

BANQUE D'ÉPREUVES DUT-BTS

- SESSION 2006 -

**ÉPREUVE DE GÉNIE CIVIL
ET
PHYSIQUE DU BÂTIMENT**

CODE ÉPREUVE : BE-CIVI

L'usage de calculatrices électroniques de poche à alimentation autonome, non imprimantes et sans document d'accompagnement, est autorisé, une seule étant admise sur la table ou le poste de travail.

DURÉE : 2h30

Rappel préliminaire :

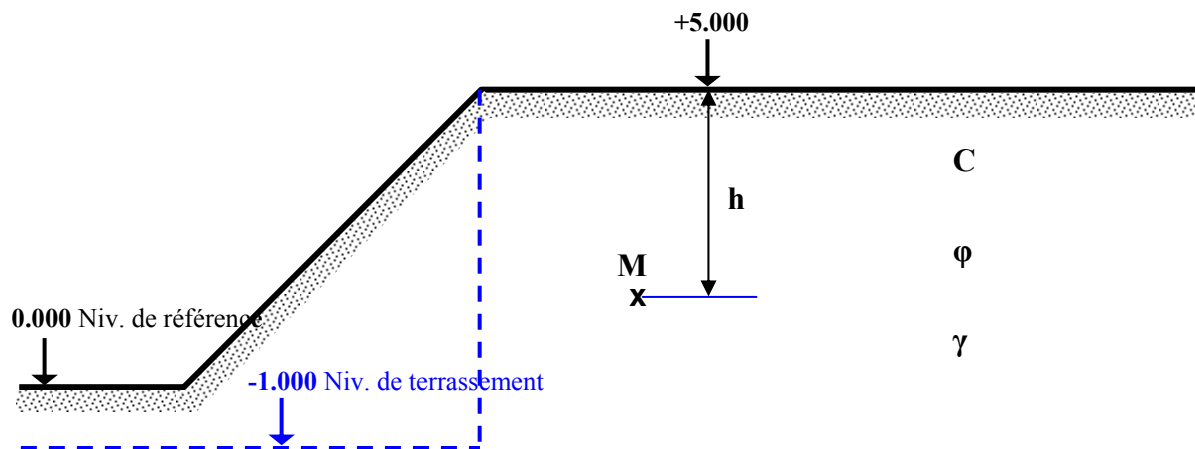
Vous ne devez pas répondre au hasard. Pour chaque item les points obtenus sont toujours négatifs quand la réponse est mauvaise. En cas d'abstention le nombre de points est toujours nul. Un ensemble de bonnes réponses à une question permet d'obtenir des points supplémentaires sous forme de « bonus ».

Attention : certains items peuvent comporter des affirmations multiples, avant de cocher la réponse « V » il faut s'assurer que toutes les affirmations sont correctes.

QUESTION 1

Equilibre d'un sol

Considérons un massif de sol homogène, représenté en coupe verticale sur le schéma ci-dessous. Sur cette coupe, le trait interrompu matérialise la configuration du profil après travaux de terrassement et mise en place d'un « écran de soutènement ».



Les sondages préliminaires ont montré que la nappe phréatique était localisée au niveau -2.000 m. Le sol en place, du niveau +5.000 au niveau -2.000 possède les caractéristiques suivantes :

- cohésion à *long terme* C négligeable ;
- angle de frottement interne $\varphi = 35^\circ$;
- poids volumique $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$.

- (A) Au point M, situé à la profondeur h, la contrainte normale s'exerçant sur une *facette verticale* est nulle.
- (B) En ce même point, la contrainte normale s'exerçant sur une *facette horizontale* située à la profondeur $h = 6 \text{ m}$ est égale à 108 kPa.
- (C) Si la nappe phréatique remonte au niveau 0.000, la contrainte normale s'exerçant sur une *facette horizontale* située à la profondeur $h = 6 \text{ m}$ diminue.

- (D) Avec un sol en place dont la cohésion à *court terme* C_u ou « cohésion non drainée » (résistance au cisaillement) est de 60 kPa, le terrassement linéaire au profil indiqué (avec un parement vertical de 6 m) peut être envisagé sans risque d'éboulement immédiat du terrain.
- (E) Ce massif de sol est maintenant limité par un écran vertical de soutènement sur une hauteur de 6 m, qui maintient le terrain en « équilibre de poussée ». La mise en tension de tirants d'ancrage produit un déplacement horizontal de l'écran de 0,5 cm vers le massif (déplacement supposé uniforme sur la hauteur de l'écran), ce qui entraînera l'accroissement de l'action du terrain sur l'écran d'un facteur supérieur à 10.

