



Secrétariat Général

Direction générale des  
ressources humaines

Sous-direction du recrutement

MINISTÈRE  
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE

---

## **Concours du second degré – Rapport de jury**

### **Session 2009**

AGREGATION

Externe

Section génie civil

**Rapport de jury présenté par M. Christophe PETIT  
Président de jury**

**Les rapports des jurys des concours sont établis sous la responsabilité des présidents de jury**

---

# **AGREGATION GENIE CIVIL EXTERNE**

## **Session 2009**

### **COMPOSITION DU JURY**

**Christophe PETIT** Professeur des universités, IUT du Limousin, Université de Limoges – Président  
**Fernand KREMER** Inspecteur général de l'Education nationale – Vice Président

**Christian La BORDERIE** Professeur des universités à ISA-BTP d'Anglet  
**Jean-Marc CHARTIER** Professeur agrégé au lycée Hyppolite Fontaine de Dijon  
**François CHAUMEIX** Professeur agrégé au lycée à St Jean de Braye  
**Didier DEFER** Professeur des universités à Lille  
**Chantal DE LA ROCHE** Ingénieur au LCPC Nantes  
**Luc DELATTRE** Ingénieur MEEDAT – Paris La défense  
**André GARNAUD** Professeur agrégé au lycée les Marcs d'Or de Dijon  
**Yann GILBERT** Professeur agrégé à l'université de Nantes  
**Philippe GOTTELAND** Maître de conférences à l'université de Grenoble  
**Bernard HAURAT** Professeur agrégé à l'IUT de St Nazaire  
**Didier HENNETIER** Professeur agrégé à l'IUT de St Nazaire  
**André JOIE** Professeur agrégé à l'ISA-BTP d'Anglet  
**Nolwenn LE PIERRES** Maître de conférences à Polytech'Savoie au Bourget du Lac  
**Robert LE ROY** Professeur agrégé à l'ENPC de Marne la Vallée  
**Véronique MAUVISSEAU** Ingénieur à la SETEC – Paris  
**Michel MANDOUZE** Professeur agrégé à l'IUT de Bordeaux 1  
**Laurent MORA** Maître de conférences à l'IUT de Bordeaux 1  
**Judicaël PICAUT** Ingénieur de recherches au LRPC de Bouguenais  
**Yvon RIOU** Maître de conférences à l'Ecole Centrale de Nantes

# SOMMAIRE

Présentation générale

## ADMISSIBILITE

EPREUVE 1 : Modélisation des matériaux et des ouvrages,

- Eléments de correction et rapport sur le sujet Matériaux et patrimoine
- Eléments de correction et rapport sur le sujet Modélisation des ouvrages

EPREUVE 2 : Mécanique des sols et qualité des ambiances

- Eléments de correction et rapport sur le sujet Mécanique des sols
- Eléments de correction et rapport sur le sujet Qualité des ambiances

EPREUVE 3 : Projet A

- Eléments de correction et rapport du jury

EPREUVE 3 : Projet B

- Eléments de correction et rapport du jury

## ADMISSION

EPREUVE DE DOSSIER

- Rapport du jury

EPREUVE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

- Rapport du jury

EPREUVE DE LABORATOIRE

- Rapport du jury

## Présentation générale

12 postes étaient offerts au concours en 2009. 55 candidats ont composé au moins une épreuve. Sur l'ensemble des candidats la moyenne obtenue était de 5,69/20. 30 candidats ont été déclarés admissibles, la moyenne des épreuves écrites des candidats admissibles est de 8,43/20 (8,18 en 2008), le dernier admissible a obtenu 4,67/20.

La moyenne des épreuves d'admission obtenues par les 28 candidats présents est de 8,99/20, celle des 12 candidats admis est de 11,81/20.

La moyenne obtenue aux épreuves écrites et orales du concours de l'agrégation par les 28 candidats présents est de 8,70/20, celle des 12 admis de 11,14.

D'une manière générale, en 2009 les candidats n'ont pas traités une partie des épreuves écrites. Pour la session 2010, les membres du jury proposeront des épreuves écrites moins longues afin de permettre aux candidats d'aborder l'ensemble des questions. Les sujets sont de difficulté progressive et les candidats doivent aborder l'ensemble des parties d'épreuves (Matériaux et patrimoine, Modélisation des ouvrages, Géotechnique et environnement, Qualités des ambiances et Projet).

Les épreuves d'admission auront lieu à l'IUT département Génie Civil de Bordeaux en 2010.

Le Président de jury,

Christophe PETIT,

## **Epreuve de modélisation des matériaux et des ouvrages**

### **Sujet : matériaux et patrimoine**

#### *Eléments de correction*

#### **Introduction**

Le sujet proposé comprend deux parties indépendantes :

Dans une première partie (partie A), on se propose de réaliser un entretien structurel d'un itinéraire de route départementale. Dans le cadre de l'agenda 21 du Conseil Général, cet entretien a été choisi en grave émulsion.

La seconde partie (Partie B) porte sur l'étude des propriétés du bois à partir d'observations à différentes échelles et de la prise en compte de son anisotropie. Les moyens de limiter les effets du retrait y sont également abordés.

Les deux parties peuvent être traitées de manière indépendante. Pour chaque question, en complément des résultats de calculs proprement dits, il conviendra de justifier les choix effectués et calculs réalisés et de commenter si besoin les résultats obtenus.

### **Partie A – Formulation d'une grave émulsion pour l'entretien structurel d'une route départementale**

#### **A.1. Structure existante et choix de la technique de rechargement**

La route départementale à entretenir est une chaussée souple dont le corps de chaussée est constitué de multicouches d'enduits et de deux couches de GNT.

A.1.1) Expliquer à quoi correspond le matériau GNT.

*Le matériau GNT est une Grave Non Traitée, il s'agit d'un matériau granulaire présentant une faible cohésion (pas de liant), dont la taille maximale est 31,5 mm. Son comportement est de type élastique non linéaire. Les efforts sont transmis par le contact inter granulaire. Sa teneur en eau est optimisée à l'aide de l'essai Proctor pour assurer un compactage optimum.*

A.1.2) Décrire les principaux modes de dégradation de ce type de chaussées souples

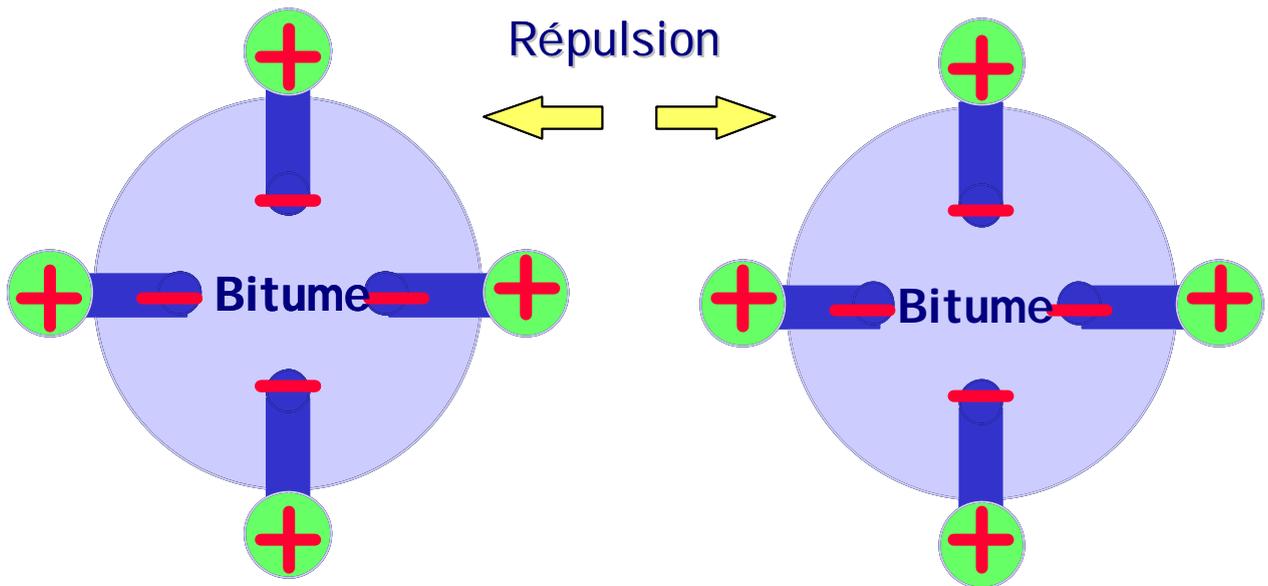
*Ils sont au nombre de deux :*

- *dégradation structurelle par déformation permanente de la couche de GNT liée à l'accumulation des efforts verticaux produisant de l'orniérage dit « à grand rayon »*
- *dégradation de la couche de surface (fissuration) liée à la déformation des couches structurelles et dégradation des couches d'enduit par plumage, arrachement, ressuage.*

Dans le cadre de son agenda 21, le conseil Général a choisi d'effectuer le rechargement structurel de la chaussée en grave-émulsion.

A.1.3) Expliquer ce qu'est une émulsion de bitume (faire un schéma). Quels types d'additifs permettent la mise en émulsion du bitume ?

*Une émulsion est un système hétérogène à deux ou plusieurs phases liquides, constitué par une phase liquide continue et au moins une deuxième phase liquide, dispersée dans la première sous forme de fines gouttelettes. Pour l'émulsion de bitume, il s'agit d'une dispersion stable de gouttelettes de bitumes dans de l'eau. Pour obtenir une émulsion, on utilise un surfactant ou émulsifiant ou tensioactif qui assure la répulsion des gouttelettes de bitume entre elles. Ce surfactant est constitué de molécules amphiphiles présentant une partie hydrophile et une partie hydrophobe*



A.1.4) Décrire les différences essentielles existant entre une grave émulsion et un enrobé à chaud. En quoi le matériau grave émulsion plus que l'enrobé à chaud peut-il être considéré comme intéressant dans un contexte de développement durable ?

*Les différences essentielles sont les suivantes :*

- *La présence d'eau dans les graves émulsions contrairement aux enrobés à chaud qui sont anhydres.*
- *Le domaine d'emploi qui reste celui des chaussées à faible trafic pour les graves émulsions, ce matériau présentant des caractéristiques mécaniques (rigidité) inférieures à celles des enrobés à chaud*
- *les graves émulsions sont des matériaux évolutifs dans le temps, ils « murissent » sous le trafic et le climat pour atteindre leurs performances finales après des durées variables de quelques mois à quelques années tandis que les enrobés à chaud atteignent leurs performances finales dès qu'ils sont refroidis.*
- *Pour la grave émulsion, les granulats sont utilisés à température ambiante, contrairement aux enrobés à chaud pour lequel les granulats sont chauffés aux alentours de 160°C. En ce sens, ce matériau est intéressant dans un contexte de développement durable car il permet des économies d'énergie et donc une diminution des émissions de gaz à effet de serre*

## A.2. Formulation de la grave émulsion

La composition du mélange est donnée dans le tableau A.1 ci – dessous. La teneur en bitume résiduel est exprimée en masse par rapport à la masse totale du mélange sans eau.

| Fraction granulaire | %   | MVR(g/cm3) | Teneur en eau (%) |
|---------------------|-----|------------|-------------------|
| 0/2                 | 36  | 2,728      | 2,3               |
| 2/4                 | 15  | 2,723      | 1                 |
| 4/10                | 22  | 2,724      | 0,5               |
| 10/14               | 27  | 2,721      | 0,2               |
|                     |     |            |                   |
| Eau totale          | 7   |            |                   |
| Bitume résiduel     | 4,2 | 1,03       |                   |

Tableau A.1 : composition de la grave émulsion

A.2.1) L'émulsion utilisée est une émulsion cationique dosée à 60% de bitume. Calculer la teneur en émulsion à introduire dans le mélange pour obtenir la teneur en bitume résiduel visée.

