

SESSION 2010

**AGREGATION
CONCOURS EXTERNE**

Section : GÉNIE CIVIL

**ÉPREUVE DE GÉOTECHNIQUE
ET DE QUALITÉ DES AMBIANCES**

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.

Cette épreuve est constituée de deux sujets indépendants :

- géotechnique et environnement ;
- qualité des ambiances (partie acoustique et partie thermique).

Il est demandé aux candidats de traiter les deux sujets sur des copies séparées.

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 : Hormis l'en-tête détachable, 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.

Géotechnique et environnement

Avertissement :

Les membres du jury proposent aux candidats un problème qui permet des développements des fondamentaux de la géotechnique en direction de l'identification, de la caractérisation des matériaux géotechniques, de la réalisation des essais, de la réalisation et du calcul des ouvrages en interaction avec le sol.

Le sujet est rédigé afin que les différentes parties puissent être traitées de manière relativement indépendante. Toute donnée numérique non fournie est laissée à l'appréciation des candidats. Les candidats se reporteront lorsque nécessaire aux annexes fournies. Les documents supports utilisés par les candidats seront joints aux copies.

Généralités

Le problème traite de la réalisation d'une voie sur berge longeant une rivière, ce qui nécessite de réaliser des travaux de terrassement le long du lit et tout particulièrement devant une culée d'un pont existant permettant de franchir cette rivière.

Le problème traite en partie de la réalisation de la voie avec sa stabilité et de la stabilité de la culée de l'ouvrage existant. Les figures 1 et 2 représentent le profil type de la berge respectivement avant et après travaux.

On retient pour le projet un niveau d'eau correspondant à la crue décennale, à la cote 34,00.

Le niveau de la chaussée à réaliser se situe à la cote 35,30.

Les remblais à l'arrière de la culée sont constitués par des graves limoneuses à sableuses.

La culée en place est établie superficiellement à la cote 36,95 sur des alluvions sableuses à graveleuses avec blocs rencontrés dans les reconnaissances jusqu'à la cote 25,00, alluvions constituant les berges de la rivière que l'on retrouve donc sur le linéaire courant du tracé de la voie sur berge.

La géologie du site

La carte géologique du site fournit les premiers éléments d'appréciation de l'environnement géotechnique du site d'aménagement de la voie.

Situé dans une vallée glaciaire, le substratum est placé très bas par rapport au niveau des travaux futurs à réaliser. Les dépôts ont été érodés par la rivière dont le lit s'est déplacé pour se stabiliser à son emplacement actuel. Les berges sont naturelles et constituées de matériaux en place.

1) A quelle période géologique correspond la fin de la dernière glaciation ? En donner la date. Expliquer les différences géomorphologiques notables entre une vallée glaciaire et une vallée fluviale ?

2) Le site se trouvant en région montagneuse, l'érosion a agi sur le site a posteriori. Quelle est la conséquence possible sur la stratigraphie rencontrée sur le projet ? Quels sont les risques principaux auxquels le chantier devra faire face pour sa réalisation ? De quels moyens dispose-t-on pour affiner l'étude ?

Nature et caractéristiques des matériaux

3) Un échantillon de matériau a été prélevé en partie haute d'un forage réalisé dans la berge naturelle. Le poids spécifique des grains est égal à $26,5 \text{ kN/m}^3$. On mesure son poids volumique sec $\gamma_d = 16,8 \text{ kN/m}^3$ et son poids volumique total $\gamma = 18,3 \text{ kN/m}^3$. Comment mesure-t-on la teneur en eau w d'un échantillon ? On trouve $w = 9,1 \%$. Déterminer l'indice des vides et l'état de saturation de l'échantillon.

4) A partir d'une prise d'échantillon, le matériau a été écrêté à 4 cm et une granulométrie a été réalisée. La masse sèche totale de l'échantillon est de 16954 g. Les différentes quantités de matériaux sont données par classes après tamisage (tableau 1).

Tableau 1

Tamis (mm)	40	31,5	20	10	5	2	1	0,5	0,2	0,08
Refus (g)	0	366	1357	4836	2461	825	1909	2487	1696	339

Tracer la courbe granulométrique. Déterminer son coefficient d'uniformité et son coefficient de courbure. Classifier le matériau au sens de la classification USCS/LCPC.

5) Estimer la perméabilité du matériau à partir de la distribution granulométrique.

6) Les matériaux constituant le remblai à l'arrière de la culée ont été mis en place par compactage de couches successives. Citez les différentes qualités de compactage. Indiquez notamment à quelle compacité moyenne sur l'épaisseur d'une couche élémentaire et à quelle compacité minimale en fond de couche ces qualités correspondent.

Un sondage au pénétrodensitographe PDG1000 a été réalisé dans le remblai. Il montre que ce remblai est globalement compacté à la qualité q4. Parallèlement, un essai Proctor normal a été réalisé sur un échantillon de matériau de remblai. Les résultats de cet essai sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2

Teneur en eau w (%)	8,5	10,2	11,8	13,9	15,7
Masse volumique sèche ρ_d (Mg/m^3)	1,883	1,951	1,990	1,942	1,830

Décrire le principe de fonctionnement du pénétrodensitographe. Représenter la courbe « Proctor normal » du matériau et déduisez en la teneur en eau à l'optimum « Proctor normal w_{OPN} » et la masse volumique à l'optimum « Proctor normal ρ_{dOPN} ». Quelle est la densité du matériau constituant le remblai, compacté en qualité q4 ? Donner l'équation de la courbe de saturation et la représenter également sur le graphique Proctor.

7) Afin de déterminer les caractéristiques de résistance du matériau de remblai, des essais de

cisaillement direct à la boîte ont été réalisés. La boîte utilisée est carrée de côté 5 cm. Rappeler le principe, l'interprétation et les paramètres donnés par l'essai de cisaillement à la boîte. Les résultats obtenus lors d'un essai représentatif sont donnés dans le tableau 3. Représenter graphiquement ces résultats, déterminer les paramètres critiques et déduire les caractéristiques de cisaillement des remblais à l'arrière de la culée.

Tableau 3

Déformation horizontale (%)		Force de cisaillement T (N)							
		0	1	2	3	4	5	6	7
σ_n (kPa)	50	0	50	91	80	69	47	45	44
	100	0	95	150	169	140	120	115	114
	200	0	170	250	325	280	270	265	262

8) En complément, des essais ont été réalisés à l'appareil triaxial à vitesse rapide sur des échantillons saturés en eau avec mesure de la pression interstitielle. Décrire le principe de l'essai. Reporter sur un diagramme adapté les résultats à la rupture des essais retenus (tableau 4) et déterminer les caractéristiques à long terme du matériau. Commenter.

Tableau 4

Essai	1	2	3	4
σ_1 (kPa)	240	720	700	1265
σ_3 (kPa)	100	300	400	500
u (kPa)	25	70	150	185

9) Pour caractériser le matériau en place, des essais pressiométriques ont été réalisés. Le résultat d'un essai réalisé à 4 m de profondeur est donné en figure 3. Décrire le principe de l'essai ; on s'aidera d'un schéma explicatif clair. Interpréter l'essai fourni et donner la valeur du module pressiométrique.

