

SESSION 2014

AGRÉGATION CONCOURS INTERNE ET CAER

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 : 4 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.

- **Sujet** (5 mises en situation et questions à traiter par le candidat)

Présentation	page 2
Première partie (15 minutes)	page 2
Deuxième partie (45 minutes)	page 2
Troisième partie (30 minutes)	page 4
Quatrième partie (1 heure 15 minutes)	page 4
Cinquième partie (1 heure 15 minutes)	page 11

Documents

Documentation technique (DT1 à DT 16)	pages 15 à 34
Documents réponses (DR1 à DR 3)	pages 35 à 37

Le sujet comporte cinq parties indépendantes qui peuvent être traitées dans un ordre indifférent.

Les différentes parties seront traitées sur des copies séparées.

Toutes les réponses devront être détaillées sur la copie.

Préciser les unités des résultats.

Tous les documents réponses DR1 à DR 3, remplis ou non, sont à rendre avec les copies.

Une caisse d'allocation familiale en Bretagne



Présentation

La présente étude a pour objet l'opération de travaux relative à la construction d'un nouveau siège départemental d'une Caisse d'allocation Familiale (CAF) en Bretagne. Pour la construction du siège départemental, le maître d'ouvrage est engagé dans un parcours de certification « bâtiments tertiaires - démarche HQE » avec label BBC EFFINERGIE. Cette démarche de développement durable marque singulièrement l'opération de construction et ceci à toutes les étapes et pour tous les acteurs mobilisés dans cette opération y compris en phase chantier.

1 Première partie : étude du contexte

Le promoteur désire bénéficier d'une certification HQE (DT 1 page 15). Cette certification nécessite un suivi durant les différentes phases de la vie du bâtiment et une action dans plusieurs domaines.

Q 1 Donner la signification de HQE. Quels sont les axes concernés par cette certification ?

Q 2 D'après le DT 1 et le schéma de principe hydraulique géothermie (DT 8), citer les sources d'énergies renouvelables mises en œuvre dans cette installation.

2 Deuxième partie : étude de la production photovoltaïque

L'avant-projet détaillé a mis en évidence le potentiel de la toiture. Il a été considéré qu'elle disposerait de panneaux amorphes intégrés à l'étanchéité. La production viendra compenser la consommation du bâtiment afin d'obtenir le label BBC et permettra une revente à ERDF.

Les panneaux de type PVL136 (DT 5) sont disposés de manière à optimiser la surface de toiture. Seules la rotonde, les verrières et les emprises de cheminées ne disposent pas de panneaux.

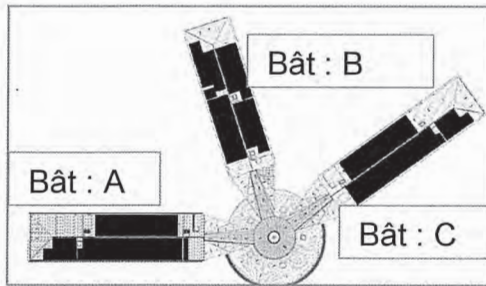
La production photovoltaïque attendue est de 95 MWh.an^{-1} . Le vieillissement des panneaux ne devra pas faire chuter la production de plus de 10% après 10 ans, 15% après 20 ans et 25% après 25 ans.

Pour répondre à l'appel d'offre, l'installateur doit garantir la production photovoltaïque conformément au cahier des charges. Cette partie de l'étude sera basée sur l'exploitation

Agrégation interne « Sciences industrielles de l'ingénieur »		Session 2014
Epreuve de « Sciences industrielles de l'ingénieur »	Code : (...)	Page 2/37

des données du cahier des clauses techniques particulières (CCTP), de documents normatifs et techniques.

2.1 Dimensionnement des panneaux photovoltaïques



La production photovoltaïque dépend de la surface de capteur mais aussi de leur orientation et de la pente attribuée. La pente étant très faible ($6,31^\circ$) des panneaux sont disposés sur les « versants nord ». Les panneaux à couches minces ayant de bon rendement sur les rayonnements indirects, ils permettent de disposer des panneaux à proximité des cheminées et sur des orientations moins favorables. Les panneaux sont considérés comme

non ventilés.