*La teneur en bitume résiduel est de 4,2%. Le bitume ne représente que 60% de l'émulsion. La teneur en émulsion à introduire est donc  $4,2/0,6 = 7\%$*

A.2.2) Le bitume de base de l'émulsion est un bitume 70/100. Expliciter cette dénomination. Cette dénomination correspond au grade du bitume qui est un classement technologique selon la norme T 65-001. Il associe une valeur de pénétrabilité à l'aiguille (enfoncement mesuré en 1/10ème de mm d'une aiguille lestée dans du bitume à 25°C) et une valeur de susceptibilité thermique mesurée par l'essai de ramollissement bille et anneau (température à laquelle une bille d'acier traverse un anneau rempli de bitume).

*En pratique, un bitume pur de classe 70/100 présente une pénétrabilité située entre 70 et 100 1/10ème de mm (et une température bille et anneau entre 43 et 51°C).*

A.2.3) Au moment de la fabrication du mélange, une mesure de teneur en eau est réalisée sur chacune des fractions granulaires en stock à la centrale. Le résultat des essais est indiqué dans le tableau A.1. Les fractions granulaires sont stockées à l'extérieur dans des conditions identiques. Pourquoi la fraction 0/2 possède-t-elle la teneur en eau la plus élevée ?

*Parce qu'elle contient des éléments très fins (0 à 63µm) qui possèdent la surface spécifique le plus grande et qui sont donc le plus à même de retenir une quantité d'eau (liée aux intempéries) plus importante.*

A.2.4) Sachant que la teneur en eau totale visée du mélange est de 7%, calculer le pourcentage d'eau d'apport nécessaire pour fabriquer la formule.

*La teneur en eau totale correspond à la somme de l'eau apportée par les granulats W1, l'eau apportée par l'émulsion W2 et l'eau d'apport W3*

$$W3 = 7 - (W1 + W2).$$

$$W1 = (0,36*2,3) + (0,15*1) + (0,22*0,5) + (0,27*0,2) = 1,142\%$$

$$W2 = 7*0,4 = 2,8\%$$

$$W3 = 7 - (2,8 + 1,142) = 3,06\%$$

A.2.5) Calculer la masse volumique réelle du mélange granulaire.

*Elle s'obtient en prenant en compte la fraction pondérale de chaque fraction granulaire*

$$MVRG = (0,36*2,728) + (0,15*2,723) + (0,22*2,724) + (0,27*2,721)$$

$$MVRG = 2,724 \text{ g/cm}^3$$

*(rq : la valeur finale doit être arrondie au millième)*

A.2.6) Calculer la masse volumique réelle de la grave émulsion (cette valeur est calculée sur la base d'une teneur en eau nulle)

*La teneur en liant résiduelle est de 4,2%. Elle est exprimée en masse par rapport à la masse totale du mélange sans eau.*

$$MV \text{ Re} = \frac{\text{poids mélange}}{\text{volume mélange}}$$

$$\text{Soit } MV \text{ Re} = \frac{100}{\frac{4,2}{1,03} + \frac{95,8}{2,724}} = 2,548 \text{ g/cm}^3$$

A.2.7) Un contrôle de chantier est effectué juste après la mise en œuvre du matériau.

La teneur en eau du mélange en place est de 7,45%.

Une mesure de densité en place au gammadensimètre conduit à une valeur de masse volumique apparente de 2,308 g/cm<sup>3</sup>.

Calculer la teneur en vides du matériau en place. Vous paraît-elle représentative de ce type de matériau ?

*La Masse volumique apparente MVA mesurée est une MVA humide, il faut calculer la MVA sèche, notée MVAs*

$$MVAs = MVA / (1 + 0,0745)$$

$$\text{Soit } MVAs = 2,148 \text{ g/cm}^3 \text{ d'où}$$

$$V\% = 100 - (100 (MVAs/MVRe))$$

$$V\% = 100 - (100 (2,148/2,548)) = 15,7\%$$

*Cette teneur en vides est représentative de ce type de matériau. En effet, les graves émulsions présentent à la mise en œuvre une teneur en vides assez élevée de l'ordre de 15% liée à la présence d'eau dans le mélange.*

A.2.8) Un suivi de chantier est réalisé au cours des mois qui suivent la mise en œuvre. Les mesures de teneur en eau et de densité apparente obtenues sont consignées dans le tableau A.2.

Calculer pour chaque étape du suivi la teneur en vide du matériau.

| Date du suivi | MVA(g/cm <sup>3</sup> ) | Teneur en eau (%) |
|---------------|-------------------------|-------------------|
| T = 3 mois    | 2,245                   | 3,5               |
| T = 6 mois    | 2,251                   | 1,4               |
| T = 1 an      | 2,255                   | 0,5               |

Tableau A.2 : suivi dans le temps des masses volumiques apparentes et teneurs en eau  
Calcul identique à celui de la question A.2.8.

| Date du suivi | MVA(g/cm <sup>3</sup> ) | Teneur en eau (%) | MVA sèche (g/cm <sup>3</sup> ) | Teneur en vides (%) |
|---------------|-------------------------|-------------------|--------------------------------|---------------------|
| T = 3 mois    | 2,245                   | 3,5               | 2,169                          | 14,9                |
| T = 6 mois    | 2,251                   | 1,4               | 2,220                          | 12,9                |
| T = 1 an      | 2,255                   | 0,5               | 2,244                          | 11,9                |

A.2.9) Comment évolue la teneur en vide avec le temps. Ce résultat vous paraît-il cohérent ? Commentez.

*La teneur en vide diminue avec le temps. Ce résultat est classique pour une grave-émulsion, en effet le matériau « mûrit » sous l'effet du climat et du trafic. La teneur en eau diminue et le matériau se contracte sous l'effet combiné de l'évacuation de l'eau et du trafic.*

### A.3. Caractérisation mécanique de la grave-émulsion

A.3.1) Dans le but de vérifier le module du matériau mis en place, le maître d'ouvrage demande la réalisation d'un prélèvement d'un bloc de matériau sur la chaussée et la réalisation d'un essai de module complexe selon la norme EN 12697-26 annexe A en flexion deux points sur éprouvettes trapézoïdales. Pensez-vous qu'il soit possible d'effectuer ce prélèvement juste après la mise en œuvre ? Justifiez votre réponse.

*Non, il n'est pas possible d'effectuer ce prélèvement juste après la mise en œuvre car le matériau ne présente pas de cohésion, on ne peut donc pas en prélever un échantillon sous forme de bloc (ou de carotte).*

A.3.2) Les éprouvettes trapézoïdales extraites du bloc de grave émulsion ont les caractéristiques géométriques indiquées figure A.1. Elles sont soumises à une force F appliquée en tête de l'éprouvette. On notera D le déplacement en tête de l'éprouvette. Exprimer les valeurs de contrainte et déformation maximales  $\sigma_{max}$  et  $\epsilon_{max}$  subies par l'éprouvette à partir des caractéristiques géométriques des éprouvettes. On négligera le poids propre de l'éprouvette.

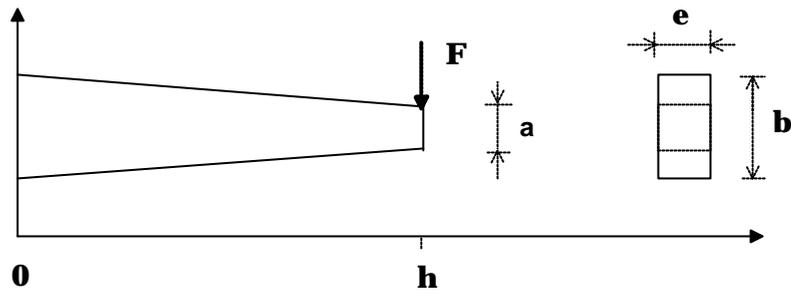


Figure A.1 : Caractéristiques géométriques des éprouvettes trapézoïdales

On note  $l(x)$  la largeur de l'éprouvette en fonction de l'abscisse  $x$   
 $l(0) = b$  et  $l(h) = a$  soit

$$l(x) = b - \frac{b-a}{h}x$$

Soit  $M(x)$  le moment en fonction de  $x$   
 $M(x) = F(h-x)$

Soit  $I(x)$ , l'inertie en fonction de  $x$

$$I(x) = \frac{el^3(x)}{12}$$

Calcul de la déformation maximale :

$$e(x) = \frac{M(x)}{EI(x)} \frac{l(x)}{2}$$

$$\text{Soit } e(x) = \frac{6 F h^2 (h-x)}{Ee(b-a)^2 \left( \frac{bh}{b-a} - x \right)^2}$$

$$\text{Déformation maximale pour } \frac{de(x)}{dx} = 0 \text{ soit } x = h \left( 2 - \frac{b}{b-a} \right)$$

$$\text{Soit } e_{\max} = \frac{3Fh}{2Eea(b-a)}$$

Calcul de la contrainte maximale :

$$s(x) = e(x)E$$

$$s_{\max} = \frac{3Fh}{2ea(b-a)}$$

A.3.4) La valeur de module complexe à 15°C, 10Hz est de 2000 MPa. Que peut-on dire de cette valeur par rapport à celles usuellement rencontrées pour les enrobés à chaud ?

*Cette valeur est faible, les enrobés à chaud ont plutôt des modules supérieurs à 5000 MPa pour les couches de surface et supérieurs à 9000 MPa pour les couches d'assise.*

A.3.5) En regard des propriétés observées de la grave émulsion, précisez-en les limites d'utilisation.

*Le matériau grave émulsion ne présente pas de cohésion au jeune âge et ses propriétés mécaniques sont fiables, on le réservera donc aux chaussées à faible trafic.*

\*\*\*

## Partie B – Etude des propriétés du bois

### B.1) Propriétés mécaniques du bois

Dans cette partie, le bois, de type résineux, est considéré sec, c'est-à-dire à une teneur en eau inférieure à 15%.

B.1.1) Décrire la microstructure du bois résineux à partir de la micrographie jointe (Figure 1). Expliquer pourquoi le bois a un comportement anisotrope.

