ANNEXE 3 – GRAPHIQUES ET SCHEMAS

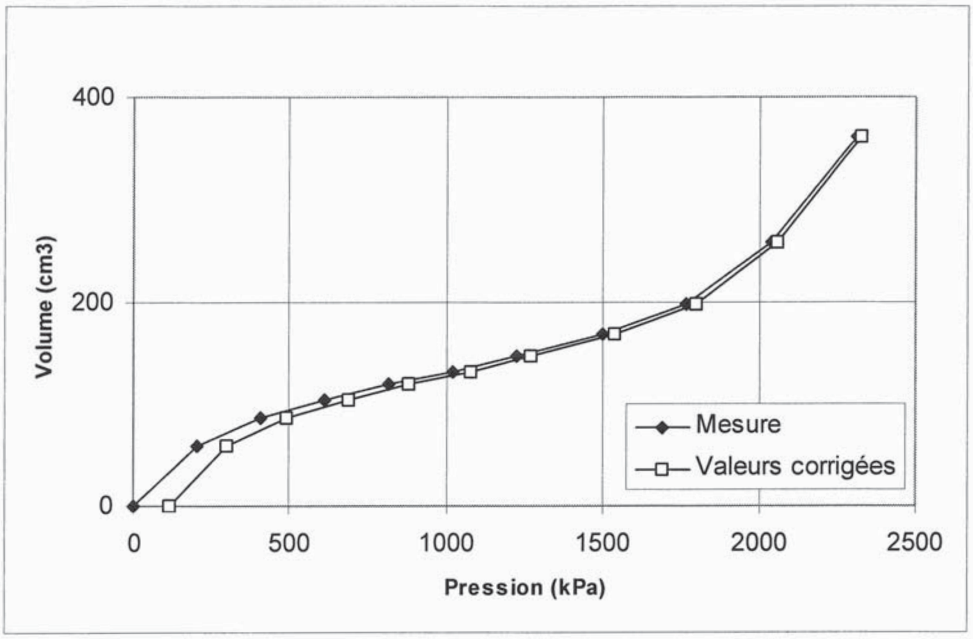


Figure 1 – Résultat d'un essai pressiométrique réalisé à la côte –8,00 CM.