La norme NF EN 15316-4 (DT 2) propose une méthode de calcul pour déterminer la production d'électricité des systèmes photovoltaïques.

- Q 3** D'après la norme, identifier les paramètres influents pour calculer l'énergie fournie par les panneaux solaires. Vous respecterez la désignation des grandeurs donnée par la norme.
- Q 4** La norme ne donne pas de valeur du facteur de conversion f_{tlt} pour les orientations NE, N et NO. Compte tenu de l'inclinaison de la toiture, donner la valeur de ce coefficient en justifiant votre réponse.
- Q 5** Calculer, en s'appuyant sur la norme (DT 2) et les données du DT 3, la production annuelle des panneaux photovoltaïques du bâtiment A pour les 2 orientations de sa toiture nord-est et sud-ouest. Pour cela, préciser les différentes étapes de la démarche aboutissant aux résultats et résumer les productions d'énergies annuelles par bâtiment et par orientation dans un tableau tel que celui du DT 3.
- Q 6** Déterminer la production globale du site de la CAF. Le niveau désiré de production peut-il être atteint ?
- Q 7** En tenant compte du vieillissement des panneaux (DT 5), quelles sont les productions attendues à 10, 20 et 25 ans ? Les objectifs du cahier des charges sont-ils atteignables ?

2.2 Schéma de principe

L'aile A du bâtiment côté nord-est est pourvue de 6 groupes de 20 panneaux et de 3 onduleurs. L'installation photovoltaïque est raccordée au réseau de distribution publique pour revente de l'énergie produite.

- Q 8** Quel est l'intérêt économique de cette solution, par rapport à une consommation locale ?
- Q 9** Sachant que les onduleurs retenus sont des SUNNY BOY 2500HF (DT 4), montrer que le nombre d'onduleurs est adapté au nombre de panneaux.
- Q 10** Donner le schéma de principe de cette partie de l'installation depuis les panneaux jusqu'au raccordement au réseau de distribution. Faire figurer les 3 premiers panneaux et le dernier de chaque ligne, les onduleurs uniquement pour l'aile A nord-est, tous les compteurs de l'installation ainsi que le raccordement de l'aile A sud-ouest des ailes B et C.

3 Troisième partie : analyse du contexte énergétique - principe hydraulique géothermie

Cette partie porte sur l'analyse des modes de fonctionnement et de régulation de l'installation. Ceux-ci sont définis dans l'extrait du CCTP (DT 6) et sur le schéma de principe hydraulique géothermie (DT 8).

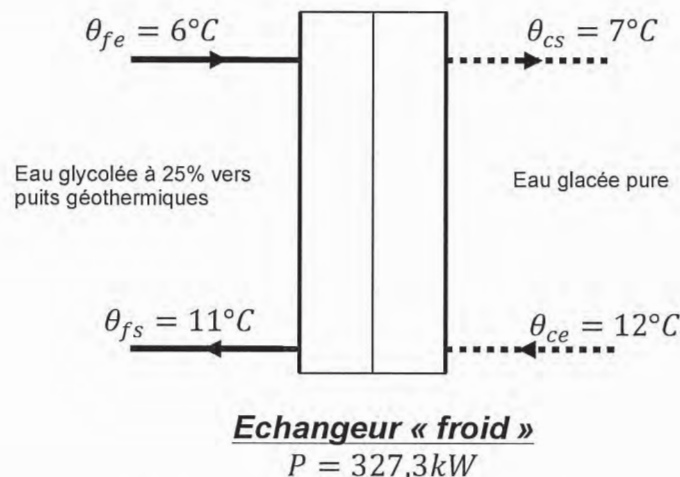
Q 11 En fonction des différents régimes de températures définis dans le CCTP, surligner le mode de fonctionnement hydraulique de l'installation en été sur le schéma hydraulique géothermie « ETE » (DR 3). Indiquer dans la légende les couleurs utilisées.

Q 12 Indiquer sur le schéma DR 3 la position des différentes vannes change-over numérotées de 1 à 12 pour la configuration « ETE ». Utiliser la notation « O » pour vanne ouverte et « F » pour vanne fermée. Indiquer également sur le schéma les régimes de températures résultant sur les différents réseaux.

