire de la dent. Sur le troisième tiers, l'induction est supposée évoluer linéairement jusqu'à la valeur B_f .

Dans un objectif de simplification, les hypothèses suivantes sont adoptées :

- la section droite d'une dent est approximée par un trapèze dont les bases d_a et d_f ont des longueurs égales à celles des arcs de cercles qui leur correspondent ;
- l'épaisseur de l'entrefer est négligée devant le rayon du rotor. Le diamètre d'alésage de l'induit et le diamètre du rotor sont supposés égaux ;
- à l'alésage, les largeurs des dents et des encoches sont égales ;
- la denture du rotor et ses effets sont ignorés.

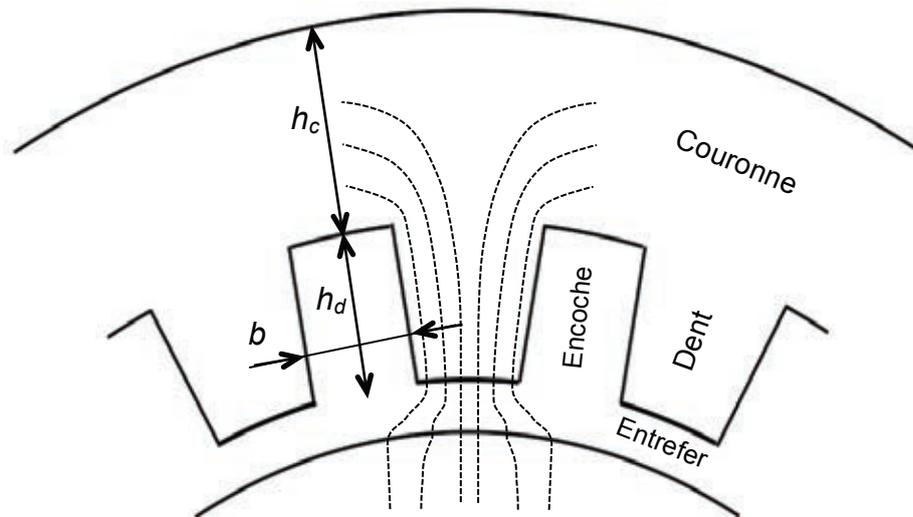


Figure N°14 : géométrie du circuit magnétique de l'induit

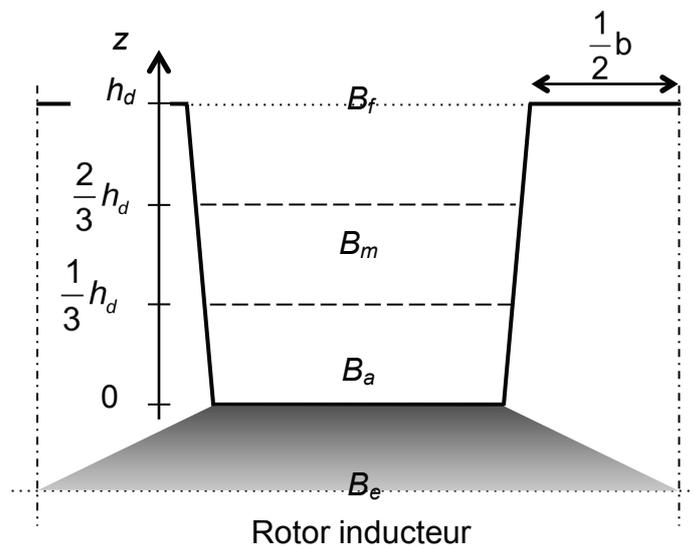


Figure N°15 : profil d'induction magnétique

Un assemblage de tôles minces réalisées à partir d'un alliage ferromagnétique et de silicium forme l'anneau magnétique du stator. Soumis à un champ magnétique variable, ce matériau est le siège de pertes. La qualité d'une tôle est définie par le niveau de ses pertes massiques spécifiées en $W \cdot kg^{-1}$ pour une induction magnétique de 1 T et à la fréquence de 50 Hz. Les tôles sont recouvertes d'un verni isolant et pressées les unes contre les autres. La figure N°16 présente les courbes caractéristiques de trois qualités de tôles différentes.