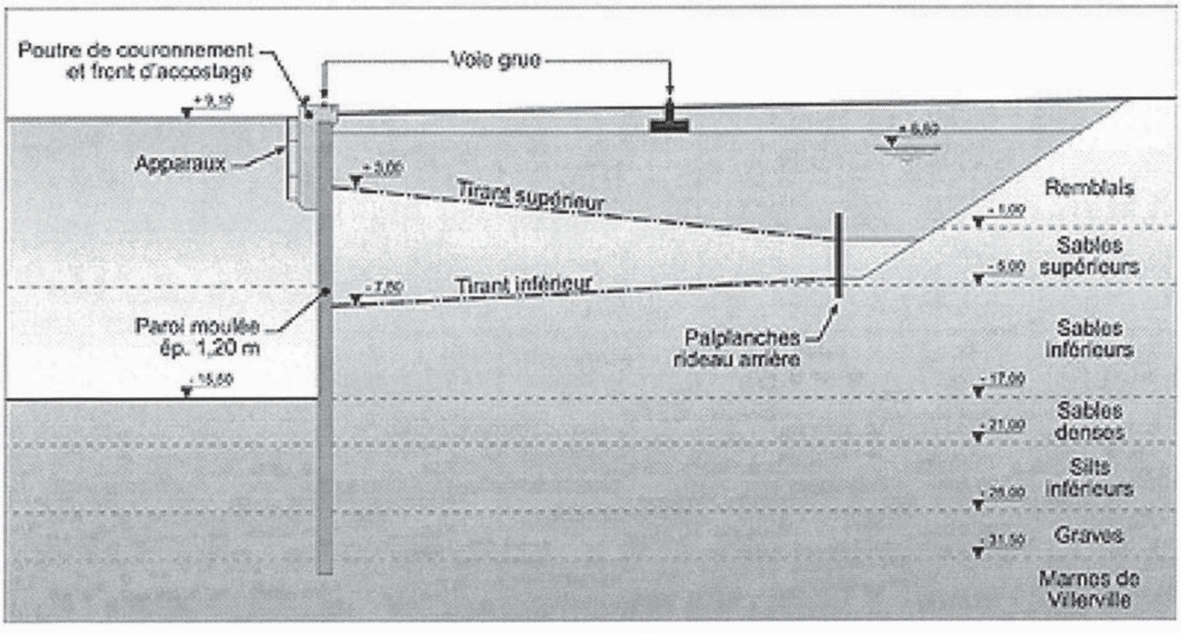
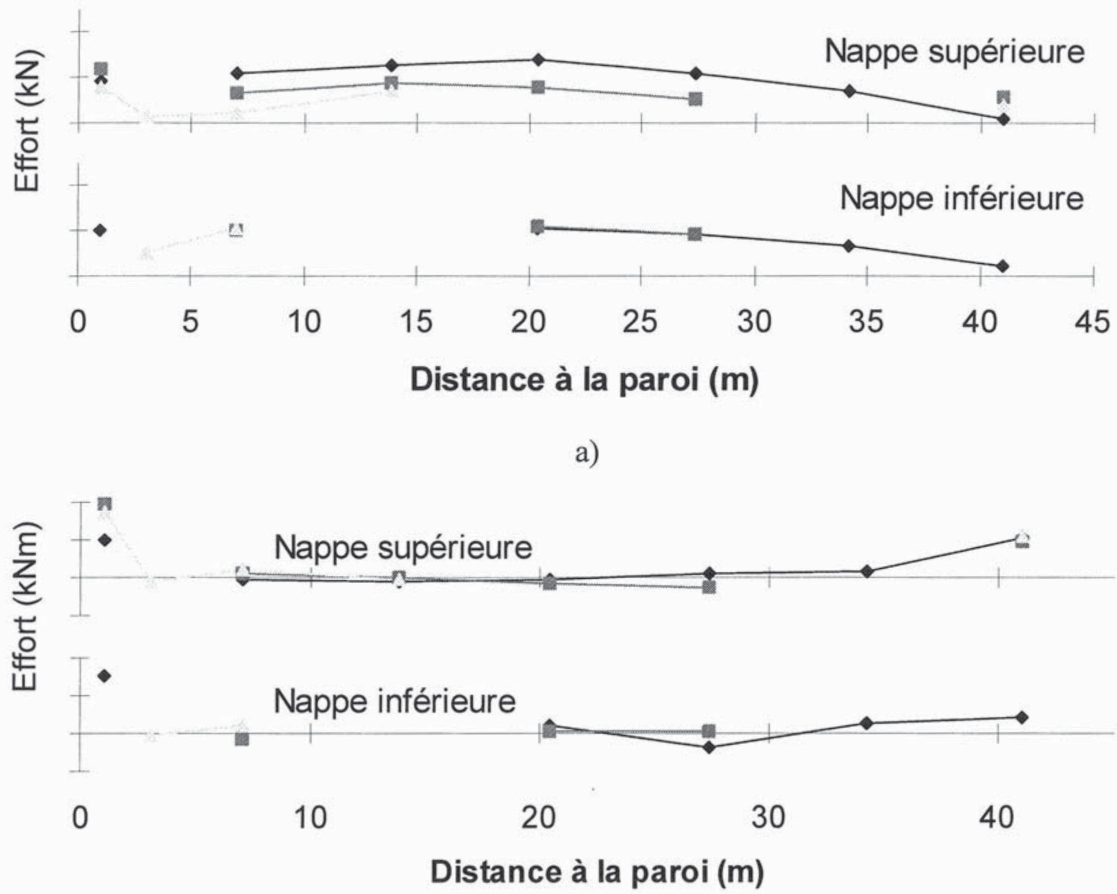


Figure 2 – Coupe type du quai dans sa configuration finale.