4 Quatrième partie : énergétique

4.1 Etude de l'échangeur froid géothermique

L'étude qui suit porte sur le dimensionnement de l'échangeur froid raccordé sur la boucle géothermique. Compte tenu du fonctionnement hiver et été des deux pompes à chaleur, les conditions retenues dans le CCTP pour le dimensionnement de cet échangeur sont les suivantes :



Le dimensionnement de cet échangeur, considéré à contre-courant pur, s'appuiera sur l'étude des caractéristiques physiques des fluides secondaires et primaires.

Compléments sur le dimensionnement des échangeurs :

- On rappelle que la puissance d'un échangeur pur peut s'exprimer à partir de la formule de Hausbrand :

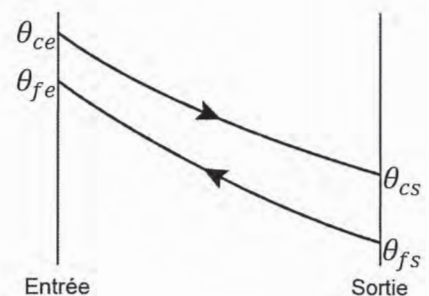
$$P = US \frac{(\theta_{cs} - \theta_{fs}) - (\theta_{ce} - \theta_{fe})}{\ln \left(\frac{\theta_{cs} - \theta_{fs}}{\theta_{ce} - \theta_{fe}} \right)}$$

Avec :

P : puissance en W

U : coefficient d'échange surfacique de l'échangeur en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

S : surface d'échange en m^2



Remarque : En première approche, le coefficient de transfert U de l'échangeur sera pris égal à $U = 600 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

- On peut aussi exprimer la puissance à partir de l'efficacité avec la méthode des NUT (Nombre d'Unités de Transfert) :

$$P = \varepsilon C_{\min}(\theta_{ce} - \theta_{fe})$$

dans laquelle :

ε désigne l'efficacité de l'échangeur

$C_{\min}$ désigne la capacité calorifique minimale exprimée en W.K^{-1} :

$$C_{\min} = \inf(Q_{\text{prim}}C_{\text{prim}}; Q_{\text{sec}}C_{\text{sec}})$$

avec :

Q_{prim} : débit massique du fluide primaire en kg.s^{-1}

C_{prim} : chaleur massique du fluide primaire en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Q_{sec} : débit massique du fluide secondaire en kg.s^{-1}

C_{sec} : chaleur massique du fluide secondaire en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Remarque : la notion de fluide secondaire et primaire est fonction du niveau de température des fluides : le primaire étant le fluide le plus chaud, le secondaire étant le fluide le plus froid.

L'efficacité ε peut se calculer pour un échangeur pur à contre-courant par :

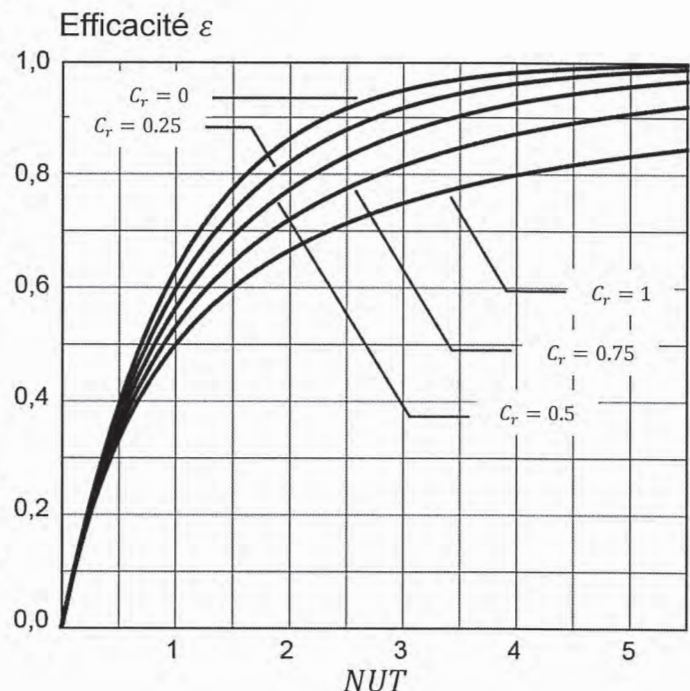
$$\varepsilon = \frac{e^{-NUT(1-C_r)} - 1}{C_r e^{-NUT(1-C_r)} - 1}$$

Dans cette expression on a $NUT = \frac{US}{C_{\min}}$ et $C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$ qui sont des nombres sans dimension.

