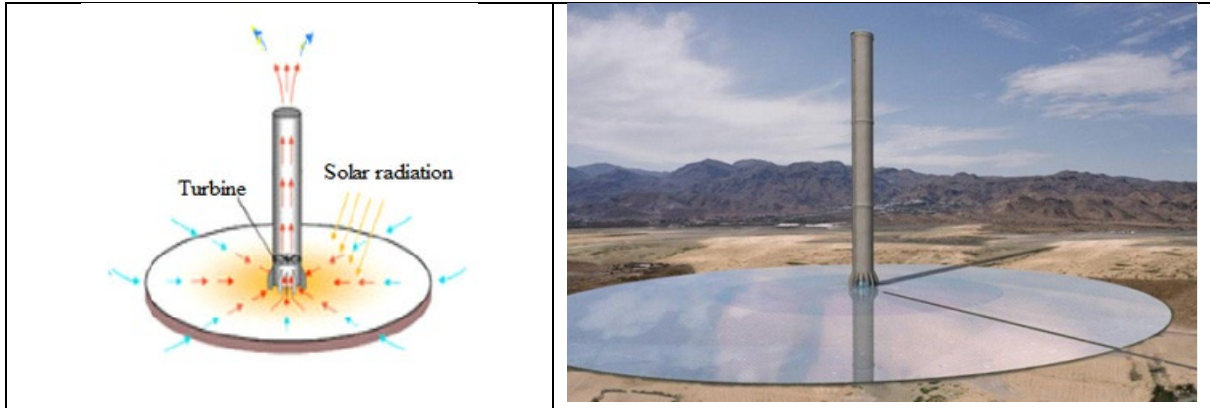


Projet n°4 :

ETUDE D'UNE CENTRALE ELECTRIQUE SOLAIRE A EFFET CHEMINEE

Une centrale solaire à effet de cheminée consiste à chauffer l'air en partie basse de la cheminée par une serre de très grande étendue afin de générer une différence de température entre l'air extérieur et l'air à l'intérieur de la serre. L'air chaud dans la serre, plus léger, va monter dans la cheminée centrale produisant un flux d'air par effet de tirage thermique. Des turbines placées en partie basse de la cheminée vont produire de l'électricité grâce à la pression générée (voir figures ci-dessous).



Un système de stockage peut être ajouté dans la serre sous la forme de réservoirs d'eau qui permettent d'augmenter l'inertie thermique de la serre. Les réservoirs absorbent une partie de l'énergie thermique le jour et la restituent la nuit de manière à assurer une production électrique après le coucher du soleil. Le sol de la serre contribue aussi au stockage thermique.

Nous allons étudier cette technologie en régime stationnaire.

La serre est constituée d'une paroi vitrée circulaire horizontale de diamètre $D_s = 7000$ m dont on négligera la résistance thermique. On considère que le sol est chargé thermiquement, qu'il absorbe la totalité du flux solaire transmis et qu'il en restitue la totalité par convection à l'air et par rayonnement au vitrage de la serre.

La cheminée a une hauteur $H_c = 1000$ m et d'un diamètre de $D_c = 100$ m. La température extérieure est en moyenne de 25°C sur toute la hauteur.

Les données du problème sont fournies dans le tableau suivant et les variables sont définies sur la figure suivante :