Tournez la page S.V.P.



b)

Figure 3 – Efforts mesurés dans les tirants d ancrages (3 tirants de la nappe supérieure, 3 tirants de la nappe inférieure). a) Tension dans les tirants ; b) Moment fléchissant dans les tirants.

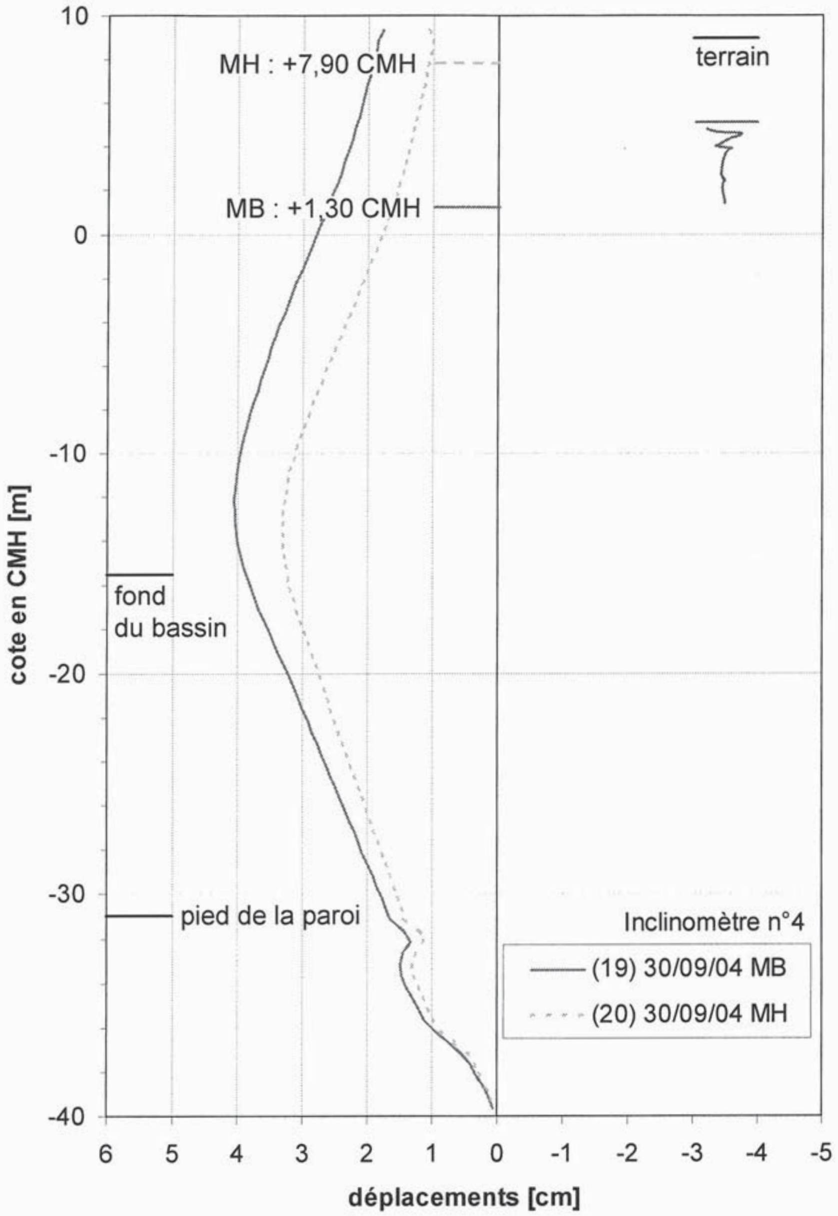


Figure 4 : Déplacement de la paroi mesurés dans la configuration finale, pour les situations de marée basse et de marée haute.