Le terme $C_{\max}$ désigne la capacité calorifique maximale en W.K^{-1} définie de façon analogue à $C_{\min}$ par :

$$C_{\max} = \sup(Q_{\text{prim}}C_{\text{prim}}; Q_{\text{sec}}C_{\text{sec}})$$

L'abaque ci-contre indique l'efficacité de l'échangeur pour différentes valeurs de C_r et pour différents NUT.



Q 13 Le fluide antigel utilisé étant du monopropylène glycol mélangé à 25 % avec de l'eau pure, déterminer pour les caractéristiques suivantes du fluide en provenance des sondes géothermiques (voir DT 7) :

- le point de congélation en $^{\circ}\text{C}$
- la masse volumique en kg.m^{-3}
- la chaleur massique en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

En déduire, à partir de la puissance de l'échangeur et des différentiels de températures, les débits massiques au primaire et au secondaire de l'échangeur.

Q 14 Déterminer les valeurs de C_{min} , C_{max} et l'efficacité ε de cet échangeur.

Q 15 Calculer la surface de l'échangeur (en m^2) en précisant la méthode utilisée.

Q 16 Déterminer la surface de l'échangeur froid si, au lieu d'un régime d'eau glacée $7^\circ C - 12^\circ C$, on utilise un régime $8^\circ C - 13^\circ C$. Commenter les résultats obtenus en indiquant les conséquences des choix de régime de température choisis par le bureau d'étude dans le CCTP.

4.2 Etude de la ventilation naturelle

Les bâtiments de la CAF de Bretagne font l'objet de la mise en place d'un système original de ventilation utilisant le principe des « cheminées solaires ». L'objectif poursuivi est de diminuer les coûts liés à la ventilation en utilisant des « moteurs » naturels pour faire circuler l'air dans le bâtiment. Un schéma décrivant le principe de fonctionnement est proposé sur le DT 9. Les études qui suivent ont pour objectif de mettre en évidence les paramètres et contraintes liées à ce type de solution. Pour simplifier les études, le calcul des pertes de charges dans les gaines de ventilation sera négligé dans toute l'étude.



Cheminées solaires disposées sur les différentes ailes du bâtiment.

Dans ces études nous allons déterminer les « moteurs » naturels permettant de réaliser cette ventilation :

- l'effet dû au tirage thermique
- l'effet dû à la cheminée solaire
- l'effet dû au vent

4.2.1 Etude de l'effet de tirage thermique

Hypothèses :

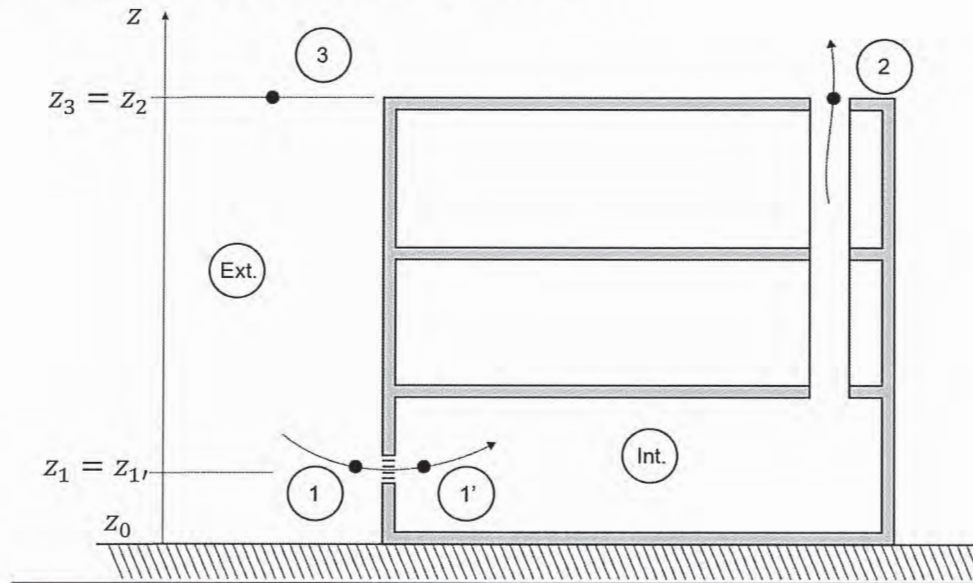
On négligera les variations de pression atmosphérique en fonction de l'altitude et l'air sera considéré comme un gaz parfait.