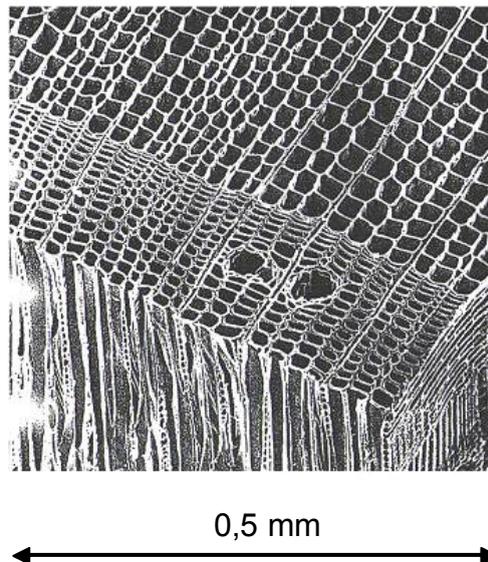
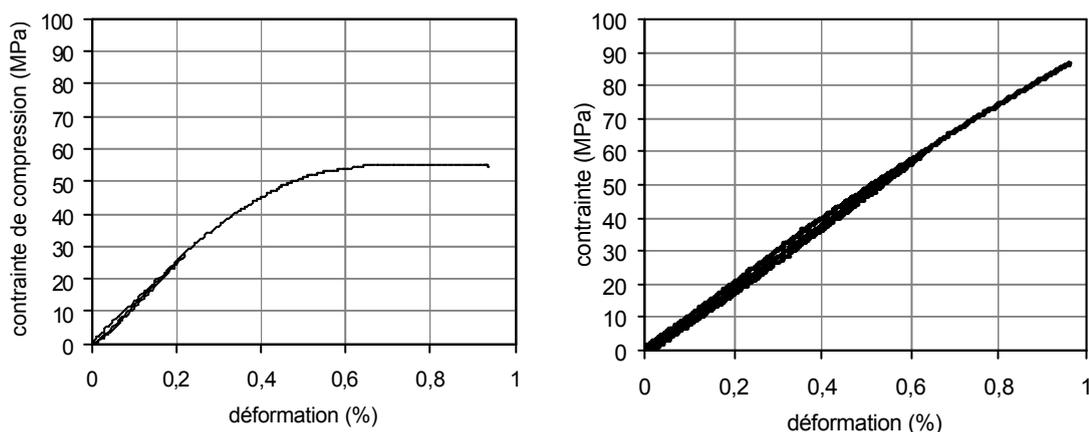


Figure 1. Coupe transversale des cellules d'un résineux

La figure présente en coupe transversale les cellules du bois. La zone plus dense est le bois d'été tandis que la zone la moins dense correspond à la croissance de printemps. On observe donc une anisotropie dans le plan transversal du tronc, observable à l'échelle macroscopique par la différenciation des cernes. Les modules sont plus faibles dans le sens transversal (écrasement ou déformation transversales des cellules) que dans le sens longitudinal. Les mécanismes de rupture sont également fonction des directions de sollicitation. Une sollicitation dans le sens transversal des cellules va conduire à leur écrasement (compression) ou la décohésion des cellules entre elles (traction). Dans le sens longitudinal, la compression va générer le flambement local des parois des cellules, ce qui ne se produira pas en traction.

B.1.2) Donner sur une figure l'allure des courbes de comportement en contrainte – déformation du bois en compression longitudinale et en traction longitudinale. Commenter ces courbes en termes de module, de ductilité et de résistance maximale. Expliciter les mécanismes en jeu à la rupture à partir de l'observation à l'échelle microscopique.

Les figures ci-dessous montrent les comportements en traction et en compression. Le comportement en compression est de type élastoplastique, manifestant un caractère ductile, tandis qu'en traction, il est de type élastique fragile. La contrainte maximale en compression est plus faible qu'en traction. Les modules sont assez peu différents, si bien qu'il est d'usage de les considérer identiques suivant les 2 sollicitations. Pour un résineux, le module moyen avoisine 12 GPa ( $\pm 3$ GPa). En compression, le flambement progressif des cellules génère macroscopiquement le palier de plasticité. En traction, ce sont les fibres elles-mêmes qui se rompent sans passage dans un domaine plastique.



Exemples de comportement obtenus expérimentalement. A gauche, comportement en compression, à droite comportement en traction directe.

B.1.3) La résistance moyenne en traction du bois sans défaut est supérieure à celle en compression. Donner les raisons qui expliquent que les résistances de calcul données dans les règlements sont dans l'ordre inverse.

*Ceci est dû à la dispersion des résultats. En ajustant la distribution des résistances par une loi normale, le coefficient de variation est plus grand pour la traction que pour la compression. Ceci vient du fait que le bois, du fait de son comportement fragile en traction, est plus sensible aux défauts du matériau (nœuds, variation de densité locale, etc.). Les lois réglementaires tiennent compte de ces différences de dispersion.*

## B.2) le bois et l'eau

Les variations dimensionnelles du bois massif sont proportionnelles à sa teneur en eau  $w$ , pour  $0 < w < 30\%$ . Au-delà d'une teneur en eau de 30%, les déformations n'évoluent plus. Le tableau 1 donne des coefficients de retrait d'un bois résineux.

2.1) La figure 2 montre une coupe d'un tronc qui s'est fissuré. Montrer que ces fissures sont liées au retrait du bois.



Figure 2. Coupe d'un tronc après mise en équilibre avec le milieu ambiant

| Direction                                                                   | Longitudinale $a_l$ | Radiale $a_r$ | Orthoradiale $a_t$ |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------|--------------------|
| Coefficient de retrait en $[10^{-3}]$ par % de variation d'humidité du bois | 0,4                 | 1,7           | 2,7                |

Tableau 1. Coefficients de retrait du bois

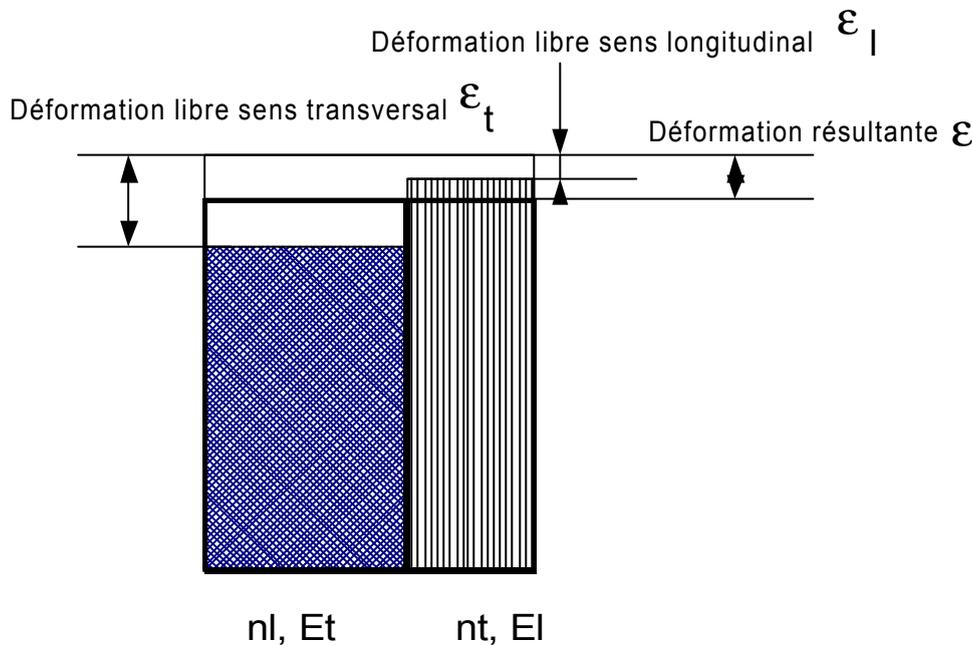
*Une fois la partie commune aux retraits radial et orthoradial effectuée, le retrait orthoradial étant plus important, une déformation supplémentaire de retrait orthoradial va se produire, entraînant des contraintes de retrait gêné, et par conséquent des fissures radiales.*

2.2) Les panneaux ou les poutres de type lamibois peuvent être à plis croisés. Donner l'expression de la déformation de retrait, dans le sens transversal, d'un panneau comportant un nombre  $n_l$  de plis dont les fibres sont orientés dans le sens longitudinal et un nombre  $n_t$  de plis dont les fibres sont orientées dans le sens transversal, en fonction de  $n_l$ , de  $n_t$ , du module de déformation longitudinale du bois,  $E_l$ , du module de déformation transversale,  $E_t$ , du retrait longitudinal,  $e_l$  et du retrait transversal,  $e_t$ . On considère que les plis sont d'épaisseurs identiques,  $e$ . Un dessin présentera la configuration.

En écrivant que l'effort normal est nul dans la section dessinée ci-dessous :

$$n_l E_t (e_t - e) + n_t E_l (e_l - e) = 0$$

$$e = \frac{n_l E_t e_t + n_t E_l e_l}{n_l E_t + n_t E_l}$$



Coupe transversale d'un panneau en lamibois après avoir rassemblé les plis de même orientation

2.3) Le lamibois est un type de bois lamellé collé dont les lamelles sont disposées verticalement (Fig. 4). Calculer le retrait suivant la direction verticale d'une poutre en lamibois de hauteur 50 cm et d'épaisseur 12 cm sous une variation de 5% d'humidité du bois. Les lamelles, d'une épaisseur de 3 mm, sont à plis croisés. 3 plis sur 4 ont les fibres dans le sens longitudinal de la poutre, le 4<sup>ème</sup> étant disposé perpendiculairement aux 3 premiers. On prendra  $E_l = 12 \text{ GPa}$ ,  $E_t = 0,8 \text{ GPa}$ ,  $a_l$  et  $a_t$  seront pris dans le tableau 1.



Figure 4. Élément de poutre en lamibois

*solution*

$$e = \frac{n_l E_t e_t + n_r E_l e_l}{n_l E_t + n_r E_l} = \frac{(3.0,8.2,7 + 1.12.0,4)5.10^{-3}}{3.0,8 + 1.12} = 3,91.10^{-3}$$

$$\text{Retrait} = 3,91.10^{-3} * 0,5 = 1,95.10^{-3} \text{ m}$$

2.4) Comparer la valeur obtenue précédemment avec le retrait transversal d'une poutre en bois lamellé collé courante de mêmes dimensions que précédemment et subissant la même variation d'humidité. On prendra comme coefficient de retrait celle du retrait radial du tableau 1.

$$e = 1,7.10^{-3} .5 = 8,5.10^{-3}$$

$$\text{Retrait} = 8,5.10^{-3} * 0,5 = 4,25.10^{-3} \text{ m}$$

*Le retrait du bois lamellé collé est plus de 2 fois plus grand que le retrait du lamibois à plis croisés. On montre ainsi l'intérêt de telles dispositions pour diminuer les retraits.*

2.5) Citer 2 autres moyens de diminuer les retraits des éléments en bois exposés en ambiance extérieure.

*La première solution est de protéger le bois. Ainsi, les variations dimensionnelles seront diminuées du fait des plus faibles variations de teneur en eau. Ceci peut être réalisé :*

- *par un bardage fixé sur la partie à protéger, tout en permettant une ventilation ;*
- *par une peinture ou lasure.*

*La seconde solution consiste à utiliser des bois traités thermiquement à haute température selon la technique appelée rétifcation. Les transformations chimiques de la matrice du bois rend celui-ci plus stable vis-à-vis des variations d'humidité.*

### B.3) Durabilité du bois.

31) Un concepteur projette un ouvrage d'art dont le tablier est en bois, mais sans avoir recours à des bois traités chimiquement. Quelle doit être sa démarche dans le choix des bois de structure vis-à-vis de leur durabilité. On suppose qu'il n'y a pas de risque de dégradation lié aux termites.

*Le concepteur doit définir les classes d'emploi (risques) des différentes parties d'ouvrage en fonction de leur exposition à l'eau. Les parties protégées de la pluie et ventilées sont par exemple en classe d'emploi 2, tandis que les parties exposées aux intempéries sont en classe d'emploi 3. Il s'agit ensuite de choisir l'essence appropriée en fonction de leur durabilité naturelle dans la classe d'emploi donnée. Pour cela la norme EN 350-2 sert de guide dans le choix des essences. Par ailleurs, la protection contre le risque lié aux insectes est assurée par le choix d'essences avec duramen et l'exigence d'exclusion de l'aubier des éléments en bois fournis.*

32) Citer 1 essence de bois résineux, ainsi que la partie du bois concernée, permettant d'obtenir des éléments structuraux massifs naturellement durables en situation correspondant à la classe d'emploi 3, c'est-à-dire en situation d'humidification fréquente, sans être en contact avec le sol.

*Les aubiers non traités sont considérés non durable en classe d'emploi 3. Il faut donc sélectionner le duramen. Le duramen de pin Douglas ou de mélèze, satisfont par exemple à la situation de la classe d'emploi 3.*

\*\*\*

# **Epreuve de modélisation des matériaux et des ouvrages**

## **Sujet : modélisation des matériaux et patrimoine**

### **Rapport d'écrit**

L'épreuve comporte deux parties, l'une portant sur la formulation d'une grave émulsion pour l'entretien d'une route départementale, l'autre sur l'étude des propriétés du bois. Les moyennes des 2 parties sont pratiquement identiques.