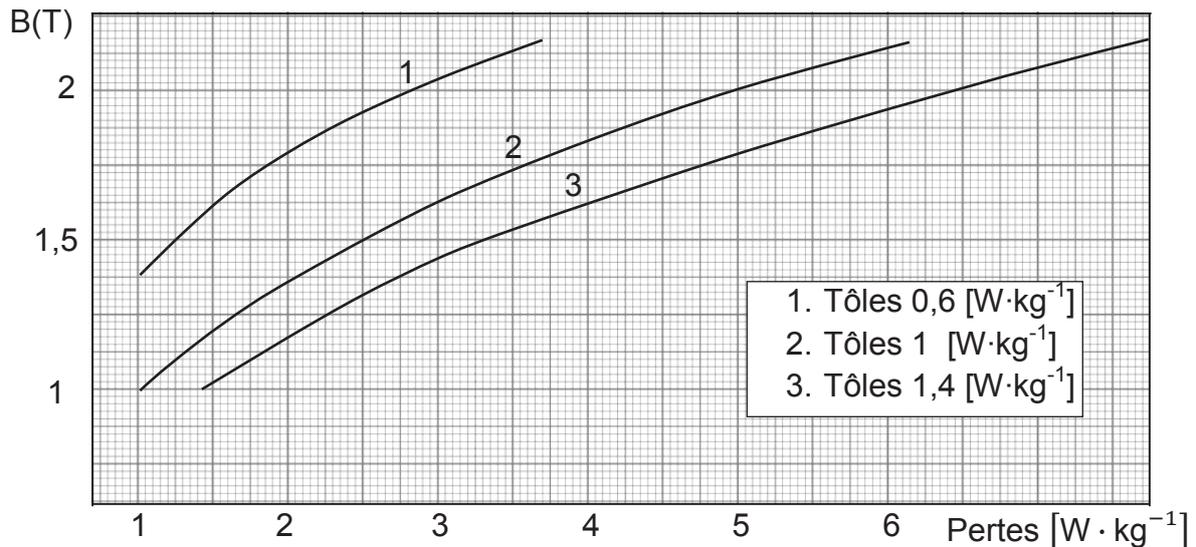


Figure N°16 : pertes massiques des tôles Fe-Si

Les valeurs suivantes seront utilisées :

- nombre de dents du stator $N_d = 54$;
- profondeur d'encoche (hauteur de dent) $h_d = 9$ cm ;
- hauteur radiale de la couronne $h_c = 24$ cm ;
- induction d'entrefer en fonctionnement à vide $B_e = 1,07$ T ;
- induction à mi-hauteur dans la dent en fonctionnement à vide $B_m = 1,7$ T ;
- induction dans la couronne en fonctionnement à vide $B_c = 1,6$ T ;
- qualité des tôles $1,4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour 1 T / 50 Hz.

Question 22 : quels phénomènes sont aux origines des pertes ferromagnétiques et quel est le rôle du silicium ?

Question 23 : calculer d'abord les inductions à vide B_a et B_f . Évaluer ensuite, pour chacune des trois valeurs caractéristiques de l'induction dans la dent, les pertes massiques W_a , W_m et W_f correspondantes.

Question 24 : représenter le profil des pertes massiques dans la dent en utilisant le document réponse N°4 et calculer la valeur moyenne W_d des pertes massiques dans la dent.

Question 25 : pourquoi n'est-il pas équivalent de calculer l'induction moyenne dans la dent pour en déterminer les pertes massiques moyennes ?

Ces pertes massiques, propres au matériau, doivent être majorées pour tenir compte, entre autres, des effets complexes du découpage des tôles et de la répartition réelle du champ magnétique qui est non uniforme sur les sections du chemin magnétique. Un coefficient multiplicateur $K_d = 2,4$ est appliqué au niveau des dents et un autre, $K_c = 1,4$ est appliqué à la couronne.

Question 26 : calculer séparément les pertes ferromagnétiques dans l'ensemble des dents, notées P_{Fd} , et les pertes ferromagnétiques dans la couronne, notées P_{Fc} .