QUESTION 2

Soutènement en béton armé

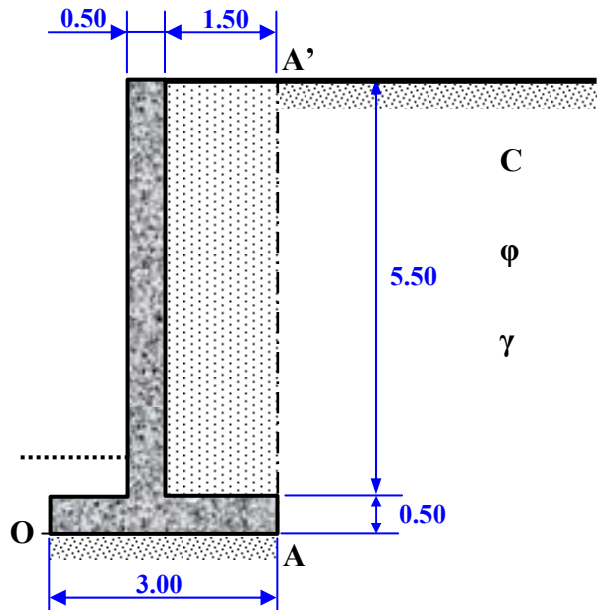
Le schéma ci-contre représente une paroi de soutènement en béton armé de grande longueur, assurant le maintien d'un massif de sol en *état plan de déformation*.

Ce sol est homogène, ses caractéristiques sont les suivantes :

- cohésion à *long terme* C négligeable ;
- angle de frottement interne $\varphi = 35^\circ$;
- pois volumique $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$.

Le sol d'assise possède les mêmes caractéristiques, la nappe phréatique n'atteint pas la fondation de cet ouvrage.

Le poids volumique du béton armé sera pris égal à 25 kN/m^3 .



L'équilibre de ce soutènement sera étudié en considérant une « tranche d'un mètre » d'ouvrage, perpendiculairement à la section transversale représentée ici. Pour cela il s'agit d'isoler l'ensemble limité par le plan fictif (AA'), constitué de l'élément en béton armé et du sol en appui sur la partie arrière de la semelle.

- (A) Le poids total de la partie isolée est de $254,75 \text{ kN}$; le vecteur associé se situe à une distance de $1,87 \text{ m}$ du point O.
- (B) Au-delà du plan (AA'), le sol est en état de poussée. A partir de la théorie de Rankine (selon laquelle en un point du plan vertical, à la distance h du point A', la contrainte tangentielle est négligeable et la contrainte normale est égale à $K_a \cdot \gamma h$; K_a étant déterminé à partir de l'angle de frottement interne du terrain) on trouve une résultante de poussée sur (AA') égale à $87,8 \text{ kN}$.
- (C) Le coefficient de sécurité vis-à-vis du renversement s'obtient en effectuant le rapport : [moment dû au poids de la partie isolée / moment dû aux actions de poussée sur (AA')] par rapport au point O. Ce calcul nous donne un coefficient supérieur à 3.

 Pour l'étude de la transmission des efforts au niveau de l'assise (OA), nous nous référons au repère $\{I, X, Y\}$ rattaché à l'axe de la semelle : schéma ci-contre.



- (D) On exprime au point I le torseur associé aux actions de poussée et au poids de la partie isolée. Le moment correspondant dépasse 80 kN.m .

- (E) En faisant l'hypothèse d'une répartition linéaire des contraintes normales au niveau du sol d'assise, connaissant les dimensions de la semelle, à partir du résultat précédent on calculera la valeur des contraintes extrêmes (appliquées au sol en O et en A).
On montre ainsi que l'assise est totalement en compression et que la contrainte ne dépasse pas 150 kPa.

QUESTION 3

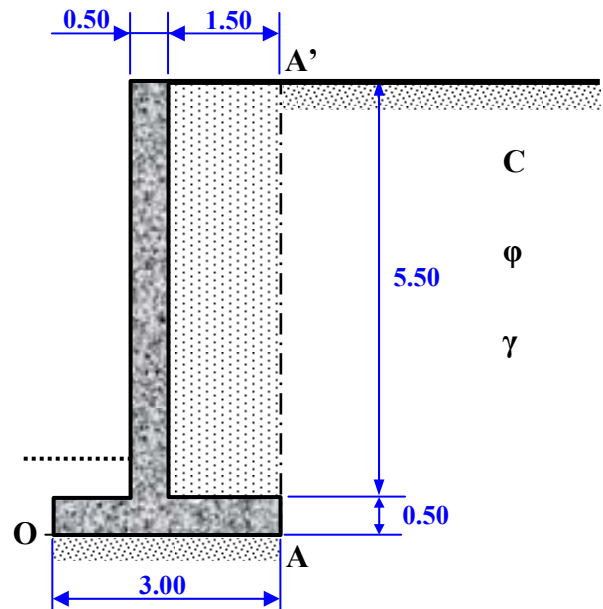
Soutènement en béton armé – étude complémentaire

Nous nous intéressons encore à l'équilibre du soutènement défini à la question précédente, en considérant ici un autre modèle de détermination des efforts de poussée, puis nous examinerons le risque de glissement au niveau de l'assise.