#### **Remarques sur la partie A – Formulation d'une grave émulsion pour l'entretien structurel d'une route départementale**

Partie A1 : La culture générale dans le domaine des matériaux de chaussées traités aux liants bitumineux reste très variable selon les candidats en particulier en ce qui concerne les différents types de matériaux utilisés. Les émulsions de bitume ne sont pas connues, ni leurs propriétés vis-à-vis du développement durable. La physique des émulsions est rarement connue de manière rigoureuse. Très peu de dessins ont été proposés.

Partie A2 : La partie formulation de la grave émulsion a mis en lumière le manque de connaissance des candidats des propriétés simples du bitume et le manque de maîtrise des candidats du calcul d'une masse volumique réelle pour les matériaux bitumineux (raisonnement en volume au lieu de raisonnement en masse). La présence d'eau dans le matériau n'a été que très peu prise en compte. On constate une confusion entre indice des vides et teneur en vides. La simple application de la loi des mélanges donnée dans le texte n'a été réalisée correctement que par un tiers des candidats ayant traité cette question.

Partie A3 : Seul un candidat a traité correctement la question relative au calcul RDM de la poutre trapézoïdale, l'inertie variable n'a été évoquée que par 5 candidats, la contrainte maximale ayant été souvent à tort positionnée à l'encastrement.

#### **Remarques sur la partie B – Etude des propriétés du bois**

Les explications sur l'anisotropie sont assez bien traitées en moyenne. Les ordres de grandeur de résistance et de module sont souvent sous estimés par les candidats.

Les explications sur la présence de fissures radiales, bien que très souvent proposées, ne sont pas en moyenne assez clairement exposées. Dire par exemple que le retrait ortho radial est le plus important ne suffit pas à expliquer la fissuration.

Le calcul du retrait d'un multi plis a été très peu réussi. C'est la question la moins abordée du sujet.

Les questions sur la durabilité révèlent que la notion de classes d'emploi des bois est méconnue. La confusion entre résineux et feuillus (hêtre, chêne, teck) est également fréquente et le terme de duramen très peu utilisé, voire à mauvais escient (ex : duramen de l'épicéa).

#### **Remarques générales :**

Certains candidats proposent plusieurs réponses différentes pour une même question. Il est évident que ce n'est pas au jury de faire un choix parmi les réponses.

Des réponses concises et précises ainsi qu'un regard critique sur les résultats obtenus sont attendus (ordres de grandeur...)

Certaines questions ne requièrent que du bon sens et du sens physique, ceux-ci sont encore trop souvent absents des réponses des candidats.

# Eléments de correction de la partie Mécanique des Fluides

## Exercice 1

- a) En supposant la pression atmosphérique à la surface libre de l'eau du canal, au point  $A$  on peut montrer que :

$$P_A = P_{\text{atm}} + \rho g h_e = 145470 \text{ Pa}$$

- b) Les pertes de charge régulières s'écrivent  $\Delta H_{AB} = j L_{AB}$  avec

$$j = \frac{\lambda}{D} \rho \frac{V^2}{2} \text{ [Pa/m]}$$

avec ici  $\lambda = 0,019$  et  $D = 0,2$ . En supposant la pression atmosphérique à la sortie de la conduite en  $B$ , l'application du théorème de Bernoulli entre la surface libre du canal et le point  $B$  mène à

$$\Delta H_{AB} = \rho g (h_e + h_c) - \rho \frac{V^2}{2}$$

d'où

$$V = \sqrt{\frac{2Dg(h_e + h_c)}{D + \lambda L_{AB}}} = 10,03 \text{ m/s}$$

- c) Le volume d'eau à évacuer en moins de 24 h représente  $V_0 = 159201 \text{ m}^3$ . La vitesse minimale d'évacuation est atteinte lorsque le niveau d'eau dans le canal est nul soit pour  $h_e = 0$  dans l'expression précédente. Celle-ci vaut alors 9,24 m/s. On peut alors s'assurer que le volume total d'eau contenu par le canal sera évacué en moins de 24 h avec 6,35  $\approx$  7 conduites de section identique. En faisant un calcul plus précis intégrant la variation de vitesse en fonction de l'avancement de l'évacuation (hauteur d'eau restante dans le canal) on peut déterminer le nombre de conduite  $N$  en intégrant la variation de volume dans le canal pendant  $dt$  :  $\frac{V_0}{h_e} dh = NV(h) \frac{\pi D^2}{4} dt$ . Ainsi sur la période  $T = 24 \text{ h}$ ,

$$N = \frac{V_0}{h_e \frac{\pi D^2}{4} T} \sqrt{\frac{2(D + \lambda L_{AB})}{Dg}} \left( \sqrt{h_c + h_e} - \sqrt{h_c} \right) = 6,1 \approx 7$$

## Exercice 2 : Ecoulement à l'intérieur d'un dièdre

- a) L'écoulement étant irrotationnel, nous avons  $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{v} = \vec{0}$ . Il est donc potentiel avec  $\vec{v} = -\overrightarrow{\text{grad}} \varphi$ . Le fluide étant incompressible, nous avons  $\text{div} \vec{v} = 0$  et  $\varphi$  satisfait donc à l'équation de LAPLACE :  $\Delta \varphi = 0$ . Remplaçons  $\varphi$  par son expression :

$$g(\theta) \frac{1}{r} f'(r) + g(\theta) f''(r) + g''(\theta) \frac{1}{r^2} f(r) = 0$$

avec  $f'(r) = \frac{df}{dr}$ ,  $f''(r) = \frac{d^2 f}{dr^2}$  et  $g''(\theta) = \frac{d^2 g}{d\theta^2}$ .

Pour  $r \neq 0$  nous déduisons

$$g''(\theta) + \left[ \frac{1}{f(r)} (r f'(r) + r^2 f''(r)) \right] g(\theta) = 0$$

Posons  $\Omega^2 = \frac{1}{f(r)} (r f'(r) + r^2 f''(r))$  et nous obtenons l'équation demandée :

$$g''(\theta) + \Omega^2 g(\theta) = 0 \tag{1}$$

b) Forme des solutions : Les solutions de l'équation 1 dépendent du signe de  $\Omega^2$ . Nous pouvons envisager les cas suivants :

- pour  $\Omega^2 > 0$  :  $g(\theta) = A \cos \Omega\theta + B \sin \Omega\theta$
  - pour  $\Omega^2 = 0$  :  $g(\theta) = A\theta + B$
  - pour  $\Omega^2 = -\omega^2 < 0$  :  $g(\theta) = A e^{\omega\theta} + B e^{-\omega\theta}$
- avec  $A$  et  $B$  des constantes d'intégration.

c) Le fluide étant parfait, la vitesse est tangente aux parois :

$$\begin{cases} \vec{v}(r, 0) = v(r, 0) \vec{e}_r \Rightarrow v_\theta(r, 0) = 0 \\ \vec{v}(r, \alpha) = v(r, \alpha) \vec{e}_r \Rightarrow v_\theta(r, \alpha) = 0 \end{cases}$$

Pour le potentiel de vitesse cela implique que :

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0} = -\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\alpha} = 0 \text{ soit } g'(0) = g'(\alpha) = 0 \text{ pour } f(r) \neq 0$$

**Remarque :** La solution  $f(r) = 0$  est à rejeter, puisqu'elle correspond à  $\varphi(r, \theta)$  identiquement nulle, donc à un fluide animé d'une vitesse constante et uniforme.

Compte-tenu des conditions aux limites, la forme exponentielle conduit à :

$$g'(\theta) = \omega A e^{\omega\theta} - \omega B e^{-\omega\theta} \quad g'(0) = 0 \text{ d'où } A = B$$

d'où

$$g'(\theta) = A\omega (e^{\omega\theta} - e^{-\omega\theta})$$

De plus,  $g'(\alpha) = 0 \Rightarrow A = 0$  d'où  $\varphi(r, \theta) = 0$ .

La forme linéaire conduit à la même conclusion :  $g'(\theta) = A$  et  $g'(0) = 0$ , d'où  $A = 0$  et  $\varphi(r, \theta) = 0$ .

D'autre part, la forme sinusoidale peut être précisée :

$$g'(\theta) = -\Omega A \sin \Omega\theta + \Omega B \cos \Omega\theta$$

$$g'(0) = 0 \Rightarrow B = 0 \text{ d'où } g'(\theta) = -\Omega A \sin \Omega\theta$$

$$g'(\alpha) = 0 \Rightarrow \Omega\alpha = p\pi \text{ (p entier) d'où } g(\theta) = A \cos \frac{p\pi}{\alpha}\theta$$

Si  $p = 1$ , la composante orthoradiale ne s'annule qu'en  $\theta = 0$  et en  $\theta = \alpha$ . Si  $p = 2$ ,  $v_\theta$  s'annule aussi en  $\theta = \frac{\alpha}{2}$  et l'espace correspondant correspondant à  $\theta > \frac{\alpha}{2}$  serait vide ce qui est physiquement inacceptable. La seule valeur correspondant à la situation proposée est  $p = 1$ . D'autre part, si  $p = 2$ , la composante radiale de la vitesse en  $\theta = \alpha$  serait négative, ce qui traduirait une arrivée de fluide et non pas l'inverse comme l'impose l'énoncé, d'où :

$$g(\theta) = A \cos \frac{\pi}{\alpha}\theta$$

d) Avec  $f(r) = C r^n$  calculons l'expression de  $\Omega^2$  :

$$\Omega^2 = \frac{1}{C r^n} [nCr^n + n(n-1)Cr^n] = n^2$$

$$\text{or } \Omega^2 = \left(\frac{\pi}{\alpha}\right)^2 \text{ d'où } n = \frac{\pi}{\alpha}$$

e) Composantes des vecteurs vitesses

$$\begin{cases} v_r = -\frac{\pi}{\alpha} ACr^{\frac{\pi-\alpha}{\alpha}} \cos \frac{\pi}{\alpha}\theta \\ v_\theta = \frac{\pi}{\alpha} ACr^{\frac{\pi-\alpha}{\alpha}} \sin \frac{\pi}{\alpha}\theta \end{cases}$$

Le module :

$$v^2 = v_r^2 + v_\theta^2 = \left(\frac{\pi}{\alpha} ACr^{\frac{\pi-\alpha}{\alpha}}\right)^2 \left(\cos^2 \frac{\pi}{\alpha}\theta + \sin^2 \frac{\pi}{\alpha}\theta\right)$$

$$\text{d'où } v = \frac{\pi}{\alpha} ACr^{\frac{\pi-\alpha}{\alpha}} \text{ qui est bien indépendant de } \theta$$

f) L'équation des lignes de courant se calcule par l'intégration de

$$\frac{v_r}{v_\theta} = \frac{1}{r} \frac{dr}{d\theta}$$

$$\Rightarrow -\cot \frac{\pi\theta}{\alpha} d\theta = \frac{dr}{r} \Rightarrow -\frac{\alpha}{\pi} \ln \left( \sin \frac{\pi\theta}{\alpha} \right) = \ln \frac{r}{r_0} \Rightarrow r_0^{\frac{\pi}{\alpha}} = r^{\frac{\pi}{\alpha}} \sin \frac{\pi\theta}{\alpha}$$

Pour  $\alpha = \frac{3\pi}{2}$  les lignes de courant sont données par  $r_0^{2/3} = r^{2/3} \sin \frac{2\theta}{3}$ . Les trajectoires des particules fluides s'identifient aux lignes de courant puisque le régime est permanent (voir figure 1).