Les pertes ferromagnétiques dans les dents et la couronne de l'induit ont été évaluées, à la question précédente, en se basant sur les niveaux d'induction lors du fonctionnement à vide. Or, l'induction magnétique dépend de la FEM interne. Au point nominal, elle est majorée de 14,6 % par rapport au fonctionnement à vide où elle se confond avec la tension d'induit V . Pour faire simple, il est d'usage de reprendre les résultats précédents et de les majorer en admettant que les pertes ferromagnétiques varient proportionnellement au carré de l'induction.

Question 27 : calculer les pertes ferromagnétiques totales de l'induit, notées P_{Ft} , au point de fonctionnement nominal.

5.3.2. Pertes électriques

Les pertes électriques de l'induit de l'alternateur ont plusieurs origines. Néanmoins, parce que les pertes Joule sont dominantes et pour des raisons de simplicité, les autres sources de pertes sont négligées dans cette question.

Question 28 : estimer les pertes Joule de l'induit, notées P_{Ji} , au point de fonctionnement nominal.

Pour évaluer correctement le rendement, il doit être tenu compte de différentes pertes supplémentaires qui ont été ignorées dans l'étude. Elles sont nombreuses et non négligeables.

- Pertes mécaniques :
 - par frottement aux paliers $P_{fp} = 18,72$ kW ;
 - par frottement fluide du gaz de refroidissement $P_{fg} = 34,20$ kW ;
 - du système de ventilation $P_v = 20,44$ kW ;
 - rendement du réducteur de vitesse $\eta_r = 98,9$ %.
- Pertes de l'induit :
 - par courant de Foucault dans les conducteurs de l'induit $P_{Fi} = 35,27$ kW ;
 - dans les têtes de bobines de l'induit $P_{Ti} = 2,116$ kW.
- Pertes de l'inducteur :
 - à la surface des pôles inducteurs $P_{Pf} = 5,514$ kW ;
 - pertes du générateur d'alimentation de l'inducteur $P_{ex} = 10,94$ kW.
- Autres pertes :
 - pertes résiduelles dispersées $P_r = 15,34$ kW ;
 - rendement du transformateur de sortie $\eta_{ts} = 99,3$ %.

5.4. Rendement

Question 29 : évaluer le rendement au point de fonctionnement nominal.

Pour la suite du sujet, le rendement du groupe réducteur-alternateur-transformateur, au point nominal, est estimé à : $\eta_n = 0,95$.

6. PARTIE 6 - RENTABILITÉ DE LA CENTRALE PS10

Objectif : l'objectif de cette partie est de faire le bilan des travaux précédents, afin d'établir l'ordre de grandeur du rendement, et d'évaluer la rentabilité économique de la centrale PS10. Cette partie peut être traitée sans avoir réalisé tout ou partie des questions 1 à 29.

Question 30 : à partir de l'ensemble des résultats établis précédemment, compléter le diagramme IBD (document réponse N°5) en y faisant apparaître les rendements des différentes parties étudiées.

Évaluer le rendement global de la centrale PS 10 en régime permanent établi nominal.

La fabrication de la centrale solaire PS10 a représenté un coût total de 35 millions d'euros. Le fabricant annonce une puissance électrique produite de 11 MW, avec un facteur de charge prévu de 25 % (c'est-à-dire que la centrale ne produit que l'équivalent de 6 heures à pleine puissance par jour, 365 jours par an), et une énergie produite annuellement de 24 GWh. La durée de vie de la centrale est estimée à 25 ans. Son exploitation et sa maintenance requièrent l'emploi de dix personnes à l'année. Cette masse salariale associée aux frais de maintenance conduit à un coût annuel de 2 625 000 euros.

Question 31 : évaluer le coût de l'électricité produite par cette centrale, et sachant que le prix de vente de l'électricité varie actuellement entre 60 et 80 euro du MW·h, évaluer la rentabilité de cette centrale à moyen terme.