La masse volumique de l'air ρ_0 à $P_{atmosphérique}$ et $0^\circ C$ sera prise égale à $1,293 \text{ kg.m}^{-3}$.

Les paramètres à utiliser sont les suivants :

- Air intérieur :
 - θ_i : température en $^\circ C$
 - ρ_i : masse volumique en kg.m^{-3}
- Air extérieur :
 - θ_e : température en $^\circ C$
 - ρ_e : masse volumique en kg.m^{-3}

La modélisation utilisée est proposée ci-dessous



Toutes les études ci-après seront effectuées en unités S.I.

- Q 17** Ecrire l'expression de la pression au point 1 en fonction de la pression au point 3 à l'extérieur du bâtiment.
- Q 18** Ecrire l'expression de la pression au point 1' en fonction de la pression au point 2 à l'intérieur du bâtiment.
- Q 19** Les masses volumiques ρ_i et ρ_e dépendent respectivement des températures θ_i et θ_e . En supposant que l'air peut s'assimiler à un gaz parfait, écrire l'expression donnant ρ_i en fonction de ρ_e , θ_i , θ_e .
- Q 20** Démontrer que l'expression de $\Delta P = P_1 - P_{1'}$ (différence de pression entre la bouche d'entrée et la bouche de sortie, en Pa) en fonction des températures et des hauteurs respectives de la bouche d'entrée d'air z_1 et de la sortie de cheminée z_2 est la suivante (g désigne l'accélération de la pesanteur en $m.s^{-2}$) :

$$\Delta P = \rho_0 \left(\frac{273,15}{\theta_e + 273,15} \right) \left(\frac{\theta_i - \theta_e}{\theta_i + 273,15} \right) g(z_2 - z_1)$$

- Q 21** A partir de la relation précédente, montrer que pour des températures usuelles intérieures et extérieures en hiver ($\theta_i = 20^\circ C$ et $\theta_e = -5^\circ C$), la relation peut se simplifier par :

$$\Delta P = 0,044H(\theta_i - \theta_e) \text{ où } H = z_2 - z_1$$

- Q 22** En utilisant cette relation simplifiée, calculer ΔP , pour des conditions hivernales avec $\theta_i = 20^\circ C$ et $\theta_e = 0^\circ C$, et pour les cas où H est de 2,5 m ou de 13 m.
- Q 23** Conduire les mêmes calculs avec $\theta_i = 20^\circ C$ et $\theta_e = 15^\circ C$ ce qui correspond à un calcul en mi-saison. Que peut-on conclure des résultats obtenus ?

4.2.2 Etude de l'effet de la cheminée solaire

L'étude suivante porte sur la contribution de la cheminée solaire dans la répartition des pressions entre la bouche d'entrée d'air et la sortie de la cheminée. Cette cheminée est