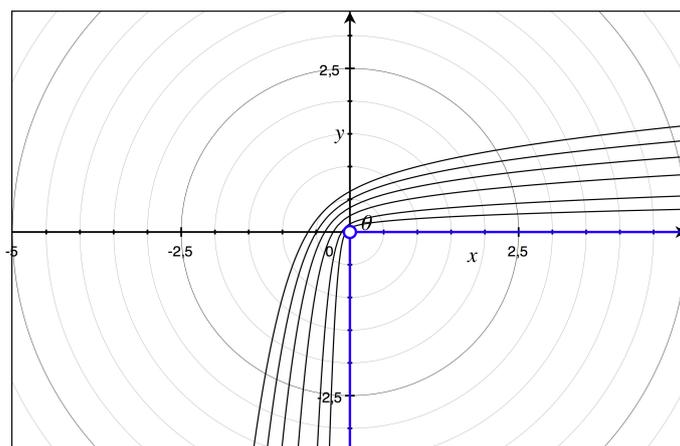


FIG. 1 – Lignes de courant

g) Le long des lignes de courant,  $r$  diminue jusqu'à l'arête (en  $\theta = \alpha/2$ ) et augmente ensuite. Ceci se vérifie à partir de l'équation différentielle qui a permis d'établir l'équation des lignes de courant :

$$\frac{dr}{d\theta} = -r \frac{\cos \frac{\pi\theta}{\alpha}}{\sin \frac{\pi\theta}{\alpha}}$$

$$\frac{dr}{d\theta} = 0 \text{ en } \frac{\pi\theta}{\alpha} = \frac{\pi}{2}, \text{ pour } \theta < \frac{\alpha}{2} \quad \frac{dr}{d\theta} < 0 \text{ et pour } \theta > \frac{\alpha}{2} \quad \frac{dr}{d\theta} > 0$$

Le module de  $v$  ne dépend que de  $r$ , l'évolution de la vitesse d'une particule fluide dépend donc du terme en  $r^{(\pi-\alpha)/\alpha}$ .

- Si  $\alpha = \pi$ ,  $\frac{\pi-\alpha}{\alpha} = 0$  la vitesse est constante
- Si  $\alpha > \pi$ ,  $\frac{\pi-\alpha}{\alpha} < 0$  la vitesse augmente à l'approche de l'arête
- Si  $\alpha < \pi$ ,  $\frac{\pi-\alpha}{\alpha} > 0$  la vitesse diminue à l'approche de l'arête

Pour  $r = 0$ , l'énoncé impose par la relation  $f(r) = Cr^n$  que  $v = 0$ . Cette valeur n'est pas surprenante pour  $\alpha < \pi$  car il y a continuité de  $v_r$  en ce point. Cependant pour  $\alpha > \pi$  lorsque  $r \rightarrow 0$  alors  $r^{(\pi-\alpha)/\alpha} \rightarrow \infty$  et le module de  $v$  tend également vers l'infini.

En fait, le modèle de fluide parfait ne s'applique qu'en dehors de la couche limite localisée près des parois. Ici lorsque  $r \rightarrow 0$  les effets de la viscosité du fluide ne peuvent plus être négligés et celle-ci impose à la vitesse de tendre vers 0 pour  $r = 0$ . Loin des parois, l'écoulement présente une allure comparable à celle obtenue pour le fluide parfait.

### Exercice 3

- Détermination du coefficient de perte de charge linéique  $\lambda$  :  $Re = \frac{VD}{\nu}$  avec  $\nu = 1.10^{-6}$ . Soit  $Re = 4,24.10^6$  (Régime turbulent). On en déduit  $\lambda = 0,01172$  à partir de la relation de Colebrook. Les pertes de charges linéiques sur AD sont alors  $\Delta H_{lAD} = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = 2,84 \text{ mCE}$  ou  $27854 \text{ Pa}$ .
- Pertes de charges singulières entre A et D : 3 coudes et un élargissement soit  $\sum \xi = 5,5$ . D'où  $\Delta H_{sAD} = \sum \xi \frac{V^2}{2g} = 14,03 \text{ mCE}$  ou  $137600 \text{ Pa}$ .

- c) Le théorème de Bernoulli entre les points A et D permet de déterminer la hauteur manométrique de la (des) pompe(s)  $H = z_A - z_D + \Delta H_{l,AD} + \Delta H_{s,AD}$  soit pour un débit de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $H=48,87 \text{ mCE}$  ou  $479414 \text{ Pa}$ . La pompe sélectionnée ne peut fournir qu'un débit maximum de  $300 \text{ l/s}$  pour une hauteur manométrique de  $50 \text{ mCE}$ . Il faudra donc associer 7 pompes en parallèle.
- d) Pour déterminer le point de fonctionnement, il est nécessaire de tracer la courbe de réseau de la forme  $H = ZQ^2 + H_0$  sur le diagramme caractéristique de la pompe. D'après les caractéristiques nominales du réseau on détermine  $Z = 4,216 \text{ mCE} \cdot \text{m}^{-6} \cdot \text{s}^2$  et  $H_0 = 32 \text{ mCE}$ . Si 7 pompes identiques sont installées, chacune doit délivrer  $2000/7 = 285,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et une hauteur manométrique de  $48,87 \text{ mCE}$ . Ce point n'étant pas sur la courbe de pompe, il faut ajouter une perte de charge de  $54 - 48,8 = 5,2 \text{ mCE}$  afin de ramener le point de fonctionnement sur le débit souhaité (voir figure 2).

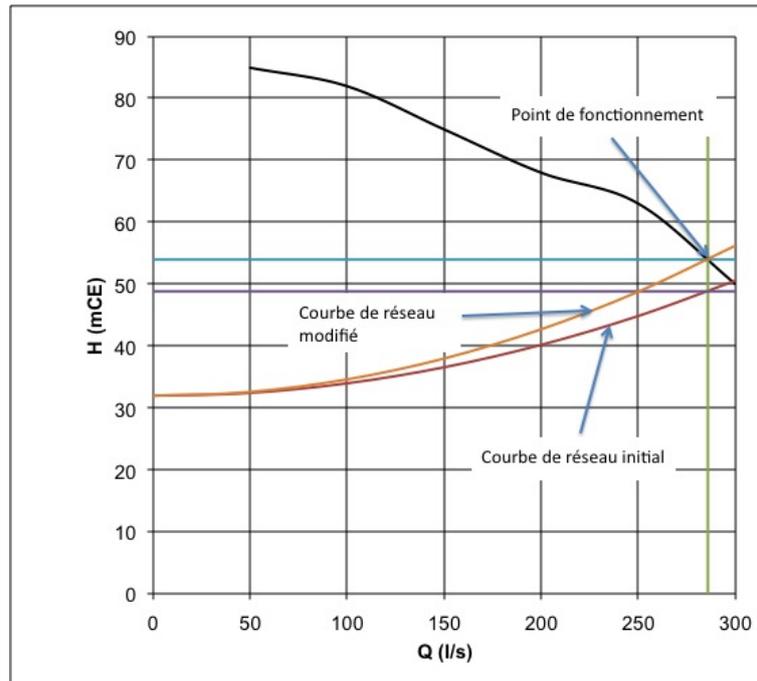


FIG. 2 – Point de fonctionnement

## Partie 2 : Mécanique des solides

Le tablier continu sur l'ensemble de l'ouvrage est constitué d'une peau métallique de 12 mm d'épaisseur, renforcé par des augets espacés de 0,80m, reposant directement sur 8 poutres métalliques en T inversé longitudinales de 2 m de hauteur, d'entraxe 4 m et de portée 40m appuyées elles même sur les lignes d'appui par l'intermédiaire d'appareils. Des poutres en T inversés transversales de hauteur 1,5m sont disposées tous les 4m. Les âmes des poutres en T (longitudinales et transversales) ont une épaisseur de 25mm, Les semelles ont une épaisseur de 60mm et une largeur de 0,8m (figure 5).

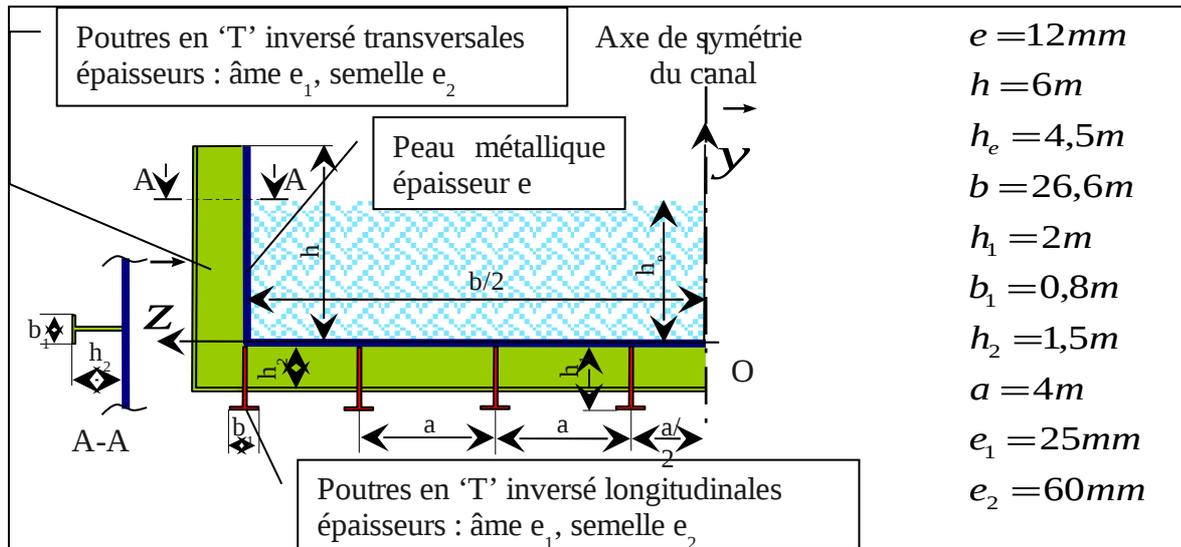


Figure 5 : Schéma de la demi-section transversale du tablier

L'ouvrage est donc une poutre droite continue composée de 34 travées. La première et la dernière travée ont une portée de  $L_0=25\text{m}$ , les autres travées ont une portée de  $L=40\text{m}$ .

### Charges permanentes :

- a) Calculer la masse linéique du tablier. La masse des poutres en T transversales sera répartie sur la longueur. La masse volumique de l'acier est  $\rho_a = 7800\text{kg/m}^3$ . (1)

masse linéique de la peau métallique:  $m_{ll} = \rho_a (\gamma h + b + 2e)e \approx 3615\text{kg/m}$

masse linéique des poutres en T longitudinales :  $m_{l2} = 8\rho_a [(h_1 - e_2)e_1 + b_1 e_2] \approx 6022\text{kg/m}$

masse d'une poutre transversale :

$m_t = \rho_a [2(h + e + h_2 - e_2) + (b + 2e)]e_1(h_2 - e_2) + (h + e + h_2 + b + 2e + 2h_2)b_1 e_2 \approx 228377\text{kg}$

masse linéique du tablier :  $m_{lt} = m_{ll} + m_{l2} + \frac{m_t}{a} \approx 15888\text{kg/m}$

- b) Calculer la masse linéique de l'eau pour une hauteur d'eau  $h_e$  et en déduire la charge linéique  $q$  appliquée sur le tablier. (On n'utilisera pas de coefficient multiplicateur pour les charges). (1)

Masse linéique de l'eau :  $m_{le} = \rho_e h_e b = 119700\text{kg/m}$

on obtient donc  $q = g(m_{lt} + m_{le}) \approx 1,34\text{MN/m}$

### Caractéristiques de la section :

On ne tiendra pas compte ici de la participation des poutres en T transversales, la section considérée est donc composée de 8 poutres en T longitudinales et de la peau métallique en forme de U.