10) Un sondage a été réalisé proche de la culée existante afin de caractériser le matériau constituant l'assise de la fondation. Le profil pressiométrique est donné en figure 4. Evaluer la contrainte admissible par le sol au niveau de la fondation de la culée.

Le projet, conception et vérification

Profil linéaire normal

On se propose d'étudier dans un premier temps, un profil en travers type du linéaire de la voie le long de la berge. Afin de loger l'emprise de la voie, une solution d'écran en palplanches est

proposée pour stabiliser les déblais à réaliser (Figure 2). On profitera de ce rideau pour réaliser en partie supérieure une zone de stationnement. Un écran de palplanches avec un niveau d'ancrage en partie haute est retenu.

11) Décrire la méthodologie de réalisation de l'écran et le phasage des travaux à prévoir.

12) Afin de prédimensionner l'écran, on effectue un calcul à l'état limite, en supposant les propriétés mécaniques données sur la figure 5 et un frottement nul sur l'interface sol-écran.

Déterminer l'expression et la valeur des coefficients actif et passif.

Donner la configuration la plus défavorable pour le calcul.

Calculer la distribution des contraintes le long de l'écran.

13) En supposant l'écran simplement buté en pied et en divisant par 2 les capacités de réaction théorique en passif, déterminer la profondeur estimée du rideau de palplanches, et l'effort dans les tirants par ml.

14) En considérant la mise en place d'un tirant tous les 4 ml, ceci est-il compatible avec la courbe d'essai fournie en figure 6. On considèrera pour les tirants un diamètre de forage de 120 mm, et un coefficient majorateur $\alpha = 1,2$ (tenant compte du sol d'ancrage et de la technique de réalisation du scellement).

Profil particulier au droit de la culée existante

Sur les figures 7 et 8, on donne respectivement la coupe de la situation initiale et la coupe de la situation finale envisagée pour l'établissement de la voie au droit de la culée.

Etat initial (avant projet)

15) La descente de charge est fournie par ml de largeur d'ouvrage dans le tableau 5 ci-dessous. En considérant le schéma simplifié proposé en figure 9 et une poussée des terres horizontale, évaluer le torseur résultant à la base de la semelle existante. On prendra un poids volumique $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ pour le béton armé.

b

Tableau 5

Effort	Notation	Valeur (kN/ml)
Poids propre du tablier	P tab	130
Surcharge sur le tablier	R surch	17
Charge d'exploitation sur le tablier	R exp	80
Effort de freinage	R frein	30

16) Vérifier la stabilité au renversement et au glissement de la semelle sans considération de pondération des charges.

17) A partir de la formule de Terzaghi, évaluer la capacité portante de la fondation. Juger de son état «sécuritaire ».

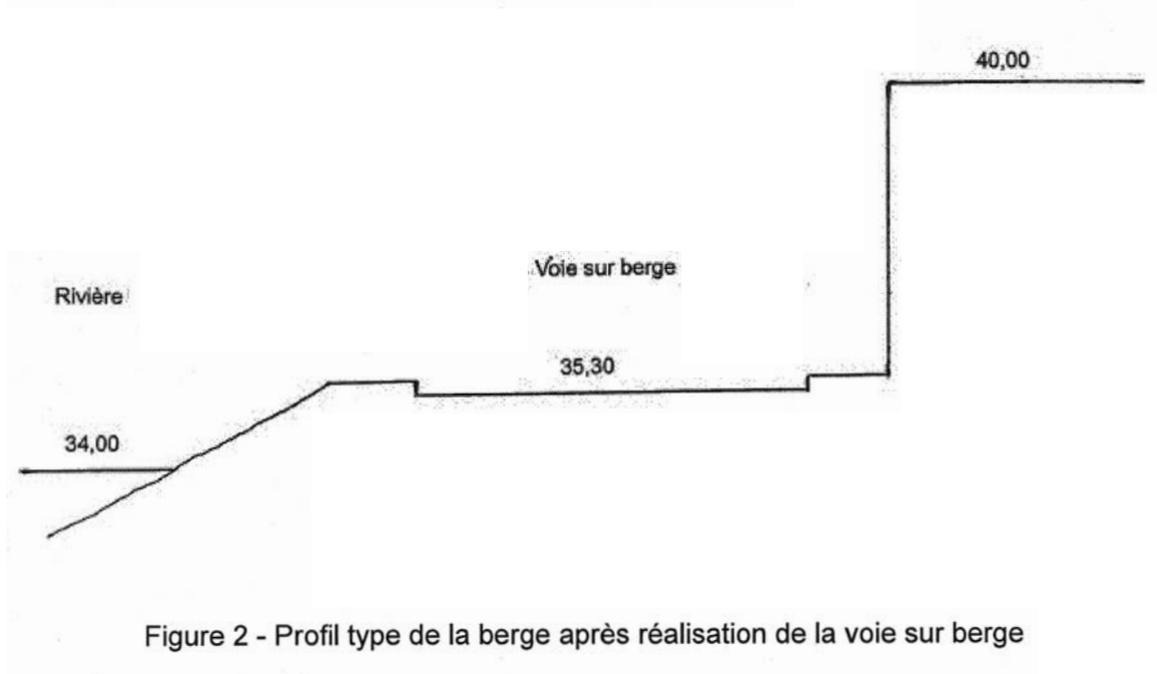
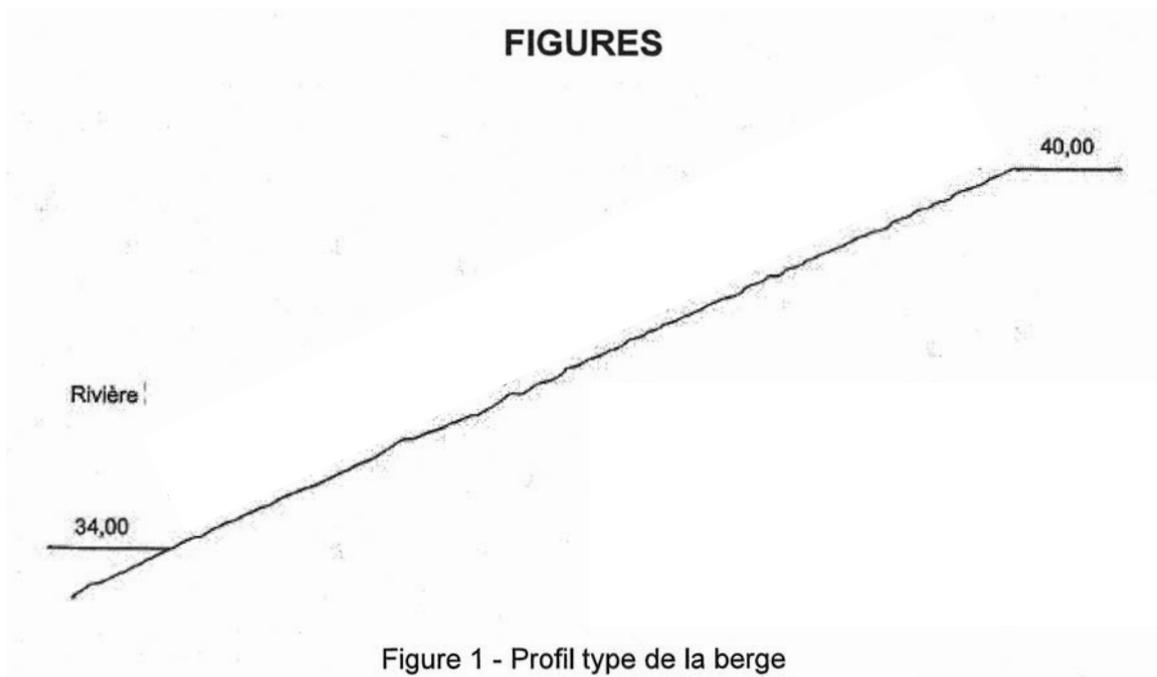
Etat final (projet)