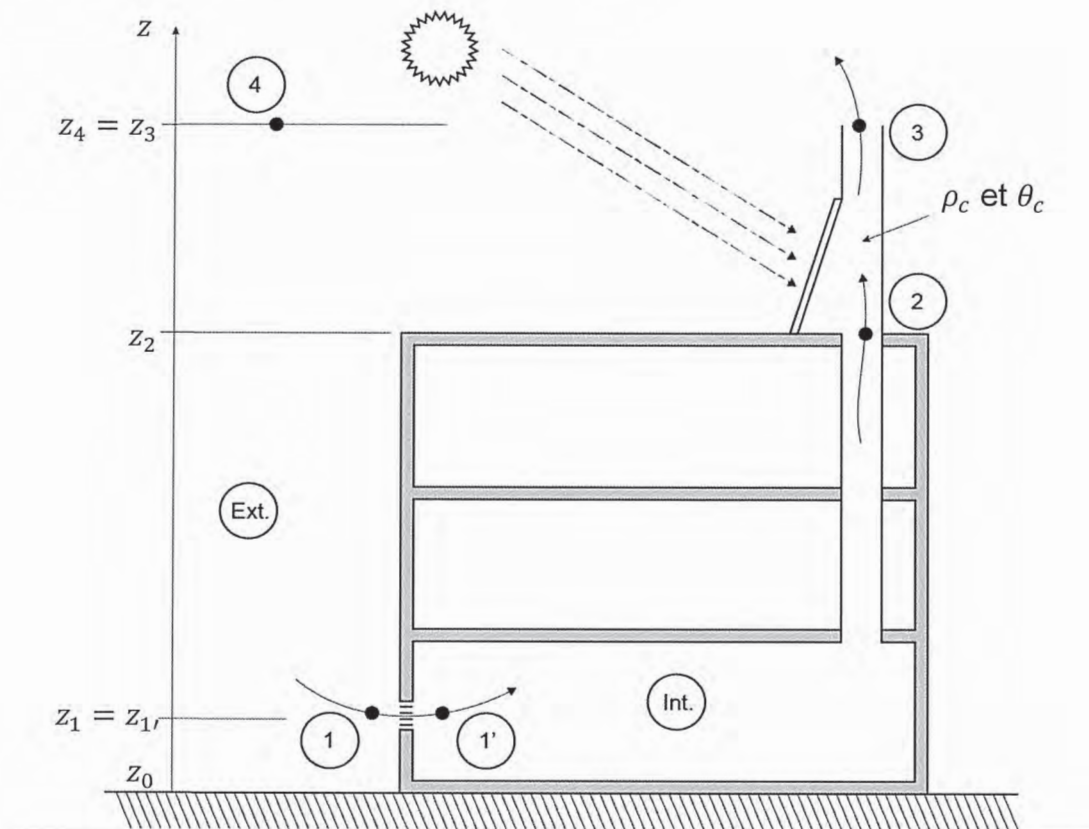
Agrégation interne « Sciences industrielles de l'ingénieur »		Session 2014
Epreuve de « Sciences industrielles de l'ingénieur »	Code : (...)	Page 7/37

recouverte sur une de ses faces (la mieux orientée vis-à-vis du rayonnement solaire) par une paroi vitrée (double vitrage).

Lorsque le rayonnement solaire est suffisant cela a pour effet de réchauffer l'air se trouvant dans la partie supérieure de la cheminée.

On supposera, pour simplifier l'étude, que cette température est uniforme et constante le long de la cheminée solaire.

La modélisation utilisée est proposée ci-dessous :



Q 24 Ecrire l'expression de la différence de pression au niveau de la bouche d'entrée d'air $\Delta P = P_1 - P_{1'}$, en fonction des différents paramètres intervenant dans l'étude : masses volumiques (ρ_c, ρ_i, ρ_e) et hauteurs (z_1, z_2, z_3).

Q 25 En faisant intervenir la loi des gaz parfaits, donner l'écriture de cette relation si on exprime les variations de masse volumique à partir des températures ($\theta_i, \theta_e, \theta_c$) et de la masse volumique de l'air ρ_0 à la pression atmosphérique.

Q 26 Réaliser une application numérique pour la configuration hiver suivante :

- Différence de hauteur : $z_2 - z_1 = 13 \text{ m}$
- Hauteur de cheminée : $z_3 - z_2 = 5 \text{ m}$
- Température intérieure : $\theta_i = 20^\circ\text{C}$
- Température extérieure : $\theta_e = 0^\circ\text{C}$
- Température dans la cheminée : $\theta_c = 24^\circ\text{C}$

On fera apparaître dans le résultat la part de pression motrice due au tirage de la cheminée solaire.

4.2.3 Etude de l'effet dû au vent

Dans cette dernière partie de l'étude nous allons nous intéresser à l'effet du vent sur la ventilation naturelle.