- a) Calculer les coordonnées du centre de gravité  $G$  de la section dans le repère  $(O, y, z)$ .

Si on appelle

- 1 la partie verticale de la peau métallique,
- 2 la partie horizontale de la peau métallique
- 3 les âmes des poutres longitudinales
- 4 les semelles des poutres transversales :

Les aires correspondantes sont :

- $A_1 = 2 h e$
- $A_2 = (b + 2 e) e$
- $A_3 = 8 (h_1 - e_2) e_1$
- $A_4 = 8 b_1 e_2$

Les ordonnées des centres de gravité sont:

- $Y_1 = h/2$
- $Y_2 = 0$
- $Y_3 = -(h_1 - e_2)/2$
- $Y_4 = -h_1 - e_2/2$

L'ordonnée du centre de gravité de la section est :

$$Y_G = \frac{A_1 Y_1 + A_2 Y_2 + A_3 Y_3 + A_4 Y_4}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} \approx -0,586 m \quad (3)$$

b) Calculer son inertie  $I_{Gz}$  par rapport à l'axe  $Gz$  .

Les inerties par rapport à leur centre de gravité respectifs sont:

- $I_1 = 2 \frac{e h^3}{12} = 0,432 m^4$
- $I_2 = (b + 2 e) \frac{e^3}{12} \approx 3,834 10^{-6} m^4$
- $I_3 = 8 \frac{e_1 (h_1 - e_2)^3}{12} \approx 0,122 m^4$
- $I_4 = 8 \frac{b_1 e_2^3}{12} \approx 1,44 10^{-5} m^4$
- si  $d_i = Y_i - Y_G$  ( $i=1..4$ ) on a finalement:

$$I_{Gz} = I_1 + A_1 d_1^2 + I_2 + A_2 d_2^2 + I_3 + A_3 d_3^2 + I_4 + A_4 d_4^2 \approx 3,37 m^4 \quad (4)$$

## Calcul d'une travée courante :

On se place dans le cas d'une poutre continue à travées égales de longueur  $L$ , d'inertie  $I_{Gz}$  sur une infinité d'appuis chargée par une charge linéique  $q$  (figure 6).

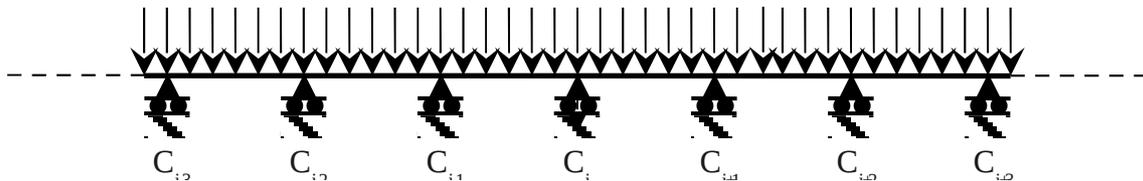


Figure 6 : Poutre continue

On s'intéresse à la travée comprise entre les appuis  $C_i$  et  $C_{i+1}$ .

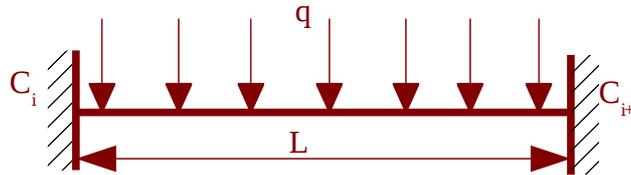
- a) La poutre étant de longueur infinie, donner les conditions limites à appliquer en  $C_i$  et  $C_{i+1}$  pour prendre en compte une condition de périodicité. (Ces conditions correspondent

également à des conditions de symétrie en  $C_i$  et  $C_{i+1}$ ).

Les conditions aux limites de symétrie imposent des rotations nulles en  $C_i$  et  $C_{i+1}$ .

La travée  $[C_i C_{i+1}]$  est donc bi-encastée. (3)

- b) Tracer le schéma mécanique correspondant. (2)

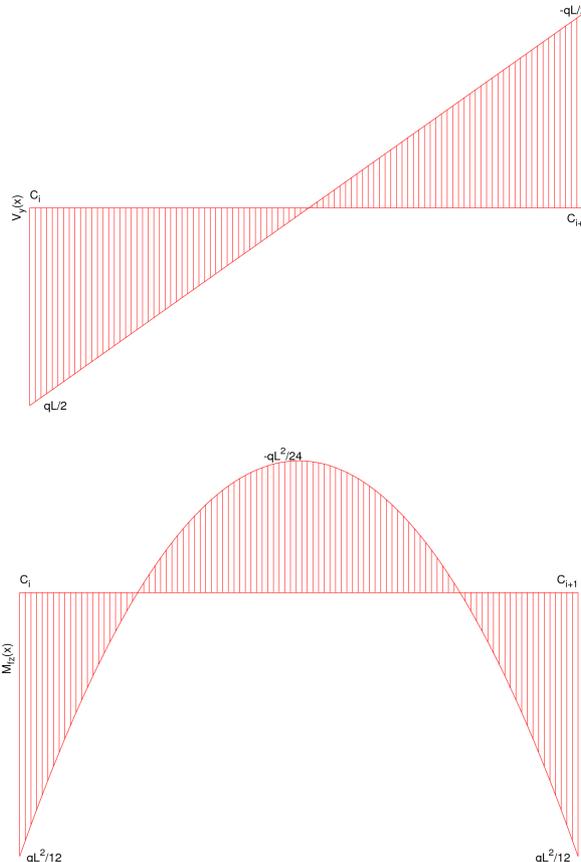


- c) Calculer les actions de liaison.

Le problème est hyperstatique d'ordre 3, les inconnues de liaisons sont ... Les calculs suivants sont effectués avec  $\vec{q} = q \vec{y}$  soit  $q < 0$

On trouve :  $Y_i = Y_j = \frac{-qL}{2}$   $X_i = 0$   $M_i = -M_j = \frac{qL^2}{12}$  (5)

- d) Tracer les diagrammes de l'effort tranchant et du moment fléchissant. (4=2+2)



- e) Calculer les contraintes maximales (traction) et minimale (compression) dans la travée. (5)

La section étant non symétrique par rapport à l'axe de flexion, il faut calculer les contraintes pour le moment fléchissant maximal  $M_{fmax} = \frac{-qL^2}{24} \approx 11,67 \text{ MNm}$  et le moment fléchissant

minimal  $M_{fmin} = \frac{-qL^2}{12} \approx -177,35 \text{ MNm}$ .

La plus grande ordonnée entre un point de la section et la fibre moyenne est

$y_{max} = h - Y_G \approx 6,66 \text{ m}$  la plus petite est  $y_{min} = -h_1 - Y_G \approx -1,414 \text{ m}$

$$\sigma_{max} = \text{MAXI} \left( \frac{-M_{fmin}}{I_{Gz}} y_{max}, -\frac{M_{fmax}}{I_{Gz}} y_{min} \right) \approx 348 \text{ MPa}$$

la contrainte maximale est obtenue pour  $M_{fmin}$  et  $y_{max}$  elle se situe donc sur le haut du tablier au droit des appuis.

la contrainte minimale est obtenue pour  $M_{fmax}$  et  $y_{min}$  elle se situe donc sur le haut du tablier en milieu de travée.

$$\sigma_{min} = \text{MINI} \left( \frac{-M_{fmax}}{I_{Gz}} y_{max}, -\frac{M_{fmin}}{I_{Gz}} y_{min} \right) \approx -174 \text{ MPa}$$

Ces contraintes ne sont admissibles pour un acier classique.

## Dilatation thermique :

Le tablier continu d'une longueur  $L_t=1330\text{m}$  peut subir une élévation de température moyenne de  $\Theta_m=5^\circ\text{C}$ , le coefficient de dilatation thermique de l'acier est  $\alpha_a=1,1 \cdot 10^{-5} \text{C}^{-1}$ .

a) Calculer l'allongement correspondant du tablier.

La déformation thermique libre est  $\varepsilon_{th} = \alpha_a \Theta_m$  le tablier a une longueur totale est  $L_t = 32 \cdot 40 + 2 \cdot 25 = 1330\text{m}$ , il s'allonge donc de  $\Delta l = \varepsilon_{th} L_t \approx 7,31 \text{ cm}$  (2)

b) Déduire le déplacement maxi sur appuis en considérant que l'appui central est fixe.

Le déplacement maxi sur appui est la moitié de l'allongement soit  $3,66 \text{ cm}$  (1)

## Calcul des appareils d'appuis :

On considère que les appareils d'appuis sont constitués de cylindres en élastomère de rayon  $R$ , de hauteur  $h$  et d'axe vertical noté ici  $x$  (figure 7). Ils sont sollicités par une charge axiale  $P$  due au poids propre du tablier et par un effort tranchant  $V_y$  dû à la dilatation thermique du tablier :

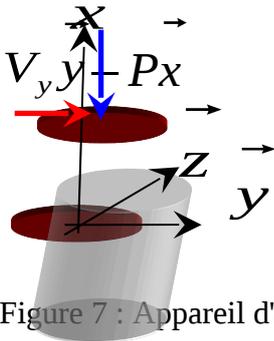


Figure 7 : Appareil d'appui

- Module d'élasticité longitudinal  $E=3 \text{ MPa}$
- Coefficient de Poisson  $\nu=0,5$

### Calcul sous l'action de $V_y$ seule.

On donne la fonction de contraintes  $\phi(y, z) = \frac{V_y}{2I_z(1+\nu)} \left[ (1+\nu) \left( y^2 z - \frac{z^3}{3} \right) + (3+2\nu) R^2 z \right]$

avec  $I_z = \frac{\pi R^4}{4}$  et  $V_y$  l'effort tranchant.

Les contraintes de cisaillement dérivent de la fonction de contrainte par les relations suivantes :

$$\sigma_{xy} = \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{V_y}{2I_z} \left( \frac{\nu}{1+\nu} z^2 - y^2 \right), \quad \sigma_{xz} = -\frac{\partial \phi}{\partial y}$$

a) Calculer le moment fléchissant et exprimer la contrainte résultante  $\sigma_{xx}$  en fonction de  $V_y$ .

$$M_{fz}(x) = V_y (h-x) \quad \text{donc} \quad \sigma_{xx} = -\frac{M_{fz}}{I_z} y = -\frac{V_y (h-x) y}{I_z} \quad (3)$$

b) Calculer les contraintes  $\sigma_{xy}$  et  $\sigma_{xz}$  à partir de la fonction de contraintes.

$$\sigma_{xy} = \frac{V_y}{8I_z(1+\nu)}((3+2\nu)(R^2 - y^2) + (1-2\nu)z^2) \quad \sigma_{xz} = -\frac{(1+2\nu)V_y y z}{4I_z(1+\nu)} \quad (3)$$

c) Montrer que les contraintes obtenues vérifient les équations d'équilibre. (5)

On doit vérifier : dans le cas où les forces volumiques et les quantités d'accélération sont

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = 0$$

$$\text{négligeables : } \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = \frac{\partial^2 \phi(y,z)}{\partial z \partial y} - \frac{\partial^2 \phi(y,z)}{\partial y \partial z} - \frac{yV_y}{I_z} = -\frac{yV_y}{I_z} \quad \text{et} \quad \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} = \frac{yV_y}{I_z} \quad \text{la première}$$

équation d'équilibre est donc vérifiée.