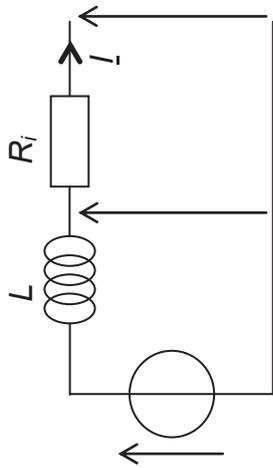


Schéma électrique du modèle de Behn-Eschenburg

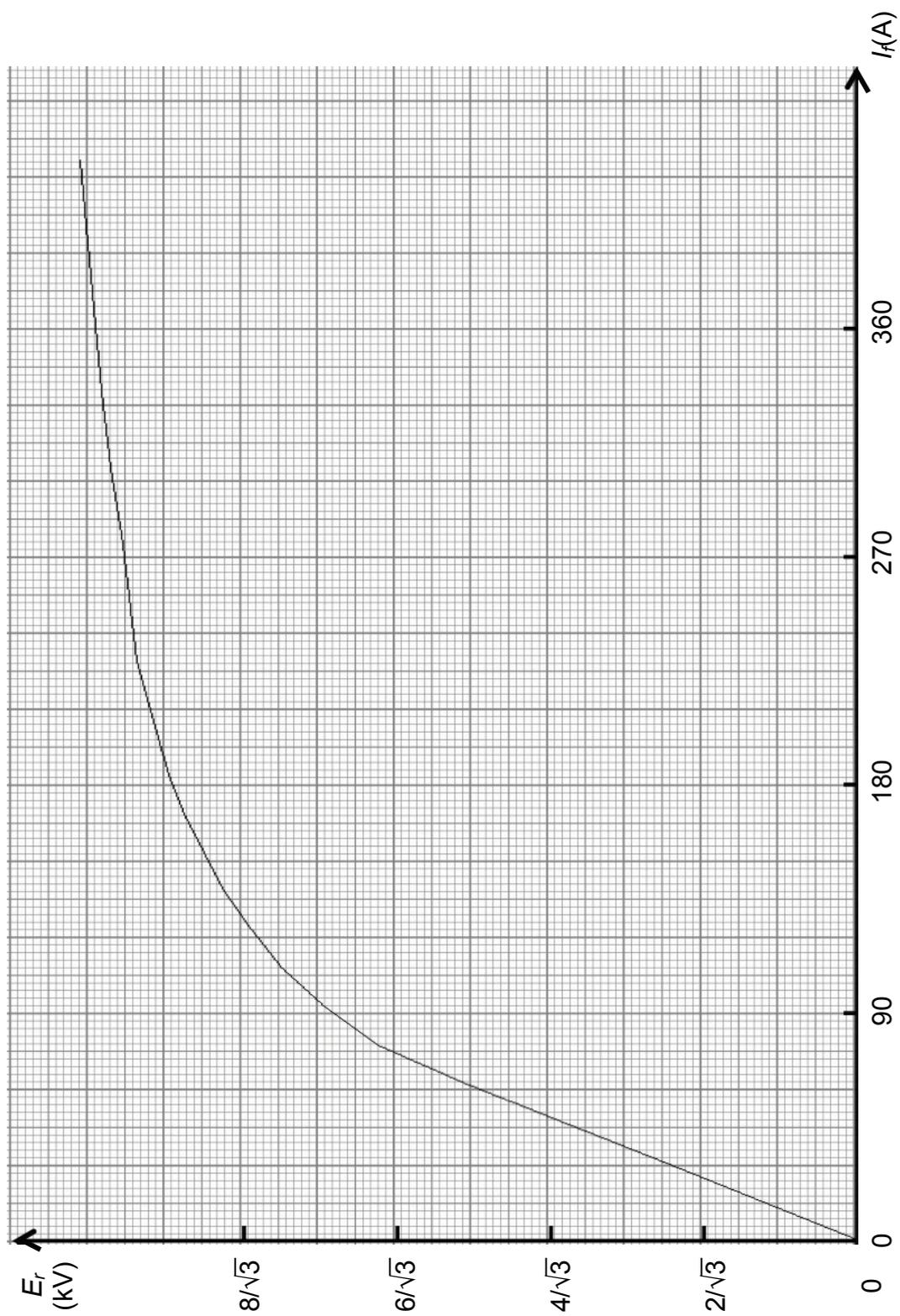
Significations des paramètres du modèle de Behn-Eschenburg

R_i représente ...
L représente ...