Les caractéristiques du sol maintenu et du sol d'assise sont inchangées :

- cohésion à *long terme* C négligeable ;
- angle de frottement interne $\varphi = 35^\circ$;
- poids volumique $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$.

Comme précédemment, il s'agit d'étudier l'équilibre d'une « tranche d'un mètre » d'ouvrage, perpendiculairement à la section transversale, délimitée par le plan fictif (AA').



Dans cette étude, nous appliquerons la théorie de Caquot-Kerisel pour déterminer les efforts de poussée du sol sur le plan (AA'). Les *tables* de Caquot-Kerisel permettent de traiter les situations pour lesquelles la surface libre du massif peut être inclinée, la partie isolée n'étant pas nécessairement limitée par un plan vertical.

Les notations utilisées ci-contre sont les suivantes :

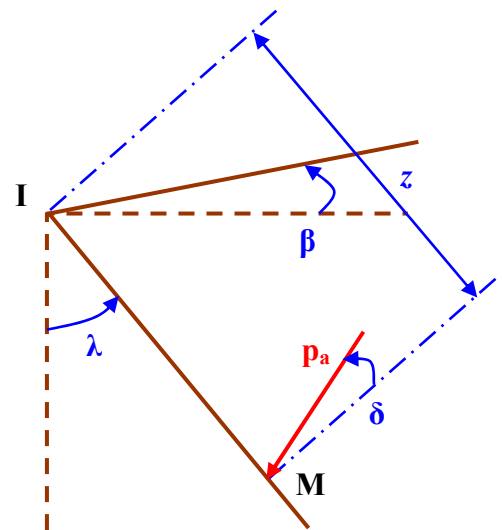
IM : direction du plan fictif sur lequel on souhaite calculer les efforts de poussée, **I** appartenant à la surface libre du talus, **M** étant situé à la distance z du point **I**.

λ : angle du plan **IM** avec la verticale.

β : inclinaison de la surface libre du talus par rapport à l'horizontale.

δ : obliquité de la contrainte de poussée par rapport à la normale au plan **IM**.

K_a : coefficient de poussée fourni par la *table* ci-dessous, dans le cas d'un sol d'angle de frottement interne $\varphi = 35^\circ$.



Les angles sont comptés positivement dans le sens trigonométrique.

β/φ	δ/φ = 0		δ/φ = + 2/3		δ/φ = + 1	
	$\lambda = 0^\circ$	$\lambda = 10^\circ$	$\lambda = 0^\circ$	$\lambda = 10^\circ$	$\lambda = 0^\circ$	$\lambda = 10^\circ$
0	0,271	0,336	0,247	0,314	0,260	0,333
+ 0,4	0,316	0,403	0,291	0,383	0,309	0,409
+ 0,6	0,353	0,456	0,329	0,439	0,349	0,472
+ 0,8	0,419	0,548	0,397	0,538	0,423	0,583
+ 1,0	0,767	-	0,756	-	0,819	-

Extrait des tables de Caquot-Kerisel

Dans ces conditions, sur le plan (IM), à la distance z du point I, la contrainte de poussée sera calculée à partir de l'expression : $p_a = K_a \cdot \gamma z$

Nous prendrons ici $\delta = 2\varphi/3$.

- (A) Pour étudier l'équilibre de la partie délimitée par (AA'), on devra prendre $K_a = 0,247$.
- (B) L'intensité de la résultante de poussée sur le plan (AA') est égale à 80 kN.
- (C) Le moment par rapport au point O, de la résultante de poussée sur le plan (AA') est inférieur à 60 kN.m.

La mobilisation du frottement au contact semelle / sol d'assise permet de reprendre tout ou partie de la composante horizontale de poussée du sol. Nous considérons ici que sur cette interface l'angle de frottement est égal à $2\varphi/3$.

- (D) Dans le cas où le total des actions verticales transmises par la semelle est de 290 kN, la composante tangentielle mobilisable par frottement au contact avec l'assise est égale à 125 kN.
 - (E) Le coefficient de sécurité vis-à-vis du glissement est donc ici inférieur à 2, il pourrait être envisagé de prévoir une *bêche* à l'arrière de la semelle, en vue de mobiliser un effet de butée supplémentaire.
-

QUESTION 4

Statique des fluides – Poussée d'Archimède



Bouées sentinelles du grand large...