Qualité des ambiances

Partie « Acoustique »

Acoustique du bâtiment et environnementale

Mesure de l'absorption acoustique d'un matériau

Problème n°1 : Mesure en chambre réverbérante

Ce problème présente la méthode de mesure du coefficient d'absorption d'un matériau, en salle réverbérante. Les différentes étapes proposées ci-après permettent de retrouver les expressions nécessaires au calcul du coefficient d'absorption à partir de la mesure de la durée de réverbération dans une salle d'essai, avec et sans matériau.

1 – **Bilan d'énergie dans une salle fermée.**

Considérons une salle fermée de dimension homogène de volume V (en m^3), de surface S (en m^2) et d'absorption moyenne α, dans laquelle est disposée une source de puissance acoustique $P(t)$ (en W). On montre que l'équation bilan de la densité d'énergie sonore w dans la salle s'écrit:

$$P(t) = V\frac{\partial w}{\partial t} + c\frac{A_1}{4}w + m\,c\,V\,w\,, \qquad (1)$$

où c est la célérité du son (en m/s), et m le coefficient d'atténuation atmosphérique (1/m).

(a) Rappeler et discuter l'hypothèse principale de la théorie utilisée pour obtenir cette équation ;
(b) En déduire la signification physique de chacun des termes de l'équation (1) ;
(c) Rappeler la définition du terme A_1.

2 – **Réverbération dans la salle.**

(a) Résoudre l'équation (1) en régime variable après extinction de la source ;
(b) Rappeler la définition de la durée de réverbération (noté T_1) ;
(c) Donner l'expression de la durée de réverbération T_1 en fonction de V, c, A_1 et m ;
(d) Montrer que le paramètre A_1 s'écrit :

$$A_1 = \frac{55.3V}{cT_1} - 4mV\,. \qquad (2)$$

3 – **Mesure du coefficient d'absorption d'un matériau dans la salle.**

Un matériau plan, dont on cherche à déterminer le coefficient d'absorption α_m, est disposé sur le sol de la salle. La surface de la salle recouverte par le matériau est égale à S_m. On néglige les effets de bord et l'épaisseur du matériau. On suppose également que les conditions atmosphériques ne changent pas sur la durée des expérimentations.

(a) Préciser en quoi l'ajout du matériau dans la salle réverbérante modifie la durée de réverbération initiale de la salle ;
(b) De manière similaire à l'équation (2), écrire l'expression du paramètre A_2 de la salle en présence de l'échantillon, en fonction de la nouvelle durée de réverbération T_2 ;
(c) En déduire l'expression du paramètre A (qu'on notera A_{m}) du matériau (dans le calcul, on sera amené à négliger la surface du matériau S_{m} par rapport à la surface de la salle S, i.e. $\alpha(S-S_m)\approx\alpha S$);
(d) En déduire que le coefficient d'absorption α_m du matériau s'obtient par la relation (c=340m/s) :

$$\alpha_m = 0.163\frac{V}{S_m}\left[\frac{1}{T_2}-\frac{1}{T_1}\right]. \quad (3)$$

4 – **Application et discussion**

On souhaite obtenir le coefficient d'absorption d'une laine minérale dont on dispose 5 échantillons de surface unitaire 2.4 m², en utilisant une salle réverbérante d'un volume de 215.6 m^3 et de surface 224.9 m². On mesure les durées moyennes de réverbération avec et sans l'échantillon (tableau 1).