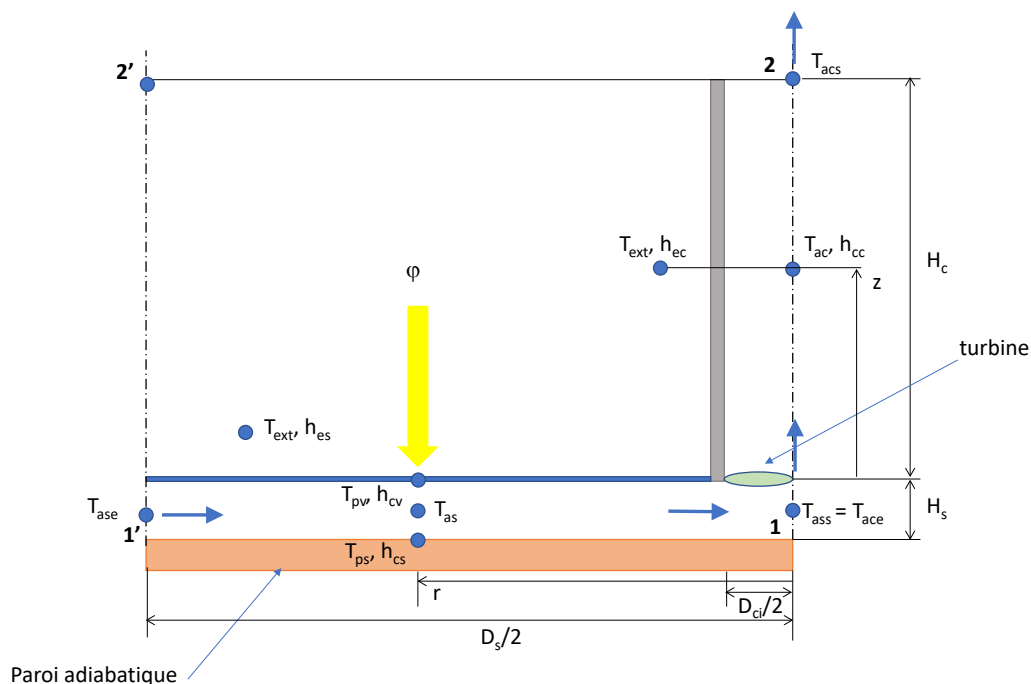


Tableau : Données du problème et nomenclature

Diamètre de la serre	D_c	7 000	m
Hauteur de la serre	H_s	30	m
Epaisseur du vitrage de la serre	e_s	0,006	m
Diamètre intérieur de la cheminée en béton	D_{ci}	100	m
Diamètre extérieur de la cheminée en béton	D_{ce}	101	m
Hauteur de la cheminée en béton	H_c	1 000	m
Surface du vitrage de la serre	A_s		m^2
Surface intérieure de la cheminée	A_{ci}		m^2
Surface extérieure de la cheminée	A_{ce}		m^2
Surface de passage de la cheminée	A_c		m^2
Conductivité thermique du béton armé	λ_b	2,3	W/m/K
Facteur d'absorption CLO du vitrage	α	0,05	-
Facteur de transmission CLO du vitrage	τ	0,85	-
Coefficient d'échange par rayonnement CLO	h_r	à déterminer	W/m ² /K
Coefficient d'échange convectif à l'extérieur de la serre	h_{es}	19	W/m ² /K
Coefficient d'échange convectif à l'extérieur de la cheminée	h_{ec}	40	W/m ² /K
Coefficient d'échange convectif sur le vitrage à l'intérieur de la serre	h_{cv}	11	W/m ² /K
Coefficient d'échange convectif sur le sol	h_{cs}	10	W/m ² /K
Coefficient d'échange convectif dans la cheminée	h_{cc}	12	W/m ² /K
Conductance thermique de la cheminée	KS		W/K
Température extérieure	T_{ext}	25	°C
Densité de flux solaire moyen incident normal à la vitre	φ	600	W/m ²
Température de l'air de la serre à une distance r du centre	T_{as}		°C
Température de l'air à l'entrée de la serre	T_{ase}		°C
Température de l'air au centre de la serre	T_{ass}		°C
Température du sol à une distance r du centre	T_{ps}		°C
Température moyenne du vitrage à une distance r du centre	T_{pv}		°C
Température de l'air de la cheminée à une altitude z	T_{ac}		°C
Température de l'air à l'entrée de la cheminée	T_{ace}		°C
Température de l'air à la sortie de la cheminée	T_{acs}		°C

PARTIE I : Etude thermique simplifiée

On considère une seule zone thermique pour la serre à température moyenne T_{asm} et une autre pour l'air de la cheminée à la température moyenne T_{acm} telle que

$$T_{asm} = \frac{T_{ase} + T_{ass}}{2}$$

$$T_{acm} = \frac{T_{ace} + T_{acs}}{2}$$

On modélise le système par un modèle en quatre zones distinctes :

- La zone d'air de la serre (asm) ;
- La zone d'air de la cheminée (acm) ;
- La zone de paroi du vitrage de la serre (pvm) ;
- La zone de paroi du sol de la serre (psm) ;

On considère de plus que le sol et le vitrage sont à des températures uniformes T_{psm} et T_{pvm} et qu'il y a un débit masse d'air q_{m0} induit par le tirage thermique qui pénètre dans la serre (que l'on calculera dans la deuxième partie). On donne une nomenclature dans le tableau suivant :

Tableau : Données et nomenclature de l'étude thermique simplifiée

Initialisation des calculs	<i>init</i>		
Température d'initialisation des calculs	T_{init}	25	°C
Débit masse de l'air dans la serre et dans la cheminée	q_{m0}	2,0 E+5	kg/s
Capacité thermique massique moyenne de l'air dans la serre (à T_{asm})	c_{ps}		J/kg/K
Avec $c_{ps} = -0,00000018628 \cdot (273 + T_{asm})^3 + 0,00045653 \cdot (273 + T_{asm})^2 - 0,1361 \cdot (273 + T_{asm}) + 1009$			
Capacité thermique massique moyenne de l'air dans la cheminée (à T_{acm})	c_{pc}		J/kg/K
Avec $c_{ps} = -0,00000018628 \cdot (273 + T_{acm})^3 + 0,00045653 \cdot (273 + T_{acm})^2 - 0,1361 \cdot (273 + T_{acm}) + 1009$			
Température moyenne de l'air de la serre	T_{asm}		°C
Température moyenne du sol	T_{psm}		°C
Température moyenne du vitrage de la serre	T_{pvm}		°C
Température moyenne de l'air dans la cheminée	T_{acm}		°C
Rendement thermique de la serre	η_{th}		%