Le Centre de météorologie marine développe des bouées météo-océanographiques, dérivantes et ancrées, pour l'étude des interactions entre océan et atmosphère.

Nous considérons ici un modèle de bouée en matière plastique (représentée sur la photo) dont la masse totale est de 115 kg, instrumentation comprise.

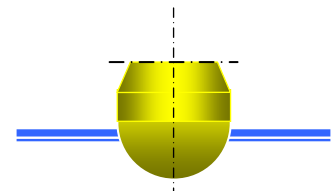
La base de cette bouée, au contact avec l'eau, est circulaire de diamètre 0,80 m. Nous allons considérer plusieurs formes pour la partie immergée.

Cette bouée sera placée en milieu marin, dans une eau de masse volumique égale à 1025 kg/m^3 . Nous observons la bouée en équilibre statique, par mer calme, en l'absence de vent et de courant.

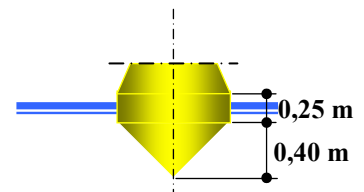
(A) Avec une base cylindrique, la hauteur de la partie immergée est comprise entre 22 et 23 cm.

(B) La même bouée placée dans un lac d'eau douce verrait sa partie immergée augmenter de plus d'un centimètre.

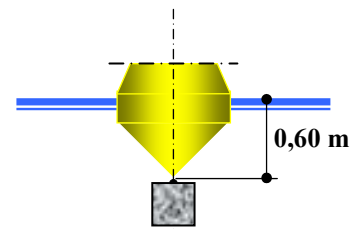
(C) Avec un modèle dont la base est hémisphérique de diamètre 0,80 m, en supposant que la bouée reste en position verticale, la partie immergée en milieu marin n'atteindrait pas la surface cylindrique.



(D) Si la partie inférieure de la bouée se termine par un cône de 40 cm de hauteur, en supposant encore que la bouée reste en position verticale, la partie immergée en milieu marin est supérieure à 50 cm (mesure effectuée depuis la pointe du cône).



(E) Afin que la partie immergée de la bouée définie à l'item précédent, atteigne entre 60 et 65 cm en milieu marin, on suspend un lest en béton de densité 2,3 à l'extrémité du cône.



Cette condition sera remplie avec un lest cubique de 30 cm de côté.

QUESTION 5

Etude d'un générateur de chaleur

On considère une chaudière gaz d'appartement fonctionnant au gaz naturel que l'on supposera, pour l'exercice, être composé uniquement de méthane (CH_4). La combustion est réalisée dans l'air atmosphérique. On va s'intéresser à quelques aspects techniques, en lien avec l'utilisation de ce gaz (supposé parfait).

Les calculs seront effectués avec deux chiffres significatifs après la virgule.



Données d'étude :

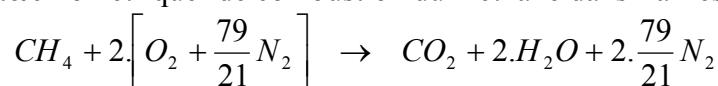
- Composition volumique de l'air (% en volume) :
 O_2 : 21 N_2 : 79
- Masses molaires (g/mol) :
C : 12 H : 1 O : 16 N : 14
- Enthalpies de formation standard H_f° (kJ/mol) à 298 K (elle est prise nulle pour les corps purs simples) :

Méthane	-75.0	Dioxyde de carbone	-393.5
Eau (vapeur)	-241.8	Eau (liquide)	-285.8
O_2	0	N_2	0
- Puissance à fournir par la chaudière : 89 kW.

Définitions :

- Le pouvoir calorifique d'un combustible correspond à la quantité de chaleur dégagée, dans des conditions normalisées (températures extrêmes égales, volume ou pression constants...), par unité de masse de combustible. Son unité « professionnelle » est le MJ/kg.
- Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) est calculé en prenant la valeur absolue de la différence entre les enthalpies de formation standard des produits et des réactifs à 25°C, l'eau étant considérée à l'état liquide.
- Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est calculé de la même manière, l'eau étant considérée à l'état vapeur.

(A) L'équation stœchiométrique¹ de combustion du méthane dans l'air est :



(B) Le pouvoir fumigène sec du méthane est de 8,52 m³ de fumées sèches par mètre cube de méthane.

(C) Le pouvoir calorifique supérieur de méthane est de 55 MJ/kg.

¹ Equation définissant les proportions dans lesquelles doivent se trouver les réactants pour que la réaction soit totale.