18) Proposer un phasage d'exécution détaillé et « réaliste » des travaux de reprise pour passer de l'état initial (avant projet) à l'état final du projet. On développera précisément les techniques proposées pour l'amélioration en zone A et en zone B (voir figure 10), leur mode de réalisation, leur phasage de fabrication.

19) En posant que l'emprise latérale des zones améliorées A et B est identique et de longueur 8m par rapport au parement fini, proposer une approche de vérification de la stabilité du dispositif construit.

20) Afin de contrôler l'intégrité de l'ouvrage existant pendant les travaux (ceux-ci étant réalisés sous circulation maintenue), un suivi topographique est mis en place. Donner son principe, son mode d'acquisition. Dans le cas d'une procédure automatisée, proposer un protocole d'alerte possible à partir des mesures réalisées.

FIGURES



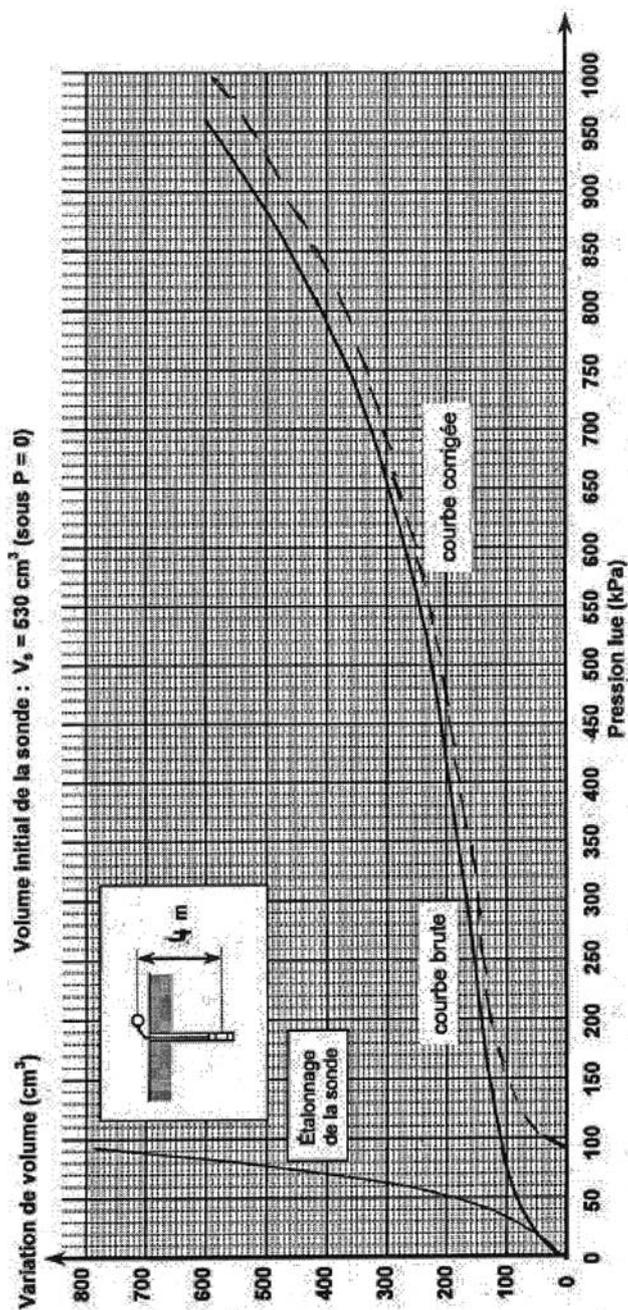
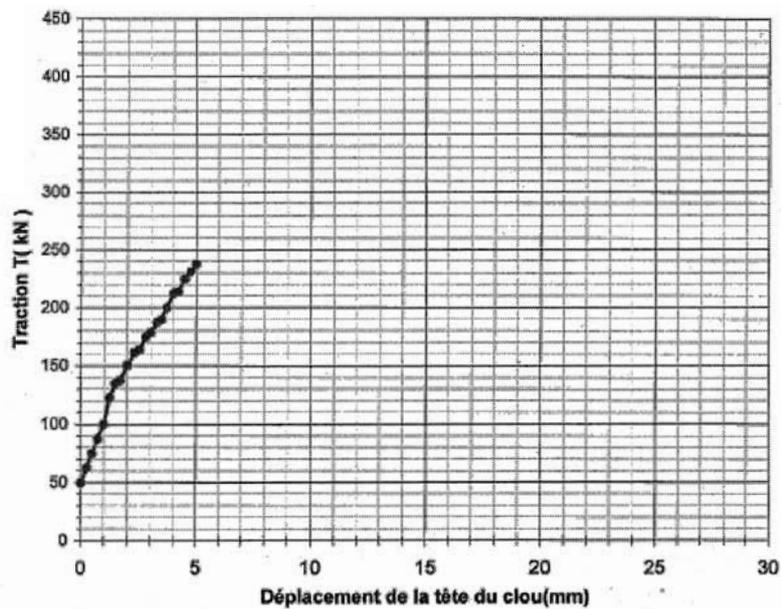
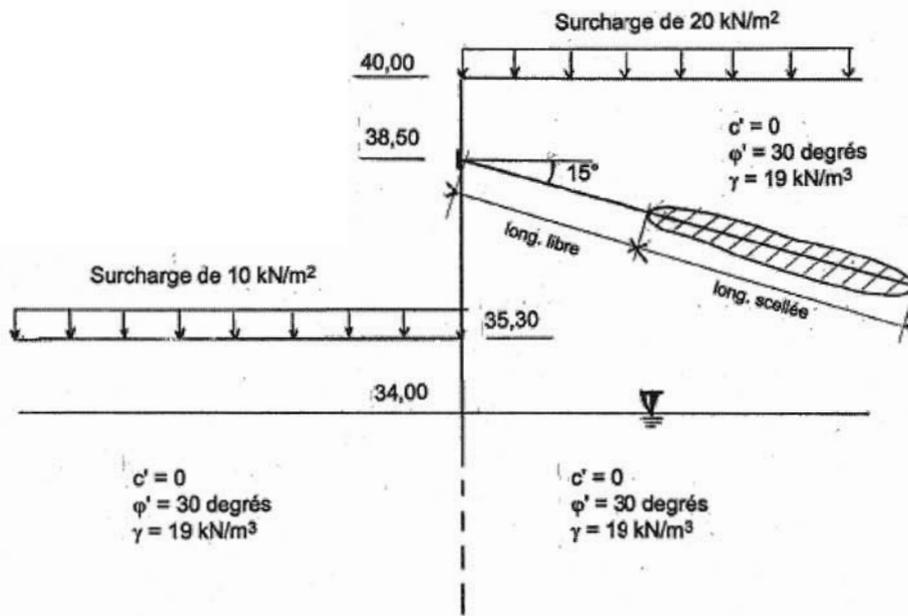