Sur un site donné une des expressions utilisées pour modéliser la variation de la vitesse du vent en fonction de l'altitude et de la rugosité du terrain est la suivante :

$$V(z) = V_0 a z^b \text{ en } m.s^{-1}$$

Dans cette expression :

- z est la hauteur par rapport au sol, en m , où est calculée la vitesse du vent.
- V_0 est la vitesse du vent météo en $m.s^{-1}$ du site.
- Les paramètres a et b sont donnés en fonction de la rugosité du terrain. Ici le bureau d'étude a adopté pour une zone périurbaine $a = 0,35$ et $b = 0,25$.

La pression (en Pa) exercée par le vent en un point M_i de la façade est alors donnée en fonction de la pression dynamique exercée par le vent et d'un coefficient de pression dépendant de la forme, de la dimension du bâtiment et de l'orientation du vent :

$$P_i = \frac{1}{2} C_{pi} \rho_e V_{ref}^2$$

où :

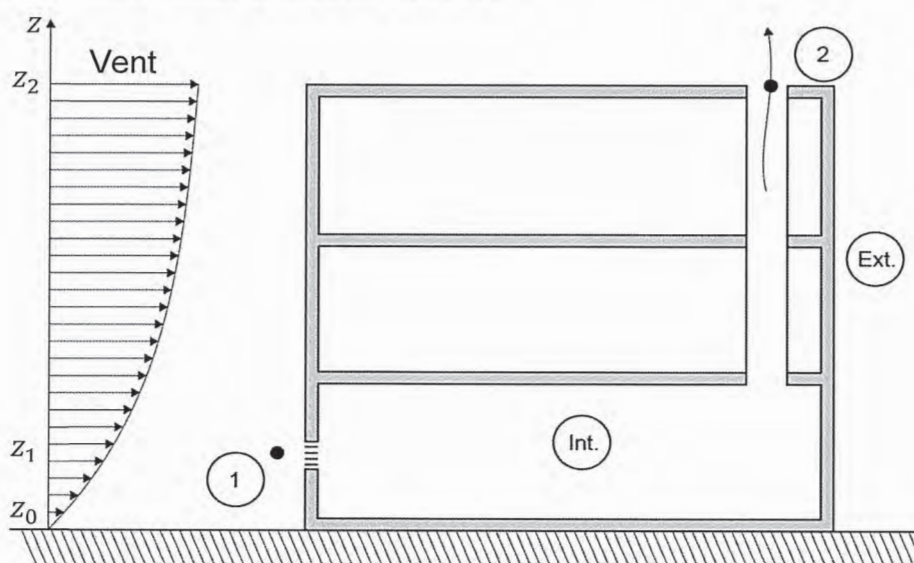
- C_{pi} est le coefficient de pression au point M_i (il s'obtient généralement dans des tables récapitulant des résultats de simulations).
- ρ_e est la masse volumique de l'air extérieur en $kg.m^{-3}$.
- V_{ref} est la vitesse du vent de référence en $m.s^{-1}$ calculé en fonction de la vitesse du vent météo V_0 et en adoptant généralement, pour l'altitude à laquelle est calculée ce vent, la hauteur du bâtiment.

L'écriture de la différence de pression entre deux points M_i et M_j d'un bâtiment s'écrit alors :

$$\Delta P = \frac{1}{2} (C_{pi} - C_{pj}) \rho_e V_{ref}^2$$

Nous allons étudier l'effet du vent sur une bouche située sur la façade du bâtiment et le tirage dû au vent entre l'entrée et la sortie du conduit de ventilation.

La modélisation utilisée est proposée ci-dessous



Pour cette étude on admettra que la pression statique obtenue par tirage thermique au niveau de la bouche 1 est de $11,4 Pa$ calculée pour $\theta_e = 0^\circ C$. Le vent moyen le plus

fréquent sur le site est de vitesse $V_0 = 4,5 \text{ m.s}^{-1}$. La hauteur du bâtiment est de 15 m et la différence de hauteur entre la bouche et la sortie est de 13 m.

Q 27 Calculer la vitesse du vent de référence V_{ref} de ce bâtiment en fonction de la vitesse du vent météo adopté pour le site.