(a) Calculer le coefficient d'absorption du matériau. Reporter sur votre copie et compléter le tableau 1 ;
(b) Quelle est la valeur maximale attendue pour un coefficient d'absorption ? Discuter les raisons pour lesquelles il est possible d'obtenir en pratique des valeurs supérieures ;
(c) Une salle réverbérante présente généralement des dispositifs acoustiques spécifiques (diffuseur, réflecteur) et une forme « irrégulière ». En relation avec la réponse apportée à la question 1(a) plus haut, discuter l'intérêt de ces dispositifs et de la forme de la salle ;
(d) Expliquer pourquoi la méthode de mesure du coefficient d'absorption en salle réverbérante peut donner des résultats différents d'une mesure avec un tube d'impédance (cf. problème n°2).

Bande d'octave	T_1 (s)	T_2 (s)	A (m²)	α_m
125 Hz	21.38	7.01		
250 Hz	19.78	3.7		
500 Hz	15.04	2.39		
1000 Hz	11.10	2.12		
2000 Hz	5.89	1.79		

Tableau 1 – Mesure du coefficient d'absorption d'un matériau en salle réverbérante.

Tournez la page S.V.P.

Problème n°2 : Mesure au tube d'impédance : méthode du taux d'onde stationnaire

Ce problème présente la méthode de mesure du coefficient d'absorption d'un matériau par la méthode du tube d'impédance (ou tube de Kundt). Les trois premières parties du problème reviennent sur l'établissement des relations de base (réflexion/absorption d'une onde plane). La quatrième partie présente l'utilisation d'un tube d'impédance pour calculer le coefficient d'absorption du matériau, en utilisant les relations de base.

1 – **Expression de l'onde sonore devant une paroi**

Considérons une onde plane incidente $p_i(x,t)$ se propageant dans l'air, suivant les x croissants à la vitesse c, et arrivant sur une paroi (figure 1), et soit R le facteur de réflexion complexe de la paroi, définis respectivement par :

$$p_i(x,t) = p_0 \exp(i[\omega t - kx]), \tag{4}$$

et

$$R = r \exp i\varphi, \tag{5}$$

où p_0 désigne l'amplitude complexe de la pression, k le nombre d'onde, ω la pulsation et φ la phase du facteur de réflexion.

(a) Exprimer la pression sonore $p_r(x,t)$ réfléchie par la paroi ;
(b) En déduire la pression sonore $p(x,t)$ totale devant la paroi.

2 – **Expression de l'impédance de la paroi**

La vitesse particulaire $v(x,t)$, associée à la pression $p(x,t)$, a pour expression :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -i\,\rho_0 \omega\, v(x,t). \tag{6}$$

où ρ_0 est la masse volumique de l'air.

(a) En déduire l'expression de la vitesse particulaire $v(x,t)$ devant la paroi ;
(b) Sachant que l'impédance est définie comme le rapport de la pression acoustique sur la vitesse particulaire, calculer l'impédance $Z(x)$ du champ sonore ;
(c) En déduire que l'impédance $Z = Z(x=0)$ au niveau de la paroi est donnée par :

$$Z = \rho_0 c \frac{1+R}{1-R}. \tag{7}$$

3 – **Expression du coefficient d'absorption de la paroi**

Par définition l'intensité acoustique $I(x)$ est donnée par la relation

$$I(x) = \frac{1}{2}\mathrm{Re}[p\,v^*], \tag{8}$$

où Re[z] est la partie réelle du nombre complexe z, et où z^* désigne l'opérateur conjugué du nombre complexe z.

(a) Calculer l'intensité I_i et I_r, respectivement de l'onde incidente et de l'onde réfléchie ;
(b) Calculer la puissance absorbée $I_a = |I_i| - |I_r|$ par la paroi ($|z|$ désigne le module du nombre complexe z) ;

(c) Le coefficient d'absorption α de la paroi étant défini comme le rapport de l'intensité absorbée sur l'intensité incidente, montrer que :

$$\alpha = 1 - r^2 = 1 - |R|^2 . \tag{9}$$

4 – **Mesure de l'impédance acoustique d'un matériau à l'aide d'un tube de Kundt**

On considère un tube d'impédance cylindrique (figure 2). L'échantillon du matériau à caractériser est localisé à l'extrémité du tube (en x=0). Un haut-parleur situé à l'autre extrémité du tube (x=-L) émet une onde plane sinusoïdale. Un microphone, localisé dans le tube (zone définie par x<0), monté sur un chariot mobile, permet de mesurer la valeur efficace de la pression acoustique dans le tube.