- (D) Si cette chaudière a un rendement de 95% sur le pouvoir calorifique inférieur, avec un PCI du méthane égal à 50 MJ/kg, pour satisfaire le besoin en puissance spécifié plus haut le débit à prévoir est de 6,75 kg de méthane par heure.
- (E) La chaudière installée est un modèle à *condensation*. Pour un débit de méthane de 6,75 kg/h, la puissance fournie par cette chaudière est de 100 kW. Le constructeur de la chaudière peut ainsi afficher dans sa documentation technique un rendement sur PCI d'au moins 106%...
-

QUESTION 6

Acoustique – Exposition au bruit d'un ouvrier sur chantier

Un ouvrier travaillant sur chantier est équipé d'un appareil (dosimètre acoustique) permettant de mesurer le niveau sonore auquel il est exposé, et son évolution temporelle durant une journée de travail habituelle. Les résultats sont les suivants :

Période	L_p [dB(A)]
8h – 12h	70
12h – 14h	55
14h – 16h	90



Rappel :

Le niveau sonore (L_p) ou niveau de pression acoustique d'un son continu équivalent, durant une période T (intervalle de temps) qui commence à t_1 et se termine à t_2 , se calcule à partir de l'expression :

$$L_{eq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right]$$

p_0 étant la pression acoustique de référence (20 μ Pa) ;
 $p(t)$ étant la pression acoustique instantanée enregistrée sur le site.

- (A) Les filtres de *pondération A* permettent une correction automatique des niveaux sonores mesurés pour tenir compte de la sensibilité de l'oreille humaine. La correction est effectuée sur chaque bande d'octave, le niveau pondéré en dB(A) est obtenu à partir du niveau « brut » par une réduction du nombre de décibels dans les graves et une augmentation dans les aigus.
- (B) Connaissant le niveau sonore durant les périodes successives T_I (niveau $L_{p,I}$) et T_{II} (niveau $L_{p,II}$), on obtiendra le niveau équivalent (L_p) sur la période $T = T_I + T_{II}$ en effectuant l'opération :

$$L_p = \frac{1}{T} \left[10 \log \left(T_I \cdot 10^{0,1 L_{p,I}} + T_{II} \cdot 10^{0,1 L_{p,II}} \right) \right]$$

- (C) Sur la journée de 8 h, le niveau d'exposition de l'ouvrier est supérieur à 85 dB(A).
- (D) Si l'on maintient un niveau de bruit constant (bruit permanent, sans bruit émergent) de 80 dB(A) l'après-midi (période 14h–16h), le niveau de pression acoustique équivalent obtenu sur la journée restera inférieur à 75 dB(A) ; l'ouvrier n'aura pas besoin de protections auditives.



- (E) Sur ce chantier, un marteau-piqueur est susceptible de fonctionner ponctuellement. Ce matériel engendre un niveau de 120 dB pour la bande d'octave 1000 Hz. Ce niveau correspond à une pression acoustique 20 Pa, sa valeur pondérée est de 120 dB(A).

QUESTION 7

Comportement au feu des matériaux et produits utilisés en construction



Les matériaux et produits utilisés en construction ont un impact majeur sur la santé, la sécurité et l'environnement tout au cours de leur cycle de vie. La compréhension de leur comportement en situation d'incendie est à la base de la conception technique et de l'élaboration de règlements reposant sur le comportement et l'évaluation des constructions.

Dans le cadre de l'harmonisation européenne qui doit permettre la libre circulation des produits, l'étude du comportement au feu a donné lieu au système des « Euroclasses de *Réaction au feu* »², qui définit les procédures d'essais (permettant de connaître, en particulier, le temps d'inflammation et le pouvoir calorifique des produits testés) ainsi que les seuils de classement.

- (A) La *Réaction au feu* caractérise la contribution que peut apporter un matériau ou un produit de construction, dans le développement d'un incendie.
- (B) Les Euroclasses de *Réaction au feu* correspondent à sept niveaux de performances. Dans cette codification :
 - les matériaux et produits les plus sensibles à l'action des flammes sont classés A1 ou A2 ;
 - les matériaux et produits non inflammables sont classés E ou F.
- (C) Dans le système européen, parmi les performances évaluées pour l'attribution d'une classe de *Réaction au feu*, le dégagement de fumées lors de la combustion n'est pas pris en compte.
- (D) Les revêtements de sols constituent une catégorie particulière de produits dont le classement vis-à-vis de la *Réaction au feu* est spécifique.
- (E) Concernant la *Réaction au feu* des « produits d'aménagement », l'harmonisation européenne n'étant pas réalisée à ce jour, en France on utilise toujours la codification M0 à M1 vis-à-vis de laquelle les produits incombustibles sont classés M4.



² Système de classement transposé en norme française par arrêté du Ministère de l'Intérieur daté du 21/11/2002.

QUESTION 8

Propriétés mécaniques de l'acier et leur évolution

Les valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques de l'acier de structures sont établies, en particulier, à partir d'essais de traction uniaxiale réalisés à la température de 20°C.