Figure 3 – Essai pressiométrique à 4 m de profondeur



Traction Estimation	$T_{LE} =$	kN
	$T_{max} = 2T_{LE} =$	kN
Traction Résultats	Effort de pic : $T_{LP} =$	237.5 kN
	$T_{LR} =$	kN
Contrainte de frottement latéral :	$q_{SP} =$	210.0 kPa
	$q_{SR} =$	kPa

Figure 6 – Essai de tirant.

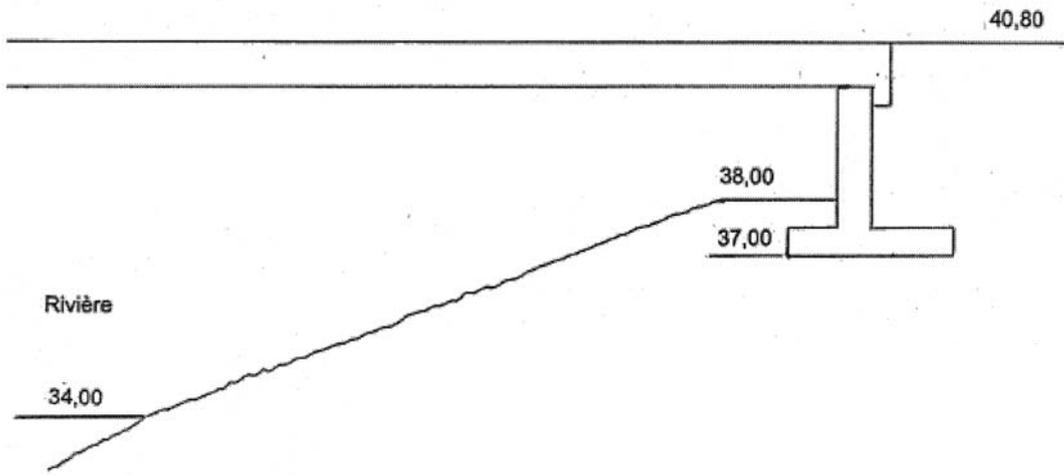


Figure 7 – Profil au droit de la culée de l'ouvrage : état initial.

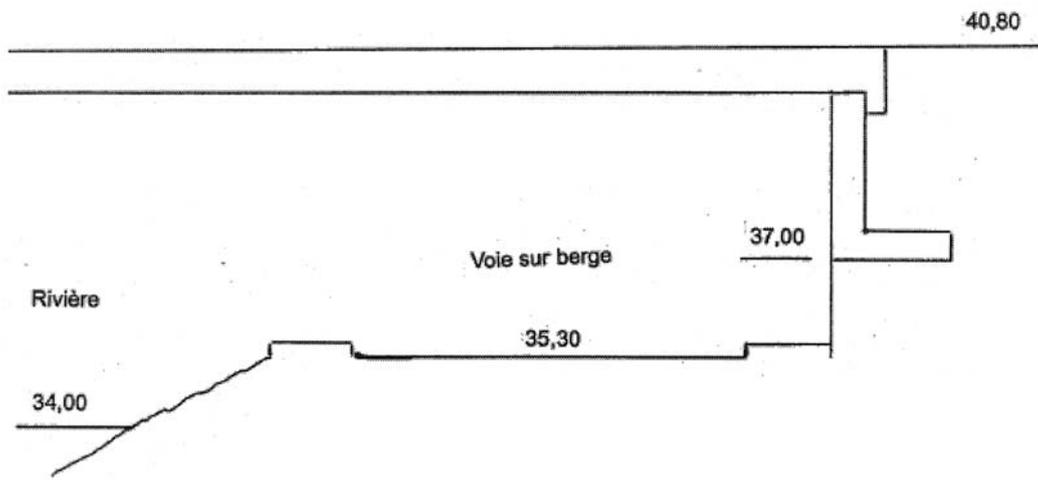


Figure 8 – Profil au droit de la culée de l'ouvrage : état final.

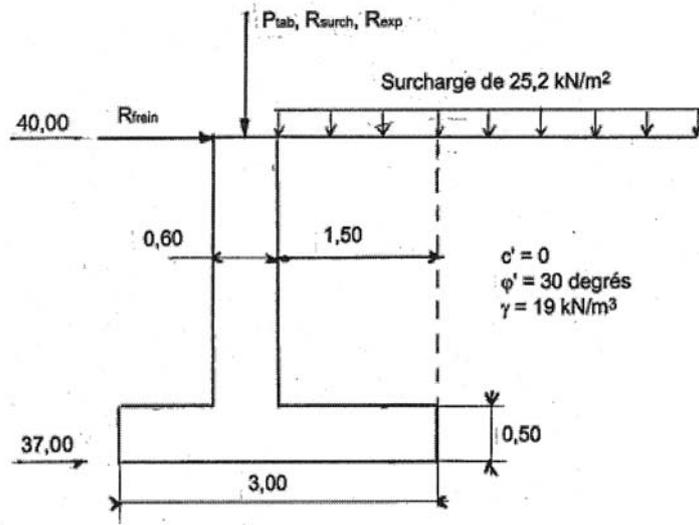


Figure 9 – Profil simplifié pour les calculs sur le mur de front de la culée.

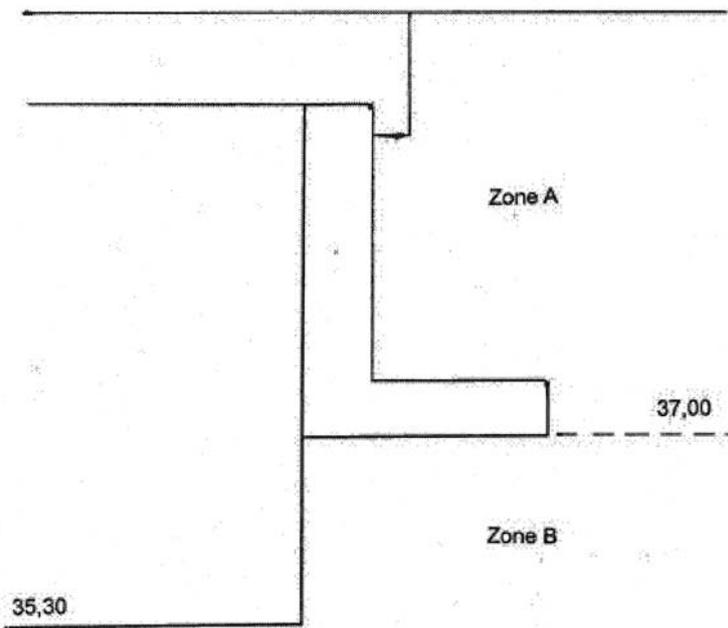


Figure 10 – Profil au droit de la culée après réalisation de la voie sur berge.