Par définition, la pression efficace $p_e(x)$ de la pression $p(x,t)$ est donnée par la relation :

$$p_e^2(x) = \frac{1}{2} p\, p^* . \tag{10}$$

(a) Donner l'expression de la pression efficace dans le tube ;

(b) Montrer que la valeur de la pression efficace passe par une succession de valeurs minimales p_{min} et maximales p_{max}, telles que :

$$p_{\min} = \frac{|p_O|}{\sqrt{2}}(1 - r), \tag{11}$$

et

$$p_{\max} = \frac{|p_O|}{\sqrt{2}}(1 + r). \tag{12}$$

(c) Calculer le taux d'ondes stationnaires s (défini comme le rapport de p_{max} sur p_{min}) ;

(d) En déduire que le module du coefficient de réflexion vérifie :

$$r = \frac{s - 1}{s + 1} . \tag{13}$$

(a) En déduire l'expression du coefficient d'absorption α de la paroi en fonction du taux d'ondes stationnaires s.

Figures Partie Acoustique

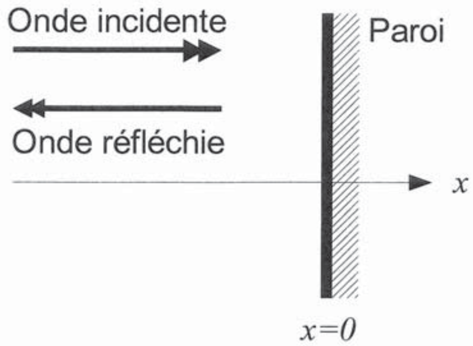


Figure 1 – Réflexion d'une onde plane sur une paroi.

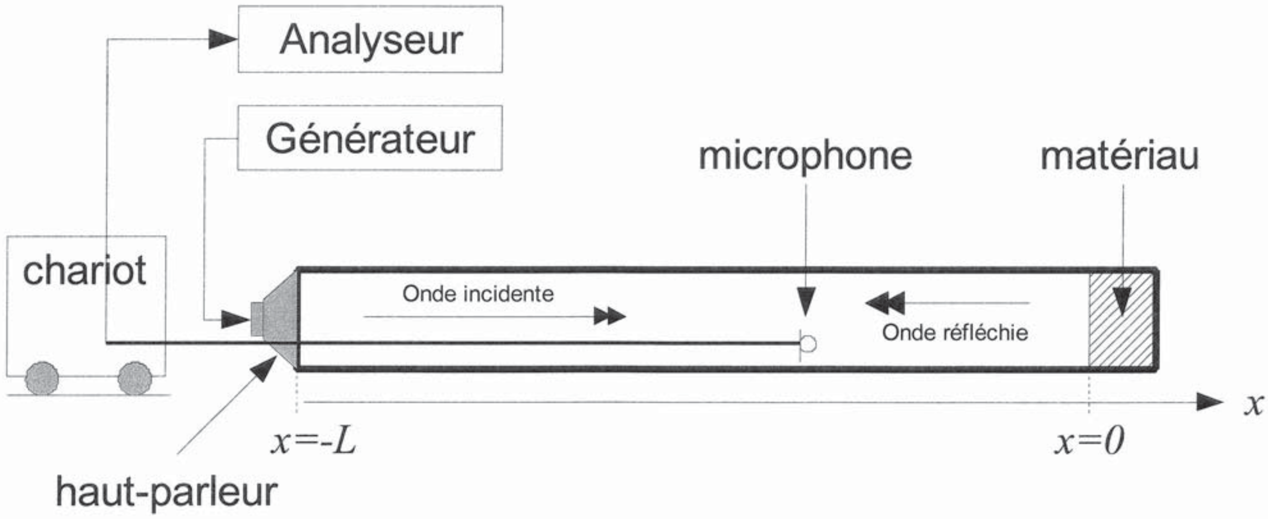


Figure 2 – Schéma de la mesure du coefficient d'absorption d'un matériau avec la méthode du tube d'impédance (méthode du taux d'ondes stationnaires).