L'acier de nuance S355, couramment utilisé pour la construction de ponts métalliques, se caractérise à 20°C par les valeurs suivantes :

- limite élastique $f_y = 355$ MPa
- module d'élasticité $E = 210$ GPa

Quand l'acier subit une élévation de température, ses propriétés mécaniques évoluent, l'étendue du comportement élastique diminue et ce comportement ne reste pas linéaire au-delà de 100°C. Afin de traduire cette évolution, nous utiliserons les notations reliant ces propriétés à la température θ atteinte dans le métal :

- $f_{y,\theta}$: limite élastique à la température θ , avec $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$
- E_θ : module d'élasticité à la température θ , avec $k_{E,\theta} = E_\theta / E$
- $f_{p,\theta}$: limite du comportement linéaire à la température θ , avec $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$

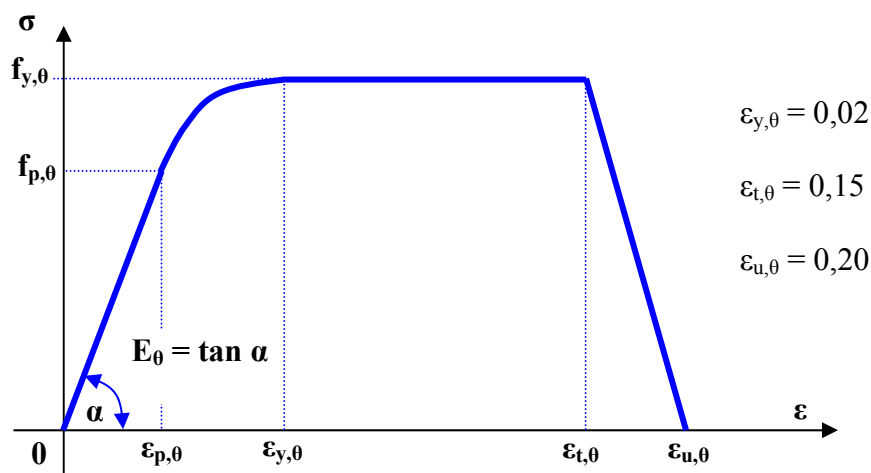


Le tableau ci-dessous nous fournit les « coefficients d'affaiblissement » pour les températures variant de 20°C à 1200°C (pour des vitesses d'échauffement de 2 à 50 K/min).

θ [°C]	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$k_{y,\theta}$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,780	0,470	0,230	0,110	0,060	0,040	0,020	0,000
$k_{p,\theta}$	1,000	1,000	0,807	0,613	0,420	0,360	0,180	0,075	0,050	0,038	0,025	0,013	0,000
$k_{E,\theta}$	1,000	1,000	0,900	0,800	0,700	0,600	0,310	0,130	0,090	0,068	0,045	0,023	0,000

Nota : pour les températures intermédiaires, procéder par interpolation linéaire.

Au-delà du seuil d'élasticité linéaire, la modélisation du comportement de l'acier soumis à une température élevée est définie par le diagramme σ - ϵ (contrainte normale – déformation axiale) représenté ci-dessous :



Pour $\epsilon_{p,\theta} < \epsilon < \epsilon_{y,\theta}$ la loi de comportement a pour expression :

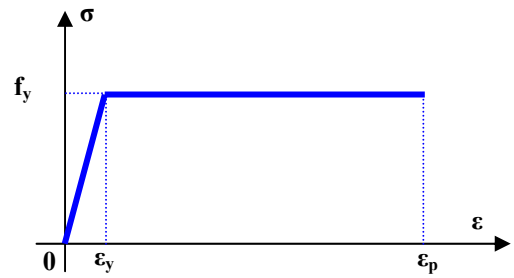
$$\sigma = f_{p,\theta} - c + (b/a) [a^2 - (\epsilon_{y,\theta} - \epsilon)^2]^{0,5}$$

avec $c = (f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2 / [E_\theta (\epsilon_{y,\theta} - \epsilon_{p,\theta}) - 2 (f_{y,\theta} - f_{p,\theta})]$

$$a^2 = (\epsilon_{y,\theta} - \epsilon_{p,\theta}) (\epsilon_{y,\theta} - \epsilon_{p,\theta} + c/E_\theta) \quad b^2 = c (\epsilon_{y,\theta} - \epsilon_{p,\theta}) E_\theta + c^2$$

(A) A 20°C la déformation de cet acier, sous sollicitation de traction uniaxiale atteignant la limite élastique, aura une valeur au moins égale à $1,6 \cdot 10^{-3}$.

(B) Jusqu'à 100°C le comportement sous sollicitation uniaxiale d'un acier de structure peut être modélisée, avant l'écroutissage, par le diagramme σ - ϵ bilinéaire (élastique - parfaitement plastique) représenté ci-contre.