Classification USCS/LCPC des sols

d_{50}	fraction > 80 μm	fraction < 80 μm		nom LCPC	symbole USCS
SOLS GRENUS	majorité > 2 mm GRAVES	0 à 5% Grave propre	$C_U > 4$ et $1 < C_C < 3$	Gb grave propre bien graduée	GW
			sinon	Gm grave propre mal graduée	GP
		5 à 12 %	diagramme de plasticité : au-dessus de la ligne A	GA grave argileuse	GC
			diagramme de plasticité : au-dessous de la ligne A	GL grave limoneuse	GM
		> 12 %	double classement et double symbole		GA/GL - Lp/Lt/Ap/At
	majorité < 2 mm SABLES	< 5 % Sable propre	$C_U > 6$ et $1 < C_C < 3$	Sb sable propre bien gradué	SW
			sinon	Sm sable propre mal gradué	SP
		5 à 12 %	diagramme de plasticité : au-dessus de la ligne A	SA sable argileux	SC
			diagramme de plasticité : au-dessous de la ligne A	SL sable limoneux	SM
		> 12 %	double classement et double symbole		SA/SL - Lp/Lt/Ap/At
SOLS FINS	Détermination des limites de consistance sur la fraction < 0,42 mm				
	<p>Les dénominations dépendent de la position du point sur le diagramme : argile au-dessus de la ligne A, limon au-dessous de la ligne A ; peu plastique si $w_L < 50$; très plastique si $w_L > 50$. Les sols organiques O ont plus de 10% de matières organiques.</p>				<p>At = CH Ap = CL Lt = MH Lp = ML Ot = OH Op = OL</p>

Calcul de la pression limite nette équivalente

2. - PRESSION LIMITE EQUIVALENTE p_{ie}^*

2.1. - Fondations superficielles

2.1.1. - Terrain homogène

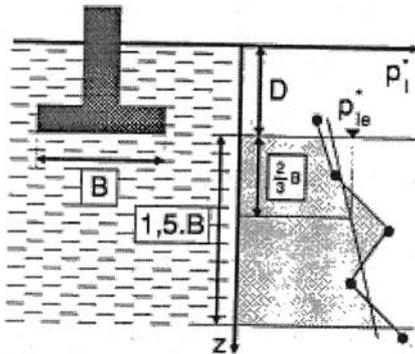
Le terrain est constitué sous la fondation, jusqu'à une profondeur d'au moins $1,5 \cdot B$, d'un même sol, ou de sols de même type et de caractéristiques comparables.

Dans ce cas, on établit un profil linéaire schématique, représentatif de la tranche de sol $[D; D + 1,5 \cdot B]$, de la forme :

$$p_i^*(z) = az + b$$

La pression limite équivalente est prise égale à :

$$p_{ie}^* = p_i^*(z_e) \quad \text{avec : } z_e = D + \frac{2}{3} \cdot B$$



2.1.2. - Terrain non homogène

Le terrain est constitué sous la fondation, jusqu'à une profondeur d'au moins $1,5 \cdot B$, de sols de natures différentes et de résistances mécaniques différentes, mais de même ordre de grandeur.

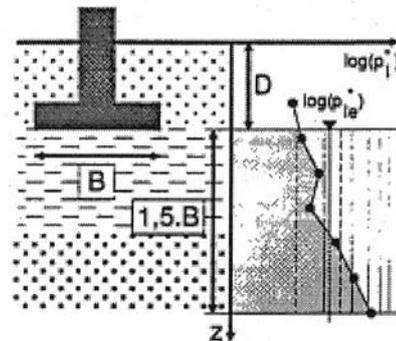
Pour le calcul de p_{ie}^* , après avoir éventuellement éliminé les valeurs singulières (dues, par exemple, à la présence de blocs ou concrétions), on procède à une moyenne géométrique sur la tranche de sol $[D; D + 1,5 \cdot B]$:

$$p_{ie}^* = \sqrt[p_i^* \cdot p_{i2}^* \cdot \dots \cdot p_{in}^*]$$

ce qui est sensiblement équivalent à l'expression plus générale :

$$\log(p_{ie}^*) = \frac{1}{1,5 \cdot B} \int_D^{D+1,5 \cdot B} \log(p_i^*(z)) \cdot dz$$

$p_i^*(z)$ étant obtenu en joignant par des segments de droite sur une échelle logarithmique les différents p_i^* mesurés.



FORMULAIRE

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

$$C_C = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}}$$

Formule de Hazen : $k = 100 \cdot (d_{10})^2$

Formule de Kozeny : $k = 12500 \cdot \frac{n^3}{(1-n^2)} \cdot (d_{10})^2$

Formule de Lousberg : $k = 195 \left[\frac{n}{0,45} \right]^6 (d_{10})^2$

$$k_p = 1 + 0,80 \cdot (0,6 + 0,4 \cdot \frac{B}{L}) \cdot \frac{D_e}{B}$$

$$q_{\max} = c' N_c s_c i_c b_c + q' N_q s_q i_q b_q + 0,5 \gamma' B' N_y s_y i_y b_y$$

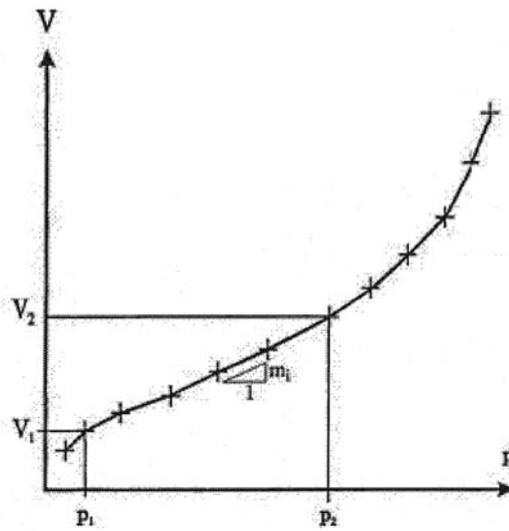
Les différentes notations et relations permettant de déterminer les termes de cette relation sont présentés en page suivante.