La vérification des deux autres équations est triviale si on suppose que les autres contraintes sont nulles.

d) Calculer la contrainte de cisaillement maximale  $\sigma_{xy_{Max}}$  en fonction de  $V_y$ .

$\sigma_{xy}$  Est maximal pour  $y=0$  et  $z=0$  car ses dérivées respectives sont nulles en 0, on a donc

$$\sigma_{xy_{Max}} = \frac{V_y}{8I_z(1+\nu)}(3+2\nu)R^2 \quad (3)$$

e) Si  $u_y(x)$  est le déplacement du point de l'axe du cylindre d'abscisse  $x$  en projection sur l'axe  $y$ , on donne :

$\frac{du_y}{dx} = k_y \frac{V_y}{GA}$  où  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ,  $A$  est l'aire de la section et  $k_y = \frac{8\nu^2 + 14\nu + 7}{6(1+\nu)^2}$  le coefficient de section réduite.

Calculer la raideur tangentielle  $K_T = \frac{V_y}{u_y(h) - u_y(0)}$  de l'appareil d'appui.

$$U_y(x) = k_y \frac{V_y}{GA} x + cste \quad \text{On a donc} \quad U_y(h) - U_y(0) = k_y \frac{V_y}{GA} h \quad \text{et donc}$$

$$K_t = \frac{GA}{k_y h} \approx \frac{468750 \pi R^2}{h} \quad (4)$$

f) Calculer la valeur de  $\sigma_{xy_{Max}}$  pour  $u_y(h) - u_y(0) = 1 \text{ cm}$

On calcule dans un premier temps  $V_y = K_T (U_y(h) - U_y(0)) = \frac{GA}{k_y h} (U_y(h) - U_y(0))$  puis

$$\sigma_{xy_{Max}} = \frac{V_y}{8I_z(1+\nu)}(3+2\nu)R^2 \approx \frac{6250}{h} \text{ (MPa)} \quad \text{avec } h \text{ en mètres. (3)}$$

### Calcul sous l'action de P seul.

Les faces supérieures et inférieures sont collées sur des plaques métalliques supposées rigides. Compte tenu de la présence des plaques sur les faces, la déformée de l'appareil d'appui sous l'action d'une charge normale se fait en tonneau (figure 8).

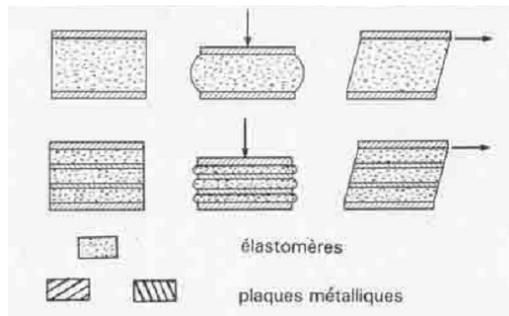


Figure 8 : Déformée d'un cylindre en élastomère feuilleté (d'après G. Gallas).

La raideur en compression s'écrit selon Lindley :

$$K_N = E(1 + 2k\Phi^2) \frac{A}{h} \text{ avec :}$$

- A : aire de la section.
- $k=0,57$  : coefficient lié au matériau.
- $\Phi = \frac{R}{2h}$  : coefficient de forme.

a) Calculer la valeur de  $K_N$  pour l'appareil sans feuillet intermédiaire.

$$K_N = \pi E R^2 \frac{0,285 R^2 + h^2}{h^3} \quad (2)$$

b) On place un feuillet intermédiaire à mi-hauteur de l'appareil. Ce feuillet est considéré infiniment rigide et on négligera son épaisseur.

Calculer la raideur  $K_{NI}$  de l'appareil d'appui correspondant ainsi que le ratio  $\frac{K_{NI}}{K_N}$ .

le coefficient de forme  $\Phi_1 = \frac{R}{h} = 2\Phi$  la raideur de l'ensemble est la moitié de la raideur de

chaque  $\frac{1}{2}$  partie  $K_{NI} = \frac{1}{2} E(1 + 8k\Phi) \frac{A}{\frac{h}{2}} = E(1 + 8k\Phi) \frac{A}{h}$

$$K_{NI} = \frac{1}{2} \pi E R^2 \frac{0,285 R^2 + (h/2)^2}{(h/2)^3}$$

$$\frac{K_{NI}}{K_N} = \frac{1 + 8k\Phi}{1 + 2k\Phi} = \frac{2,28R + h}{0,57R + h} \quad (4)$$

c) Conclure sur l'intérêt de positionner des feuillets dans les appareils d'appuis.

Le rapport  $\frac{K_{NI}}{K_N}$  est supérieur à 1, les appareils d'appui devant avoir la plus grande raideur normale, il est évident que l'introduction de feuillet est favorable.(4)

# Agrégation de Génie Civil

## Epreuve de Modélisation des Ouvrages

### Partie Modélisation Numérique – Correction

Texte : noir  
Éléments de correction : rouge  
Barème : bleu (50)

On se propose maintenant de modéliser de manière numérique le comportement en service de la structure décrite précédemment, à savoir le pont canal. La méthode préconisée est la méthode des éléments finis.

#### 1. Généralités

(5)

- a) Pourquoi, de manière générale, réaliser une modélisation numérique ?  
Pour calculer des contraintes et/ou déplacements au sein des structures, dans des configurations que les approches analytiques ne permettent pas de traiter de façon réaliste. 3
- b) Quel intérêt par rapport à une approche analytique traditionnelle MMC-RDM ?  
Pris en compte, dans la modélisation, d'hypothèses moins restrictives 1
- c) Quel est l'intérêt de l'approche analytique traditionnelle par rapport à l'approche numérique ?  
Mise en œuvre plus rapide, ne nécessitant pas des moyens sophistiqués spécifiques (logiciels) : coût moins élevé 1

#### 2. Modélisation simple de la structure « pont sans modélisation des fondations »

(20)

- a) Vous convenez d'une modélisation avec des éléments linéaires. Proposer un modèle 2D simple à l'échelle globale, en justifiant vos choix :  
Plan 2D : plan vertical comprenant l'axe longitudinal du pont  
Pont représenté par des éléments poutre travaillant en flexion et compression-traction (élément classique hypothèse Bernoulli) 2
- b) principe de détermination des caractéristiques géométriques et mécaniques des éléments  
élément caractérisé par une longueur, un moment quadratique (axe de flexion perpendiculaire au plan 2D), une section (caractéristiques géométriques pour calcul des contraintes), E (module d'Young), masse volumique (prise en compte de la gravité) 2
- c) critères adoptés pour la détermination du maillage  
La charge étant uniformément répartie, l'effort tranchant n'est pas constant. Prévoir un nbr. d'éléments « suffisamment » grand pour représenter chaque travée. Une étude de sensibilité sera réalisée sur le nbr. d'éléments. 2
- d) conditions aux limites  
L'ensemble du pont canal est dans le cas présent modélisé en respectant les dimensions de chaque travée (contrairement au calcul analytique précédent). Chaque appui (y compris culées) est considéré comme un appui simple (déplacement vertical nul au point d'appui). Afin de bloquer tout mouvement de solide, on pourra bloquer le déplacement horizontal du milieu du pont 2
- e) Chargement  
Le poids de l'ouvrage et de l'eau qu'il contient sont pris en compte par une charge uniformément répartie sur l'ensemble du pont-canal. 1
- f) Quel résultat peut-on raisonnablement exploiter avec un tel modèle ? Que peut apporter une telle modélisation par rapport au calcul analytique de la question 3 de la partie 2.  
Le moment quadratique peut être correctement évalué. Aussi la déformée de l'ouvrage peut être correctement estimée. Pour l'estimation des contraintes, on doit calculer la position du centre de masse par rapport à celle des nœuds de l'élément. Cette estimation est correcte si l'hypothèse de Bernoulli est justifiée et si les parois du canal ne gauchissent pas.  
L'approche numérique permet de prendre en compte la géométrie réelle de l'ouvrage (travées de longueurs différentes, nbr. fini de travées). 2
- g) En considérant toujours des éléments linéiques, proposer un principe de modélisation 3D plus réaliste. Préciser dans ce cas comment seront définis les efforts et les liaisons sur ces éléments.  
En 3D, on représentera les poutrelles longitudinales et transversales (fond) et verticales (cotés) avec des éléments poutres 3D (2 flexions et 1 torsion). Ces poutres sont reliées entre elles perpendiculairement (liaisons rigides). On prendra en compte, pour ces poutres, un moment quadratique équivalent (poutre + peau). Eventuellement on définira une section équivalente mais il est peu probable que ceci présente un intérêt puisque les efforts de traction dans ces éléments sont faibles (pression de l'eau sur les parois latérales)  
Les efforts portant sur les plaques, non représentées ici, sont réparties sur les éléments linéiques. 2
- h) Vous convenez à présent d'une modélisation avec des éléments surfaciques. Proposer un modèle 3D simple à l'échelle globale.

Dans le cas présent la procédure est l'inverse de la précédente. On calcul l'inertie de flexion des poutres par unité de longueur et on considère une plaque pour le fond et une plaque pour chacun des cotés avec des moments quadratiques équivalents. Pas de problèmes ici pour les chargements.

- i) Que peut apporter une telle modélisation par rapport à la précédente traitant des éléments linéaires ?  
Des chargements plus répartis et plus conformes à la réalité, mais on ne dispose pas des contraintes dans les poutres 2
- j) On prendra compte des symétries pour simplifier le modèle. Spécifier dans ces conditions les conditions aux limites particulières. Cette symétrie permet de ne représenter que la moitié de l'ouvrage pour le 2D et le quart pour le 3D. La symétrie est prise en compte en imposant des rotations nulles au niveau des axes de symétrie. 3
- k) Dire pourquoi un modèle global avec des éléments volumiques n'est pas envisageable.  
Pas envisageable en raison de la géométrie trop complexe et du nombre de nœuds que cela impliquerait. 1

### 3. Modélisation simple avec les fondations

(5)

a) Les fondations (piles) sont maintenant modélisées. Afin de simplifier la configuration, le sol n'est pas représenté. Quel type d'élément, simple, utiliser pour représenter ces fondations ?

On utilise des poutres. La jonction de la pile avec le tablier est modélisée par un élément linéique (flexion) particulier (voir partie 2 de cette épreuve). 2

b) Comment, de manière générale, prendre en compte le frottement latéral, la résistance en pointe et la réaction du sol.

Frottement latéral : éléments spéciaux ponctuels générant des forces de rappel proportionnelles aux déplacements longitudinaux du nœud et de sens opposé.

Réaction latérale du sol : éléments spéciaux ponctuels générant des forces de rappel proportionnelles aux déplacements horizontaux et de sens opposé

Résistance en pointe : idem frottement latéral

3

### 4. Modélisation du comportement dynamique

(5)

Sans faire un calcul dynamique temporel, comment à l'aide, comment à l'aide de la MEF, s'assurer que les actions dynamiques liées au vent n'auront aucune incidence sur la stabilité de la structure.

Déterminer numériquement les premières fréquences propres et les comparer aux fréquences des actions dynamiques du vent

5

### 5. Analyse des résultats

(10)

a) Toujours de manière générale, indiquer comment valider vos résultats (prendre en compte les questions de la partie 2) ?

On réalise des calculs analytiques effectués sur des modèles plus simples (ensemble de la structure ou éléments que l'on aura isolés de manière judicieuse (avec conditions aux limites et chargements spécifiques)). Ces résultats sont comparés aux résultats numériques afin de s'assurer que les ordres de grandeur sont respectés (risques d'erreur dans la mise en œuvre de la modélisation numérique (mauvaise maîtrise du code, erreur de données ...))