Partie « Thermique »

On considère un balcon en saillie extérieure à un bâtiment d'habitation. L, e et P désignent respectivement sa longueur, son épaisseur et sa profondeur (voir figure 1). On retiendra pour le problème les données suivantes : L = 2 m, P=10 m et e =15 cm. Le balcon est en béton armé. Sa conductivité thermique moyenne λ vaut 2 W/(m.K). Le balcon est perpendiculaire au plan de façade du bâtiment. Ce plan est noté A et sert d'origine aux abscisses (x=0)

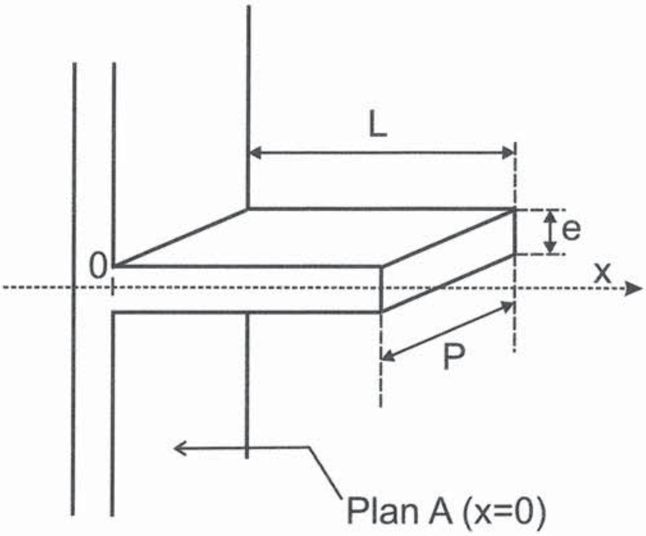


Figure 1 : disposition du balcon

Le problème est consacré à l'étude du transfert de chaleur le long de cette saillie. Cette étude est effectuée en régime permanent.
On se conformera aux hypothèses suivantes :

a- Le transfert de chaleur est unidimensionnel dans la paroi selon l'axe des abscisses.
b- La température est supposée connue et uniforme dans le plan A (x=0). Elle sera notée T_0.
c- Le coefficient de convection h est supposé constant sur les faces supérieures, latérales et inférieures du balcon.
d- La contribution des échanges radiatifs est négligeable.
e- L'extrémité verticale du balcon (en x=L) est supposée adiabatique.
f- La température extérieure est notée T_a.

On admet également que la température est uniforme dans toute section du balcon parallèle au plan de la façade (voir figure 2).

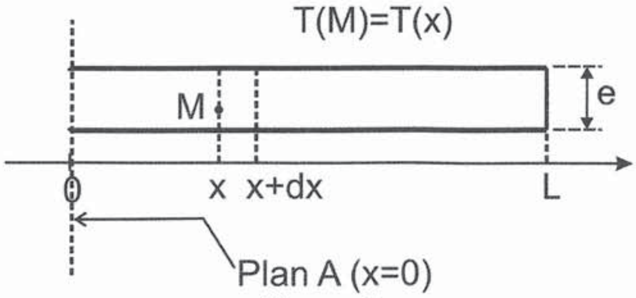


Figure 2

Tournez la page S.V.P.

1) Expliquer quels sont les paramètres qui influent sur le coefficient h et quelle méthode vous utiliseriez pour le calculer. Pour la suite, on retiendra h=5 $W/(m^2.K)$.