	Terme de surface ou gravité N_γ		Terme de profondeur N_q		Terme de cohésion N_c	
	$N_\gamma = 2(N_q - 1)\tan\varphi$		$N_q = \exp(\pi \tan\varphi) \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$		$N_c = (N_q - 1)\cot\varphi$	
Valeurs de N_γ, N_q, N_c	φ (deg)	N_γ	φ (deg)	N_q	φ (deg)	N_c
	0	0	0	1	0	5,1
	5	0,11	5	1,6	5	6,5
	10	0,50	10	2,5	10	8,3
	15	1,60	15	3,9	15	11,0
	20	4,60	20	6,4	20	14,8
	25	9	25	10,7	25	20,7
	30	20	30	18,4	30	30,1
	35	45	35	33,3	35	46,1
	40	106	40	64,2	40	75,3
45	268	45	134,9	45	133,9	
Forme ⁽¹⁾ c', φ'	$s_\gamma = 1 - 0,3 \frac{B'}{L'}$		$s_q = 1 + \frac{B'}{L'} \sin\varphi'$		$s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1}$	
Profondeur	(pas de formule)		(pas de formule)		(pas de formule)	
Inclinaison de la charge ⁽²⁾	$i_\gamma = \left[1 - \frac{H}{V + A'c' \cot\varphi'}\right]^{m+1}$		$i_q = \left[1 - \frac{H}{V + A'c' \cot\varphi'}\right]^m$		$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c} \tan\varphi'$	
Inclinaison de la semelle	$b_\gamma = (1 - \alpha \tan\varphi)^2$		$b_q = (1 - \alpha \tan\varphi)^2$		$b_c = b_q - \frac{1 - b_q}{N_c} \tan\varphi$	
Talus	(pas de formule)		(pas de formule)		(pas de formule)	
Excentrement	Réduction de B de $2e_B$ Réduction de L de $2e_L$		Réduction de B de $2e_B$ Réduction de L de $2e_L$		Réduction de B de $2e_B$ Réduction de L de $2e_L$	
Notes						
(1) Les formules sont données pour une semelle rectangulaire de côtés $L > B$. Pour un carré ou un cercle, on fait $L=B$ dans les formules.						
(2) La valeur du paramètre m dépend du sens de l'inclinaison de la charge. Il vaut :						
$m = m_B = 2 + \frac{B'/L'}{1 + B'/L'} \text{ lorsque } H \text{ est dirigée dans la direction de } B,$						
$m = m_L = 2 + \frac{L'/B'}{1 + L'/B'} \text{ lorsque } H \text{ est dirigée dans la direction de } L.$						
Lorsque la force est dirigée dans une direction quelconque θ , le paramètre m vaut :						
$m = m_\theta = m_L \cos^2\theta + m_B \sin^2\theta$						
(3) L' et B' sont les longueur et largeur réduites pour tenir compte de l'excentrement de la charge :						
$L' = L - 2e_L,$						
$B' = B - 2e_B.$						

Relation de détermination du module pressiométrique (norme NF P 94-110-1)

$$E_M = 2(1+\nu) \left(V_s + \frac{V_1 + V_2}{2} \right) \frac{p_2 - p_1}{V_2 - V_1}$$

avec $\nu = 0,33$, V_s volume initial de la cellule centrale de mesure et p_1 , p_2 , V_1 et V_2 présentés sur la courbe pressiométrique corrigée ci-après (figure tirée de la norme NF P 94-110-1).



NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

Académie : _____ Session : _____

Concours : _____

Spécialité/option : _____ Repère de l'épreuve : _____

Intitulé de l'épreuve : _____

NOM : _____

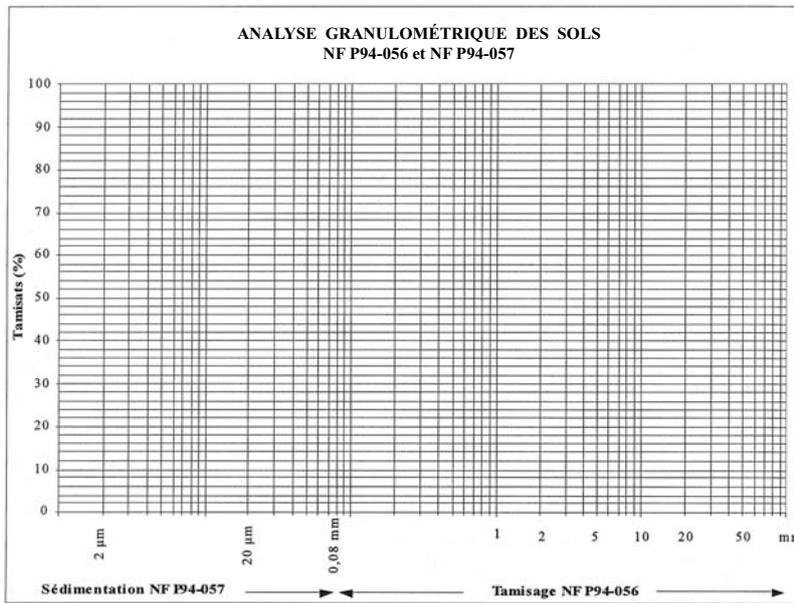
Prénoms : _____ N° du candidat

(en majuscules, suivi s'il y a lieu, du nom d'épouse)

(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)

EAE GCI 2

ANNEXE



Ⓒ

Qualité des ambiances

Partie « Acoustique »

Acoustique du bâtiment et environnementale

Traitement acoustique des bâtiments

Problème n°1 : Etude et traitement des caractéristiques d'absorption d'une salle

Ce problème porte sur l'optimisation du temps de réverbération d'une salle, en proposant un traitement acoustique agissant sur le coefficient d'absorption acoustique de la salle.

La salle est caractérisée par une surface S (300 m^2) et un volume V (250 m^3). On notera S_0 la surface intouchable de la salle (ne pouvant donner un lieu à un traitement acoustique) et S_M la surface sur laquelle il est possible d'apporter un traitement acoustique ($S = S_0 + S_M = 300 \text{ m}^2$). Le coefficient d'absorption de la salle est noté α_0 .

- Rappeler** la formule de Sabine, permettant de calculer le temps de réverbération d'une salle (noté TR), en fonction du volume V , de la surface S et du coefficient d'absorption α_0 de la salle.
- Introduire** la notion d'aire absorption équivalente de la salle (notée A).
- Rappeler** les hypothèses de validité de la formule de Sabine.
- Par nature, le traitement acoustique nécessaire à la salle en question vient modifier l'aire d'absorption équivalente, que l'on notera A_{opt} , de manière à obtenir le temps de réverbération optimal TR_{opt} . En introduisant la différence d'aire d'absorption équivalente $\Delta A = A_{opt} - A$, **montrer** que la valeur idéale α_M du coefficient d'absorption du dispositif de traitement acoustique a pour expression :

$$\alpha_M = \alpha_0 + \frac{\Delta A}{S_M} \quad (1)$$

- Application numérique : **compléter** le tableau N°1 en considérant que la surface S_M vaut 75 m^2 .
- Présenter** et **discuter** différents dispositifs qui permettraient d'obtenir le traitement acoustique souhaité. La discussion pourra porter sur les points suivants : type de dispositifs, phénomènes mis en jeu, efficacité en fréquence, encombrement du dispositif dans la salle, contraintes de sécurité, coût d'installation...