- 1.1. Réaliser un bilan d'enthalpie sur chaque zone en régime stationnaire et donner l'expression des températures de chaque zone T_{asm} , T_{acm} , T_{psm} et T_{pvm} en fonction des données du problème. On déterminera des coefficients d'échange radiatifs pour les surfaces solides afin de linéariser les termes d'échange radiatif.
- 1.2. Réaliser l'application numérique
- 1.3. Justifier l'hypothèse de considérer une température constante de l'air dans la cheminée T_{acm}
- 1.4. Calculer le rendement thermique de la serre : rapport du flux de chaleur cédé à l'air qui transite dans la serre au flux solaire incident sur la serre

PARTIE II : Etude aéraulique simplifiée

On cherche à évaluer le débit-masse q_m qui transite dans la serre et la puissance aéraulique maximum P_{\max} récupérable. En première approximation, nous allons évaluer la vitesse maximale V_{\max} que l'on peut atteindre dans la cheminée sans la présence des turbines. On fera les hypothèses suivantes :

- On considère l'air comme un gaz parfait (on utilisera la pression de référence p_0 pour tous les calculs de masse volumique) ;
- On considère l'air extérieur comme un milieu isotherme à température T_{ext} pour l'importe quelle altitude ;
- On considère l'air dans la cheminée comme un milieu isotherme à température T_{acm} .
- On néglige toutes pertes de charge du réseau aéraulique.

On fournit les données et une nomenclature dans le tableau suivant :

Tableau : Données et nomenclature de l'étude aéraulique simplifiée

Pression atmosphérique de référence	P_0	100 000	Pa
Constante spécifique des gaz parfaits pour l'air	r_{air}	287	J/kg/K
Accélération de la pesanteur	g	9,81	m/s ²
Vitesse maximum de l'air dans la cheminée	V_{\max}		m/s
Débit masse maximum de l'air dans la cheminée	$q_{m,\max}$		kg/s
Puissance aéraulique maximum récupérable	P_{\max}		MW
Rendement mécanique maximum théorique	η_{\max}		%

On note p_k la pression statique de l'air du nœud aéraulique k (k valant 1, 1', 2, 2'), ρ_{ext} et ρ_c les masses volumiques à l'extérieur et à l'intérieur de la cheminée.

2.1 Appliquer le principe fondamental de la statique des fluides entre 1' et 2' à l'extérieur de la cheminée

2.2 Appliquer le théorème de Bernoulli entre les points 1' et 2 et en déduire l'expression littérale de la vitesse V_{\max} et du débit masse $q_{m,\max}$

2.3 Déterminer l'expression de la puissance aéraulique maximum récupérable P_{\max} ainsi que le rendement maximum théorique de la cheminée solaire η_{\max} : rapport de la puissance aéraulique maximum au flux solaire incident sur la serre.

2.4 Réaliser l'application numérique en reprenant les calculs de la partie 1.

PARTIE III : Etude thermique détaillée

Le modèle mono-zone de la serre n'est pas satisfaisant. Nous souhaitons désormais connaître la température atteinte au centre de la serre et à l'entrée de la cheminée de façon plus précise car c'est elle qui détermine le niveau de tirage thermique. Nous considérons toujours une seule zone thermique pour la cheminée. Il faut discrétiser la serre en anneaux élémentaires d'épaisseur $\Delta r = 50$ m.

3.1 Isoler un anneau élémentaire de hauteur H_s , de périmètre moyen $2\pi r$ et d'épaisseur Δr et réaliser un bilan d'enthalpie sur l'air de la serre, la vitre et l'air de la cheminée en régime stationnaire (on négligera la conduction dans le verre et dans le sol entre deux nœuds voisins).

3.2 En utilisant les résultats de la question 2, résoudre le système d'équations (thermique et aéraulique) et donner les profils de température dans la serre (air, sol et vitrage)

PARTIE IV : Etude aéraulique détaillée

Nous souhaitons affiner le modèle en considérant la présence des turbines et en prenant en compte les pertes de charge. On fera les hypothèses suivantes :

- Le coefficient de perte de charge singulière due au changement de section et de direction au pied de la cheminée est pris égal à $K_i = 0,7$.
- Le diamètre de la cheminée étant très grand, on considère la cheminée comme un conduit lisse.

On pourra utiliser la formule de Blasius

$$\Lambda = 0,3164 \cdot Re^{-1/4}$$

- Les turbines ont des pales ajustables qui permettent de les maintenir à leur point de fonctionnement optimal, on considère alors un coefficient de pression des turbines $K_t = 0,8$. Tel que

$$\Delta p_t = K_t \rho_c \frac{V^2}{2}$$

Avec

- La vitesse moyenne dans la cheminée V ;
- La masse volumique moyenne de l'air dans la cheminée ρ_c

4.1 Déterminer l'expression du coefficient de perte de charge linéique dans la cheminée Λ

4.2 Appliquer le théorème de Bernoulli entre les points 1' et 2 et en déduire l'expression littérale du débit réel q_m .

4.3 Déterminer l'expression de la puissance mécanique récupérable P ainsi que le rendement mécanique de la cheminée solaire η : rapport de la puissance mécanique récupérable par les turbines au flux solaire incident sur la serre.

4.4 Réaliser l'application numérique pour résoudre l'ensemble du problème thermo-aéraulique. Commenter.