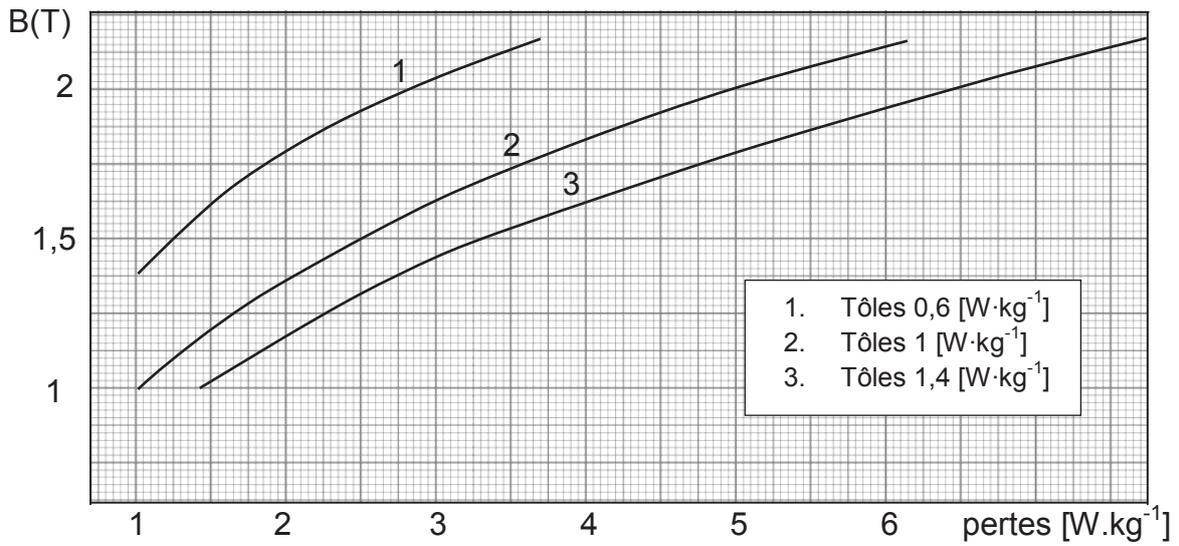


Diagramme de Fresnel

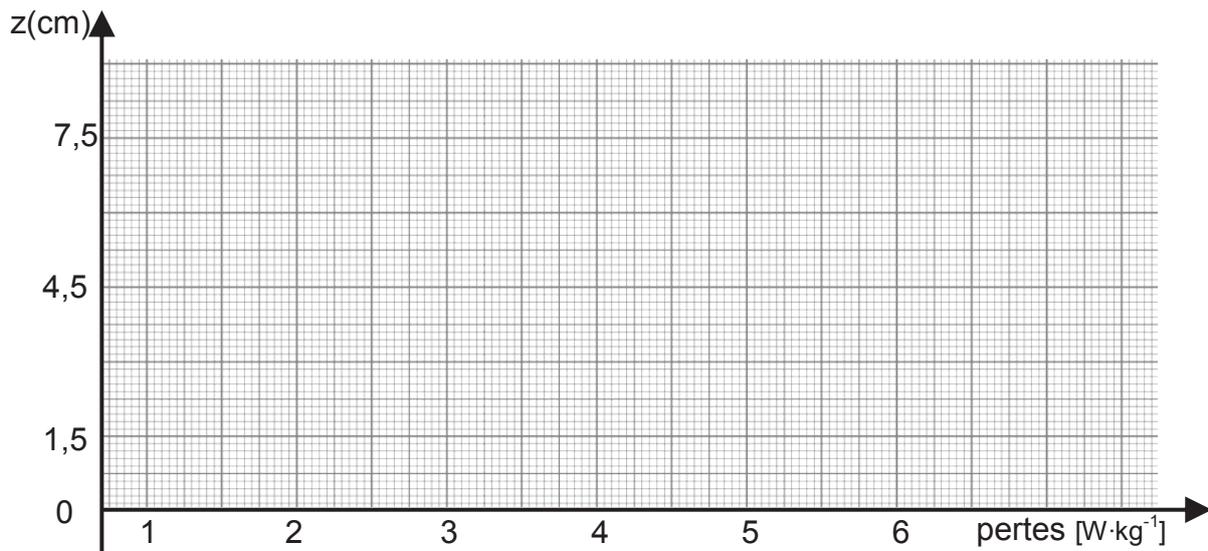
Document réponse N°3 : « paramètres de Behn-Eschenburg »