Problème n°2 : Le résonateur de Helmholtz

- (a) Le résonateur est un des systèmes de base du traitement acoustique d'une salle. **Rappeler** et **discuter** les différentes fonctions d'un résonateur dans le cadre d'un traitement acoustique d'une salle (le candidat ne se limitera pas à la simple fonction de « résonance »).
- (b) Détermination de la fréquence propre d'un résonateur : le résonateur est assimilé à une cavité fermée de volume V , communiquant avec l'extérieur *via* un tube étroit de longueur L et de section A (figure 1). L'air est assimilé à un gaz parfait, de masse volumique ρ . Les effets dissipatifs dans la cavité sont négligés.

- i. Soumise à une excitation extérieure (une source sonore), la totalité du volume d'air (colonne d'air) dans le tube est supposée se déplacer d'un déplacement élémentaire x dans la cavité. **En déduire** la variation de volume δV dans la cavité.
- ii. En appliquant la loi de Laplace pour un gaz parfait (rappel $PV^\gamma = \text{constante}$, γ étant le rapport des capacités thermiques), **montrer** que la variation de pression δP dans la cavité s'écrit :

$$\delta P = -\frac{\gamma P}{V} Ax \quad (2)$$

- iii. **Exprimer** la force de rappel δF sur la colonne d'air, engendrée par la variation de pression δP .
- iv. En appliquant la relation fondamentale de la dynamique, **écrire** l'équation du mouvement de la colonne d'air.
- v. **Exprimer** la forme de solution de cette équation et **en déduire** la fréquence propre f_0 du résonateur, en fonction de la célérité du son dans l'air (rappel $c^2 = \gamma p / \rho$), de la section A et de la longueur L du tube, et du volume V de la cavité.
- vi. Application numérique : **calculer** la fréquence de résonance pour une cavité de volume $V = 500 \text{ cm}^3$ avec un tube de longueur $L = 15 \text{ cm}$ de rayon 2 cm .

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

Académie : _____ Session : _____

Concours : _____

Spécialité/option : _____ Repère de l'épreuve : _____

Intitulé de l'épreuve : _____

NOM : _____

(en majuscules, suivi s'il y a lieu, du nom d'épouse)

Prénoms : _____ N° du candidat

(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)

EAE GCI 2

Épreuve « Qualité des ambiances »

Partie « Acoustique »

Acoustique du bâtiment et environnementale

Fréquence	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
TR	2,50	1,17	0,77	2,67	1,43	1,25
A						
α_0						
TR_{opt}	1,20	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00
A_{opt}						
ΔA						
α_M						

Tableau 1 – Détermination du coefficient d'absorption idéal pour le traitement acoustique de la salle étudiée : $V = 250 \text{ m}^3$, $S = 300 \text{ m}^2$, $S_M = 75 \text{ m}^2$.

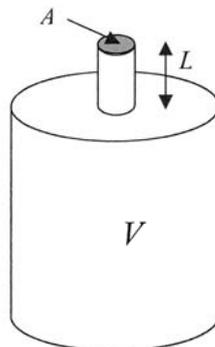


Figure 1 – Géométrie d'un résonateur d'Helmholtz.

Qualité des ambiances

Partie « Thermique »

On étudie les déperditions thermiques d'une paroi vitrée en fonction de ses caractéristiques, dans des conditions hivernales nocturnes.

Dans un premier temps (figure 2), un simple vitrage de $H=1$ m de haut, $L=1$ m de large et $e=6$ mm d'épaisseur est positionné sur une façade. L'air à l'intérieur de la pièce est chauffé à une température $T_{\text{int}}=20^{\circ}\text{C}$ et l'air extérieur est à $T_{\text{ext}}=-10^{\circ}\text{C}$. A l'extérieur, le vent souffle à une vitesse $V_{\infty}=18$ km/h, parallèlement à la façade.

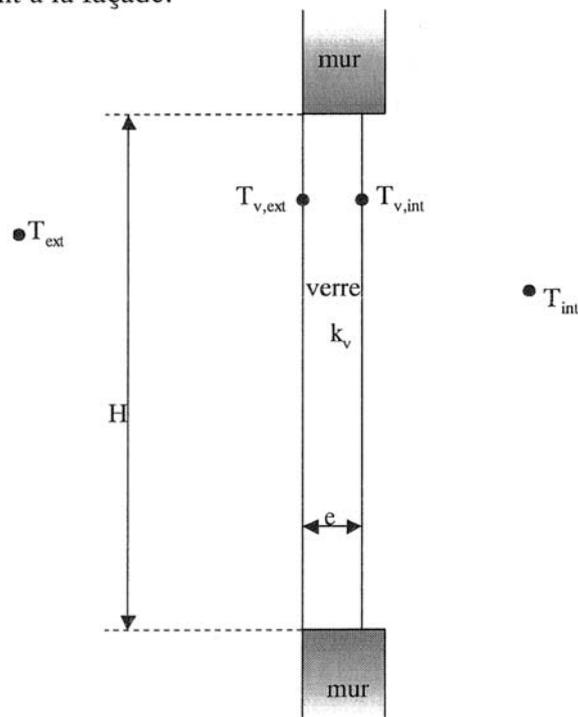


Figure 2 : installation simple vitrage

- 1- Expliquer, à l'aide d'un schéma, les différents phénomènes de transfert de chaleur qui sont mis en jeu dans ce problème. Pour chaque phénomène, préciser entre quel composant et quel autre il a lieu.
- 2- On négligera dans toute la suite les effets de bord dus au mur. Déterminer à partir des données ci-après les valeurs des coefficients d'échange convectifs $h_{c,int}$ et $h_{c,ext}$ de chaque côté du vitrage. Afin de simplifier les calculs, on pourra supposer a priori que le vitrage a une température uniforme de 0°C et on justifiera de cette hypothèse dans les questions ultérieures.

- 3- On donne ci-après des caractéristiques du verre considéré (données). En supposant que l'ensemble des murs de la pièce (en dehors du vitrage étudié) est à $T_{\text{int}}=20^{\circ}\text{C}$ et se comporte comme un corps noir, que l'environnement extérieur du bâtiment se comporte également comme à corps noir à $T_{\text{ext}}= -10^{\circ}\text{C}$, démontrer que le vitrage pourra, dans le reste du problème, être considéré également comme un corps noir.
- 4- Donner l'expression du flux radiatif $\Phi_{r,\text{int}}$ échangé entre le vitrage et les murs de la pièce. Exprimer ce flux sous la forme
$$\Phi_{r,\text{int}} = L.H.h_{r,\text{int}} \cdot (T_{v,\text{int}} - T_{\text{int}})$$
et donner l'expression exacte de h_r .
- 5- Compte tenu des écarts modérés de température mis en jeu dans ce problème, on peut poser
$$T_{\text{moy,int}} = T_{\text{int}} - \delta = T_{v,\text{int}} + \delta$$
avec $\delta = \frac{T_{\text{int}} - T_{v,\text{int}}}{2}$ négligeable devant $T_{\text{moy,int}}$ au second ordre. Exprimer alors $h_{r,\text{int}}$ en fonction de σ_0 et $T_{\text{moy,int}}$ et calculer sa valeur numérique. Calculer de même la valeur de $h_{r,\text{ext}}$ de l'autre côté du vitrage.
- 6- Exprimer le flux Φ_{int} , flux total sur la paroi intérieure du vitrage et Φ_{ext} , flux total sur la paroi extérieure du vitrage, en fonction de $h_{r,\text{int}}$, $h_{r,\text{ext}}$, $h_{c,\text{ext}}$, $h_{c,\text{int}}$, des données géométriques et de températures.
- 7- Dans la suite, on supposera que $h_{c,\text{int}}= 3 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ et $h_{c,\text{ext}}= 23 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. Montrer que la résistance thermique à l'intérieur du verre est négligeable devant les deux résistances thermiques de part et d'autre. Justifier alors l'hypothèse d'uniformité de température du vitrage.
- 8- En déduire l'expression littérale et la valeur numérique du flux Φ_1 traversant le vitrage. Calculer la valeur de la température de la vitre et justifier de l'hypothèse faite en 2-.