(C) L'acier S355 porté à 250°C aura les propriétés mécaniques suivantes :

$$f_{y,250} = 355 \text{ MPa} \quad E_{250} = 178,5 \text{ GPa}$$

De plus, la loi de Hooke est encore applicable si, à cette température, on applique une contrainte de traction égale à 260 MPa.

(D) On applique un effort de traction égal à 60 kN sur une éprouvette en acier S355, dont la section est de 200 mm² et dont la température est de 20°C. Cette éprouvette est ensuite chauffée à la vitesse de 40 K/min (l'effort étant maintenu constant). Au bout de 4 min, la variation de longueur de cette éprouvette n'est plus proportionnelle à l'effort appliqué.

(E) Cette même éprouvette, initialement à la température de 20°C, est chauffée à la vitesse de 40 K/min. L'effort de traction est appliqué seulement au bout de 8 min ; à partir de ce moment là, la température et l'effort sont maintenus constants.

En exploitant les lois de comportement fournies, le calcul de la déformation montre que l'effort appliqué génère instantanément, entre deux repères distants de 400 mm, une variation de cette distance supérieure à 2 mm.

QUESTION 9

Résistance au feu des structures en acier

Afin de pouvoir prédire la durée de résistance d'une structure en situation d'incendie il faut non seulement connaître l'évolution des propriétés mécaniques du matériau (ce qui faisait l'objet de la question précédente), mais aussi définir la manière dont la structure s'échauffe ainsi que les conséquences de cet échauffement.



Nous allons nous intéresser au comportement des structures en acier dont la température θ_a va progresser de 20°C à 600°C.

Dans cet intervalle, les relations suivantes permettent de chiffrer la conductivité thermique du matériau (λ_a) ainsi que sa chaleur spécifique (c_a) :

$$\lambda_a = 54 - 333 \cdot 10^{-4} \theta_a \dots\dots\dots [\text{W/m.K}]$$

$$c_a = 425 + 773 \cdot 10^{-3} \theta_a - 169 \cdot 10^{-5} \theta_a^2 + 222 \cdot 10^{-8} \theta_a^3 \dots\dots\dots [\text{J/kg.K}]$$

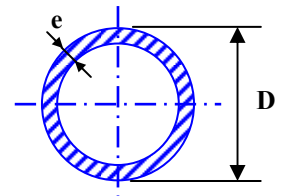
θ_a étant la température de l'acier en °C.

De plus, sur un élément de structure exposé au feu, « l'action thermique » qui nous intéresse ici est le flux de chaleur h (en W/m²) que reçoit la surface exposée S_{exp} (en m²). Ainsi, durant un intervalle de temps Δt , l'énergie « qu'emmagasine » l'élément de structure sera égale à :

$$h \cdot S_{exp} \cdot \Delta t$$

Pour cet élément de volume V et de surface S_{exp} recevant le flux de chaleur h , on appellera « massiveté » le rapport $m = S_{exp} / V$.

L'élément exposé au feu est un poteau *tubulaire* en acier, de diamètre extérieur $D = 219,1$ mm et d'épaisseur $e = 6,3$ mm (section ci-contre).



Rappelons que la masse volumique de l'acier est $\rho_a = 7850$ kg/m³ (indépendante de la température), et que la chaleur spécifique d'un matériau est l'énergie que l'on doit fournir à une masse de 1 kg pour élever sa température de 1°C.

Compte tenu de la forte conductivité thermique de l'acier, à un instant donné, on admet que la température du poteau est uniforme sur sa hauteur et dans sa section.

- (A) Si l'on considère que la résistance thermique de la « paroi » du tube, vis-à-vis des échanges par conduction dans l'acier, est inversement proportionnelle à la conductivité thermique du métal, le passage de 20° à 300°C entraîne un gain de résistance thermique supérieur à 20%.
- (B) La valeur moyenne de la chaleur spécifique de l'acier est la même sur l'intervalle de température [100° ; 600°] que sur l'intervalle [300° ; 400°].
- (C) De l'instant t_1 à l'instant t_2 le poteau passe de 100° à 600°C. Si l'on considère sur cet intervalle une valeur constante pour la chaleur spécifique $c_a = 600$ J/kg.K, on trouve que durant $(t_2 - t_1)$ la source de chaleur a transmis au poteau 30 MJ (valeur arrondie à l'unité).

- (D) Durant l'intervalle de temps Δt , la variation de température dans l'élément de structure sera déterminée à partir de la relation :

$$\Delta\theta_a = h.m.\Delta t / (\rho_a c_a) \quad h \text{ et } m \text{ étant définis dans l'énoncé}$$

- (E) Le poteau étudié étant situé dans le local en feu, toute sa surface latérale est en contact avec les gaz environnants portés à température élevée. La *massivité* de ce poteau est égale à $163,4 \text{ m}^{-1}$.