Document réponse N°4 : « pertes ferromagnétiques de l'induit »

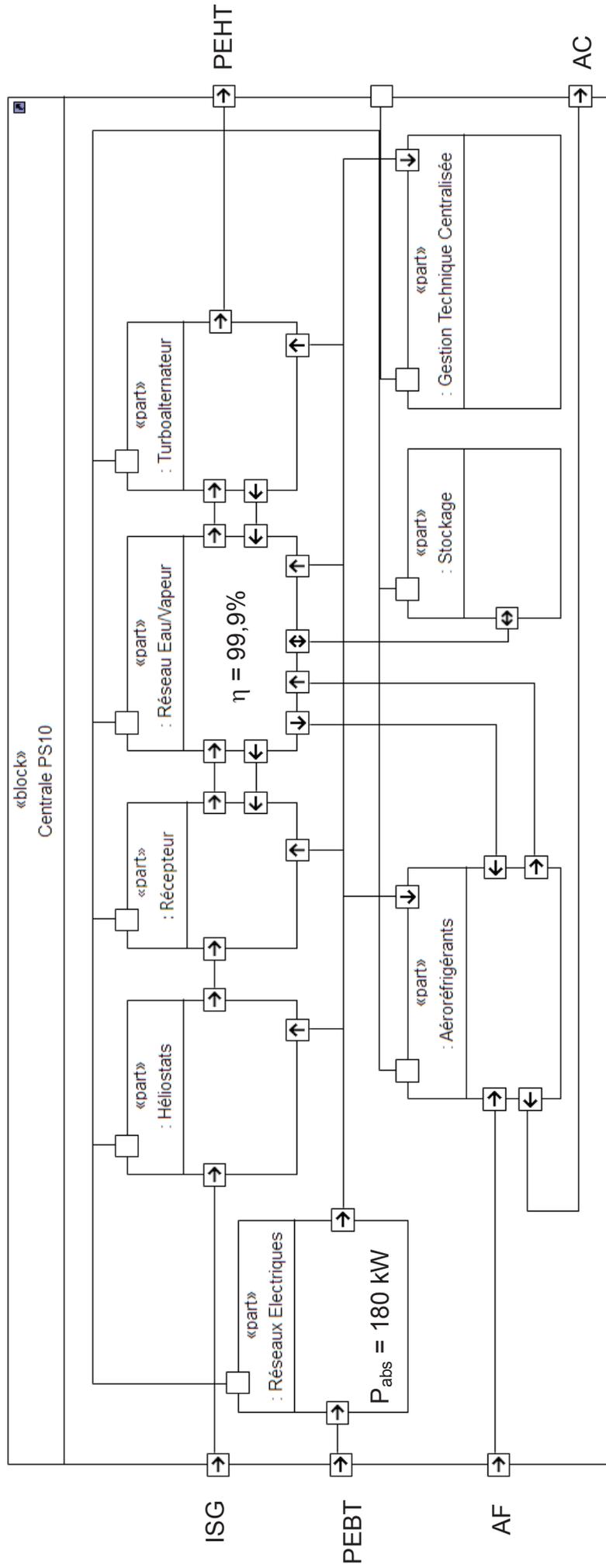


I- Estimation des pertes massiques



II- Profil des pertes massiques dans une dent

Document réponse N°5 : « diagramme IBD de la Centrale PS10 »



Légende :

- PEBT, puissance électrique prélevée sur le réseau basse tension ;
- ISG, irradiance solaire globale portée par la direction du soleil $W \cdot m^{-2}$;
- AF, air froid ;
- AC, air chaud ;
- PEHT, puissance électrique débitée sur le réseau haute tension.