2) On considère une tranche du balcon située entre les abscisses x et x+dx (en régime permanent). Etablir, en le justifiant, le bilan énergétique entre cette tranche de longueur dx et son environnement, en fonction de λ, e, P, h et la température T.

3) En déduire l'équation différentielle régissant l'évolution de la température le long du balcon.

4) Déterminer l'expression de l'évolution de la température T(x).

Rappel : une solution générale de l'équation différentielle de la forme $\left(\frac{d^2\theta(x)}{dx^2}\right) - m^2.\theta(x) = 0$ peut s'écrire : $\theta(x) = C_1.\cosh(mx) + C_2.\sinh(mx)$ où C_1 et C_2 sont 2 constantes. cosh et sinh désignent respectivement le cosinus et le sinus hyperboliques.

5) Tracer la courbe de la température dans la saillie en fonction de x dans le cas où T_0=15°C et T_a=-15°C. Justifier dans ce cas l'hypothèse e (extrémité de la saillie adiabatique).

6) En déduire l'expression du flux de fuite Q_f, défini comme la quantité de chaleur traversant la section du balcon en x=0.

7) Déterminer sa valeur numérique.

8) Si on réalise la saillie en matériau infiniment conducteur, expliquer ce que devient la répartition de température dans le balcon.
Que vaudrait dans ce cas le flux de fuite Q_m échangé à travers la section du balcon en x=0 (expression littérale et valeur numérique) ?

Cette saillie est intégrée dans une série de N balcons parallèles espacés d'une distance Δ_b = 2,5 m (de la surface inférieure d'un balcon à la surface supérieure du balcon situé dessous). Cette façade du bâtiment (figure 3) a la même profondeur que les balcons, P=10m.

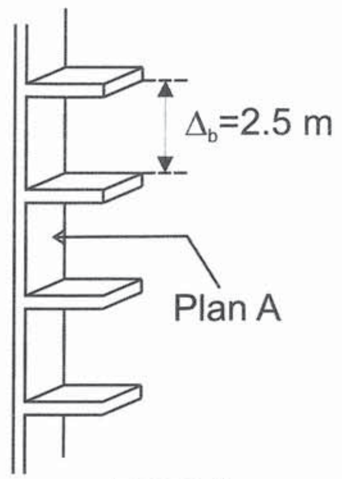


Figure 3

L'ensemble de la surface du mur (plan A) est considéré isotherme et de température T_0. Le coefficient de convection h de ce mur est supposé identique à celui du balcon : h=5 W/(m.K).

9) En établissant le schéma (analogie électrique) des résistances thermiques mises en jeu, déterminer le flux total échangé Q_t entre la surface du plan (A) à T_0 (comprenant les N balcons et les N+1 surfaces verticales) et l'extérieur à T_a. Quelle est sa valeur numérique pour un bâtiment comportant N=8 balcons ?

10) On ajoute un isolant d'épaisseur e_i=3 cm et de conductivité thermique λ_i=0.035 W/(m.K) sur l'extérieur de l'ensemble du mur vertical (figure 4). Tracer le nouveau schéma des résistances mises en jeu. En supposant que l'ajout de cet isolant ne perturbe pas la répartition de température dans le balcon déterminée en question 4, quelle est la part due à la présence des saillies sur le flux total alors échangé ?

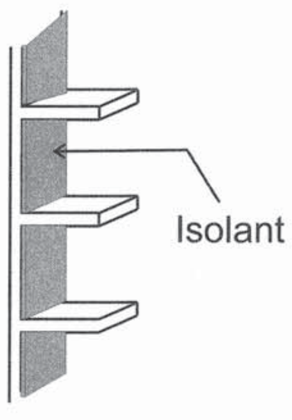


Figure 4

11) Expliquer quels problèmes particuliers peuvent être engendrés par ce type de pertes linéiques dans un bâtiment.