QUESTION 10

Résistance au feu des structures en acier – suite et fin...

Dans les questions précédentes nous avons vu comment évoluaient les propriétés de l'acier à température élevée, et quelles relations régissaient globalement les échanges thermiques au niveau d'un élément de structure. Il nous reste à préciser le phénomène dans le temps, en situation d'incendie.

Pour cela, nous allons considérer un local comportant divers équipements inflammables (autres que des hydrocarbures) et dont le renouvellement naturel de l'air apporte l'oxygène nécessaire au développement de la combustion. Dans ces conditions, l'évolution de la température des gaz (θ_g) qui se dégagent du foyer se traduit par la relation température-temps conventionnelle :

$$\theta_g = \theta_o + 345 \log (8t + 1)$$

θ_g température (°C) au bout d'un temps t exprimé en minutes,
 θ_o température ambiante initiale, 20°C ici.

Dans le local où l'incendie se développe, les surfaces exposées des éléments structuraux reçoivent une quantité d'énergie ou *flux thermique* qui évolue dans le temps avec la température du milieu :

$$h = h_c + h_r$$

h_c flux thermique échangé par convection : $h_c = \alpha_c (\theta_g - \theta_s)$

h_r flux thermique échangé par rayonnement : $h_r = \Phi \cdot \varepsilon_r \cdot 56,7 \cdot 10^{-9} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_s + 273)^4]$

θ_s température (°C) à l'instant t en surface de l'élément de structure exposé,

α_c coefficient de convection, dans notre local on prendra $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$,

Φ facteur de forme, nous prendrons ici $\Phi = 1$,

ε_r émissivité résultante, égale à 0,5 dans notre cas.

Comme dans la question précédente, l'élément exposé au feu est un poteau *tubulaire* en acier, de diamètre extérieur $D = 219,1 \text{ mm}$ et d'épaisseur $e = 6,3 \text{ mm}$. Sa longueur est de 3 m.



Etant donné la forte conductivité thermique de l'acier, à un instant donné, on admet que la température du poteau (θ_a) est identique à la température de la surface exposée (θ_s).

- (A) D'après la relation température-temps conventionnelle, si l'on considère les instants successifs t_1, t_2, t_3 , tels que $t_1 < t_2 < t_3$ et $(t_2 - t_1) = (t_3 - t_2)$, la variation de θ_g est plus importante entre t_2 et t_3 qu'entre t_1 et t_2 .
- (B) Dans les premières minutes, de l'incendie, le flux radiatif est supérieur au flux convectif.
- (C) Si au bout de quatre minutes la température dans l'acier atteint 145°C , à cet instant la surface du poteau reçoit plus de 20 kW , du seul fait des échanges par convection dans le local incendié.

Nous allons maintenant procéder à un calcul itératif, en considérant que pour le poteau étudié, un « pas de temps » Δt nous donne une variation de température dans l'acier tirée de la relation suivante :

$$\Delta\theta_a = 34,7 \cdot 10^{-6} (h_r + h_c) \Delta t \quad [\text{unités S.I.}] \quad (1)$$

Donnée de départ : on prendra ici $\theta_{s1} = 202,5^\circ\text{C}$ à l'instant $t_1 = 300 \text{ s}$

- 1^{ère} étape à $t_2 = t_1 + \Delta t$ - calcul de θ_{g2} ;
 - calcul de $h_{\text{approché}}$ à partir de $\{\theta_{g2} \text{ et } \theta_{s1}\}$;
 - calcul de $\Delta\theta_a$ dont on déduit $\theta_{s2} = \theta_{s1} + \Delta\theta_a$.
- 2^{ème} étape à $t_3 = t_2 + \Delta t$ - calcul de θ_{g3} ;
 - calcul de $h_{\text{approché}}$ à partir de $\{\theta_{g3} \text{ et } \theta_{s2}\}$;
 - calcul de $\Delta\theta_a$ dont on déduit $\theta_{s3} = \theta_{s2} + \Delta\theta_a$.

....

- (D) En prenant un « pas de temps » $\Delta t = 20 \text{ s}$ le calcul itératif défini ci-dessus nous donne pour la 6^{ème} minute (à $t_4 = 360 \text{ s}$) une température dans le poteau de 252°C (valeur finale arrondie à l'unité).
- (E) A partir de la même équation (1) si l'on adoptait un « pas de temps » $\Delta t = 10 \text{ s}$ le nouveau calcul itératif nous conduirait pour la 6^{ème} minute à une température dans le poteau légèrement supérieure.

- FIN -