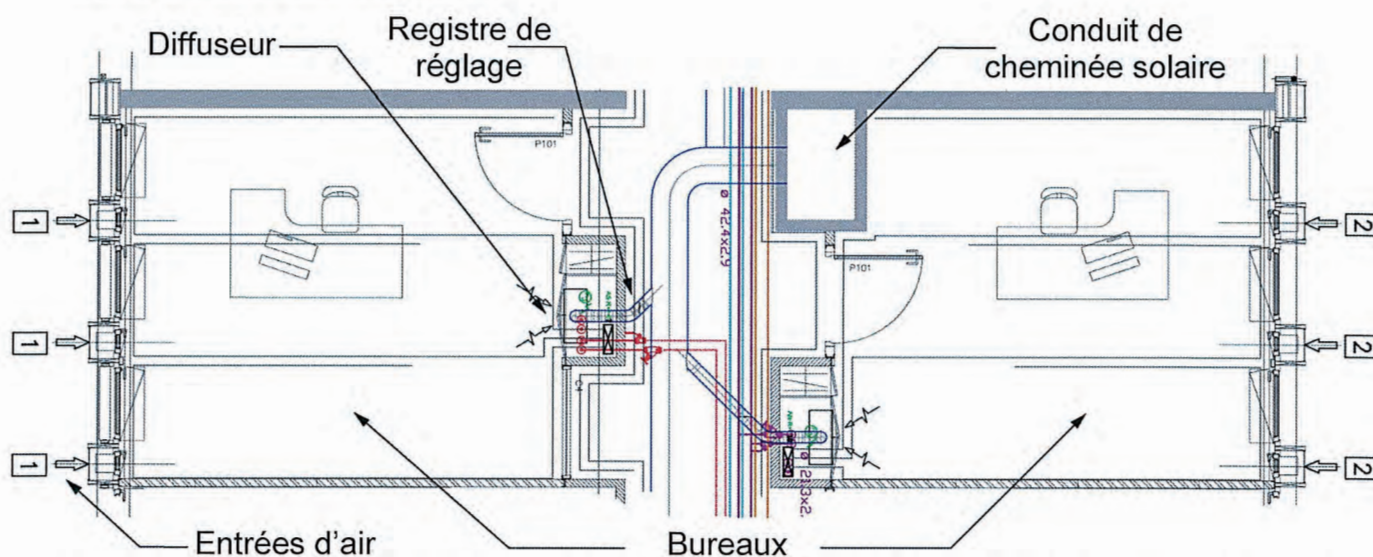
Q 28 Calculer la différence de pression ΔP due aux effets du vent (en hiver avec $\theta_e = 0^\circ\text{C}$) et indiquer la dépression totale due aux effets du vent plus le tirage thermique au niveau de la bouche 1. On prendra pour ce calcul les coefficients de pression suivants :

- au niveau de la bouche d'entrée d'air $C_p = 0,5$ (façade en pression)
- au niveau de la sortie toiture $C_p = -0,3$ (toiture en dépression)

4.2.4 Analyse des résultats et conclusions

Le bureau d'étude a réalisé une étude sur la ventilation naturelle pour le cas le plus défavorable soit une simulation en hiver (pas d'effet de cheminée solaire), une température extérieure de 15°C (défavorable pour le tirage thermique) et pour une vitesse de vent météo de $4,5 \text{ m.s}^{-1}$ qui correspond au vent moyen le plus fréquent du site. Les résultats de la simulation du bureau d'étude indiquent une pression moyenne au niveau des bouches d'entrées d'air de $1,5 \text{ Pa}$.

Description de l'installation :



Les bouches d'entrée d'air autoréglables alimentent les différents bureaux. L'air est ensuite repris par un diffuseur et conduit par l'intermédiaire d'une gaine souple équipée d'un registre de réglage. Puis les gaines souples sont raccordées à des gaines rigides jusqu'aux conduits des cheminées solaires.

Des châssis de fenêtre articulés permettent une « surventilation » nocturne des locaux par une action manuelle des occupants des locaux au moment de quitter leur lieu de travail et par fermeture manuelle à leur retour le matin (ces actions à effectuer, sont signalées au personnel par des messages sur les écrans des postes informatiques du réseau interne).