Dans un second temps, en vue d'améliorer le confort thermique et acoustique dans la pièce, on envisage de remplacer le simple vitrage existant par un double vitrage, constitué par 2 parois vitrées identiques à celle étudiée dans la première partie et séparées par $d=12 \text{ mm}$ d'air (figure 3). On considèrera que la lame d'air comprise entre les deux vitres reste immobile et que le transfert s'y fait uniquement par rayonnement et conduction.

- 9- En utilisant les résultats obtenus précédemment, exprimer le nouveau flux Φ_2 traversant le double vitrage, en expliquant les hypothèses que vous poserez.
- 10- Calculer la valeur numérique de ce flux et commenter.

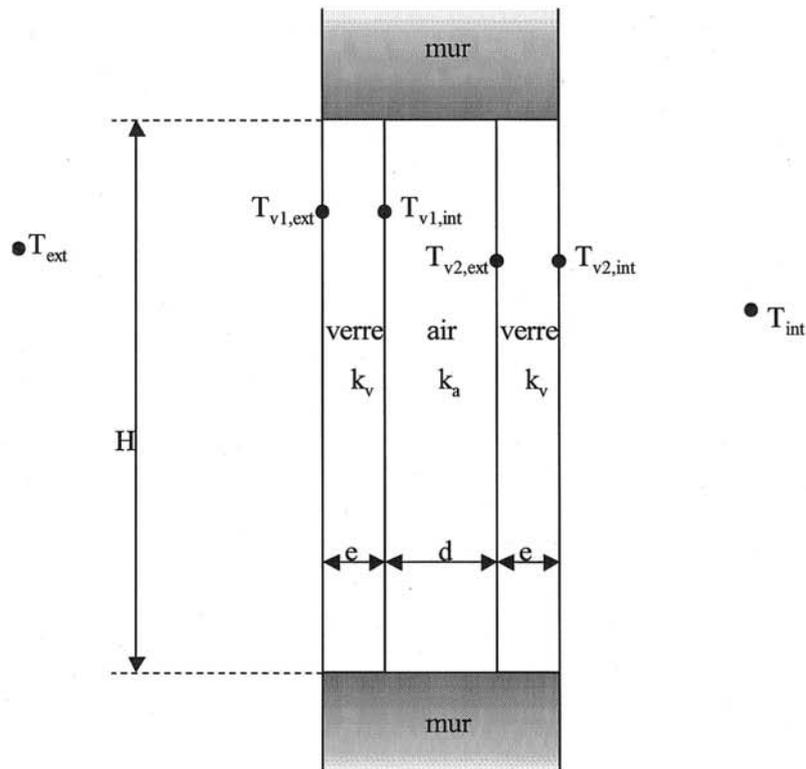


Figure 3 : installation double vitrage

Données

- Les corrélations utiles pour le calcul de Nu sont résumées dans le tableau ci-après, avec :

- Pr nombre de Prandtl : $Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{a}$ avec la diffusivité $a = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$

- Ra nombre de Rayleigh : $Ra = \frac{1}{T_{moy}} \cdot |T_{paroi} - T_{\infty}| \cdot g \cdot L^3$ avec T_{moy} la température de la couche limite et $g=9.81 \text{ m/s}^2$.

- Nu nombre de Nusselt : $Nu = \frac{h_c L}{k}$

configuration	Longueur caractéristique	corrélation	Domaine de validité
Convection naturelle Mur vertical et isotherme	L : hauteur du mur	$Nu = 0.68 + \frac{0.67 \cdot Ra_L^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}}$	$Ra \leq 10^9$
		$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2$	$10^9 \leq Ra \leq 10^{12}$
Convection forcée Plaque plane	L : longueur de la plaque dans le sens de l'écoulement	$Nu = \frac{2}{3} \cdot (Re)^{0.5} (Pr)^{1/3}$	$Re \leq 2100$
		$Nu = 0.036 \cdot (Re)^{0.8} (Pr)^{1/3}$	$Re > 2100$

• Propriétés thermophysiques de l'air à 1 atm :

T K	k W/m K	ρ kg/m ³	c_p J/kg K	$\mu \times 10^6$ kg/m s	$\nu \times 10^6$ m ² /s	Pr
150	0.0158	2.355	1017	10.64	4.52	0.69
200	0.0197	1.767	1009	13.59	7.69	0.69
250	0.0235	1.413	1009	16.14	11.42	0.69
260	0.0242	1.360	1009	16.63	12.23	0.69
270	0.0249	1.311	1009	17.12	13.06	0.69
280	0.0255	1.265	1008	17.60	13.91	0.69
290	0.0261	1.220	1007	18.02	14.77	0.69
300	0.0267	1.177	1005	18.43	15.66	0.69
310	0.0274	1.141	1005	18.87	16.54	0.69
320	0.0281	1.106	1006	19.29	17.44	0.69
330	0.0287	1.073	1006	19.71	18.37	0.69
340	0.0294	1.042	1007	20.13	19.32	0.69
350	0.0300	1.012	1007	20.54	20.30	0.69
360	0.0306	0.983	1007	20.94	21.30	0.69
370	0.0313	0.956	1008	21.34	22.32	0.69
380	0.0319	0.931	1008	21.75	23.36	0.69
390	0.0325	0.906	1009	22.12	24.42	0.69
400	0.0331	0.883	1009	22.52	25.50	0.69
500	0.0389	0.706	1017	26.33	37.30	0.69
600	0.0447	0.589	1038	29.74	50.50	0.69
700	0.0503	0.507	1065	33.03	65.15	0.70
800	0.0559	0.442	1089	35.89	81.20	0.70
900	0.0616	0.392	1111	38.65	98.60	0.70
1000	0.0672	0.354	1130	41.52	117.3	0.70
1500	0.0926	0.235	1202	53.82	229.0	0.70
2000	0.1149	0.176	1244	64.77	368.0	0.70

- Loi de déplacement de Wien : $\lambda_{\max} T \approx 2900 \mu\text{m.K}$ pour un corps gris.

Le domaine utile du spectre d'émission d'un corps gris est compris, à chaque température, entre $0.5 \lambda_{\max}$ et $5 \lambda_{\max}$.

- Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$.

- Caractéristiques du verre :