5

b) Comment assurer que la discrétisation de votre modèle est suffisante ?

Etude de sensibilité sur le nombre de nœuds et/ou sur le type des éléments (linéaire, quadratique)

5

### 6. Modélisation plus réaliste de la structure « pont et appuis »

(5)

Dans votre modèle composé d'éléments surfaciques, vous souhaitez prendre en compte explicitement les poutres transversales et longitudinales. Comment modéliser ces raidisseurs ?

Proposer 2 procédures en donnant le principe de fonctionnement.

. Les poutres sont prises en compte en considérant localement des surépaisseurs de la plaque (cette surépaisseur est calculée de manière à obtenir une rigidité de flexion équivalente et le centre de masse est décalé par rapport à celui de la plaque en section courante)

. On combine des éléments plaques avec des éléments poutre excentrée

5

# Epreuve de modélisation des matériaux et des ouvrages

## Sujet : modélisation des ouvrages

### Rapport d'écrit

#### **Remarques générales :**

Le sujet de modélisation des ouvrages qui comportait comme d'habitude trois parties était relativement long et de nombreux candidats ont choisi de traiter la partie dans laquelle ils sont le plus à l'aise et de délaissier naturellement les deux autres. Comme c'est le cas depuis plusieurs années la partie sur la modélisation numérique a été peu traitée et nous le regrettons. Le sujet de l'année prochaine devait être plus court pour que de plus nombreux candidats puissent s'exprimer dans les trois parties.

#### **Partie 1 Mécanique des fluides**

Cette partie d'épreuve comportait trois exercices indépendants. Le premier concernait la vidange de l'ouvrage, le second l'étude d'un écoulement irrotationnel et permanent d'un fluide parfait, le dernier l'alimentation de l'ouvrage par des pompes hydrauliques.

Un peu plus de 80% des candidats ont essayé de traiter cette partie, la moitié de ceux-ci a abordé de façon satisfaisante les exercices 1 et 3, et seulement un quart l'exercice 2.

Dans le premier exercice (question c), peu de candidats ont mis en avant la variation du débit de vidange en fonction de la hauteur d'eau restante dans l'ouvrage pour déterminer le nombre de canalisations.

Les quelques candidats ayant traité le deuxième exercice de manière satisfaisante ont montré leur capacité à poser les hypothèses nécessaires et mener les calculs de façon rigoureuse. Malgré tout, assez peu ont pu les mener jusqu'à leur terme par manque de temps certainement.

Enfin, concernant le troisième exercice il est regrettable de constater que peu de candidats ont été en mesure de préciser ce qu'est le point de fonctionnement d'une installation hydraulique.

En conclusion, il est vivement conseillé aux futurs candidats de tenter de traiter l'ensemble des exercices lorsque ceux-ci sont indépendants.

#### **Partie 2 Mécanique des solides:**

La partie mécanique abordait des problèmes relatifs à la théorie des poutres et à l'élasticité. Le calcul des charges et des caractéristiques était facile mais un peu long pour les candidats n'ayant pas fait d'hypothèses simplificatrices. La partie théorie des

poutres ne demandait pas de compétences très pointues mais de prendre un certain recul pour obtenir des solutions simples. La partie élasticité sur les appareils d'appuis pouvait être traitée relativement aisément par les candidats qui maîtrisent correctement les équations aux dérivées partielles.

Les questions les plus faciles sur les calculs de charges et de couplages thermomécaniques n'ont été correctement traités que par 50% des candidats.

### **Partie 3. Partie modélisation numérique**

Cette partie d'épreuve comportait des questions sur les méthodes numériques en général (avantages et limites) et des questions en relation avec l'ouvrage traité dans les 2 premières parties, à savoir le pont canal.

Cette partie a été abordée par 20 candidats sur les 55 ayant rendu une copie lors de l'épreuve de Modélisation des Matériaux et des Ouvrages. Ceci constitue un pourcentage sensiblement plus faible que celui de l'an passé. Il peut s'expliquer par le fait que les 2 premières parties de l'épreuve traitant des ouvrages, la partie mécanique des fluides et la partie mécanique des solides, nécessitaient plus de calculs que d'ordinaire. Sur ces 20 candidats seuls 6 candidats ont traité cette troisième partie de manière satisfaisante. Ces derniers ont montré qu'ils maîtrisaient à la fois les principes de modélisation et les méthodes numériques. Ils ont été en mesure d'apporter des réponses claires sur les différents niveaux de sophistication dans la modélisation du pont et de ses appuis (éléments 1D, 2D, 3D, linéaires, quadratiques ...).

Il s'avère que ces candidats se sont nettement démarqués des autres dans la notation de l'épreuve de Modélisation des Ouvrages. On conseillera donc vivement aux candidats futurs de ne pas négliger cette épreuve dont le poids est identique à celui de chacune des 2 premières parties.

# Composition de Géotechnique et qualité des ambiances

(10 points)

## Avertissement

*Pour la rédaction de ce sujet, les membres du jury ont souhaité proposer aux candidats un problème qui permette des développements des fondamentaux de la mécanique des sols en direction de l'identification et la caractérisation des matériaux géotechniques et en direction de l'interaction sols-structures.*

*La présente composition traite, sur un projet donné, des aspects relatifs :*

- à la géologie générale,*
- aux moyens de reconnaissance géotechnique et à l'interprétation des données qui résultent de la reconnaissance,*
- à la compréhension des grands mécanismes régissant les massifs de sol dans leur état naturel,*
- à l'interaction sol-structure, au dimensionnement des ouvrages et à leurs suivis.*

*Le sujet est rédigé de façon à ce que les différentes parties puissent être traitées de manière relativement indépendante. Toute donnée numérique non fournie est laissée à l'appréciation des candidats.*

## GENERALITES

Le problème traite du dimensionnement d'un quai maritime construit en bordure de l'estuaire du fleuve S.

Les niveaux altimétriques sont exprimés en « Cotes Marines » (CM). Localement, le zéro « Côte Marine » est situé 4,38 m au-dessous du zéro du nivellement général de la France NGF.

## LE SITE : GEOLOGIE ET PROPRIETES GEOTECHNIQUES

### Géologie générale du site

La lecture de la carte géologique de la région fournit des premiers éléments d'appréciation des conditions géotechniques du site de construction de l'ouvrage :

- le substratum est constitué par des terrains d'âge Jurassique ; au droit de l'ouvrage, ce substratum a été érodé jusqu'à la côte - 27,00 NGF, c'est à dire jusqu'aux argiles de Villerville constituant le niveau supérieur de l'Oxfordien supérieur (Séquanien) ; ces argiles, d'épaisseur pouvant atteindre 45 m au droit du port, se décomposent, en partie supérieure, en argiles brunes comportant notamment des marnes brunes et, en partie inférieure, en argiles noires ;
  - les alluvions déposées sur ce substratum sont constituées de graviers de fond (galets de silex de 30 à 100 mm mélangés à des sables grossiers), d'épaisseur 3 à 12 m, d'argiles blanchâtres, silteuses et collantes, dont l'épaisseur peut atteindre 7 à 9 m, d'argile tourbeuse compacte (1,50 à 3 m d'épaisseur), de silts gris organiques (5 à 7 m d'épaisseur) et enfin de sables, d'abord grossiers puis plus fins (10 à 20 m d'épaisseur) ;
  - des sables ont été mis en remblai, par voie hydraulique, en couverture de ces alluvions.
- 1) Rappelez quelles sont les grandes ères géologiques ; à quelle ère appartient la période Jurassique ; datez approximativement la période.

*Les grandes ères géologiques sont le précambrien, le paléozoïque (primaire), le mésozoïque (secondaire), le cénozoïque (tertiaire), le quaternaire ; le jurassique est une période de l'ère secondaire, d'âge 190-195 Ma-136 Ma.*

- 2) Indiquez quels phénomènes climatiques ont marqué l'ère quaternaire. Précisez quelles ont été les conséquences de ces changements climatiques sur les niveaux de la mer. Quand a eu lieu le dernier « grand » changement climatique ?

*L'ère quaternaire a été marquée par quatre glaciations majeures (Günz, Mindel, Riss et Würm) et les périodes interglaciaires correspondant. La dernière glaciation a pris fin il y a 10 000 ans environ.*

*L'accumulation de l'eau dans les calottes glaciaires (la calotte glaciaire polaire s'étendait jusqu'au plaines du nord de l'Europe) a conduit à des régressions importantes du niveau de la mer (jusqu'à 130 m).*

*A l'inverse, des transgressions ont été observées (surélévations du niveau de la mer).*

*Nota : le niveau des terrains a pour sa part pu être affecté par des mouvements tectoniques, surrections ou affaissement.*

- 3) Quelles conséquences ont eu les mouvements du niveau de la mer sur le niveau de base du lit de la rivière S. ?

*Lors de régressions, la rivière S. a surcreusé son lit, pour atteindre le niveau de la mer. Lors des transgressions, elle a partiellement comblé son lit, en y accumulant des dépôts.*

- 4) Donnez une interprétation de la lithologie donnée par la carte géologique, précisée ci-dessus.

*La rivière S. a creusé son lit dans le bassin sédimentaire. Au droit de l'estuaire, le creusement maximal a été atteint lors des périodes de glaciations, qui se sont accompagnées de régressions du niveau de la mer. Le bassin sédimentaire a ainsi été érodé jusqu'aux terrains jurassiques. Les périodes récentes, postérieures aux glaciations, ont vu le relèvement du niveau de la mer, qui s'est accompagné d'un comblement partiel avec des matériaux sédimentaires (alluvionnement, transit littoral).*

### **Nature et état des matériaux du site**

- 5) Quelles coupures granulométriques séparent les sables grossiers des sables fins, les sables fins des limons, et les limons des argiles ?

$d < 2 \text{ mm} : \text{argile}$

$2 \text{ mm} < d < 20 \text{ mm} : \text{limon}$

$20 \text{ mm} < d < 0,2 \text{ mm} : \text{sable fin}$

$0,2\text{mm} < d < 2 \text{ mm} : \text{sable grossier}$

- 6) Le Tableau 1 indique les pourcentages de matériaux passant différentes mailles de tamis, pour un ensemble d'échantillons prélevés sur toute la hauteur des alluvions. Préciser dans ce tableau la nature de chaque matériau (sable fin ou grossier, sable limoneux, sable argileux, limon, limon sableux, limon argileux, argile, etc.) ; distinguez les horizons sableux et les horizons plus fins. Sur la base de ces résultats et des éléments de géologie générale donnés ci-dessus, dressez la coupe lithologique du site.

Nota :

- un sol est dit grenu si 50 % des grains le constituant ont un diamètre supérieur à 80 microns ;
- lorsqu'un sol est constitué d'un mélange de grains de différentes catégories (sables et limons par exemple), il est conventionnellement classé dans la catégorie à laquelle appartiennent plus de la moitié des grains ;
- un sol grenu est considéré comme propre lorsqu'il contient moins de 5 % d'éléments fins.

*Cette analyse permet de distinguer les horizons suivants*

- *Un horizon limoneux entre les côtes +4,00 et +5,00 NGF (-0,5 à +0,5 CM)*
- *Un horizon de sables fins de +4,00 à -13,00 - 15,00 NGF (-0,5 à -17,5 -18,5 CM), localement limoneux en -1,00 et -3,00, localement plus grossier en -8,00, -9,00 ;*

- Un horizon limoneux entre -14,00 et -21,5 NGF(-25 CM).

- 7) Rappelez la définition du coefficient d'uniformité de Hazen d'une courbe granulométrique. Les sables rencontrés sont-ils bien gradués ou mal gradués ? Justifiez votre réponse.

*Le coefficient d'uniformité est donné par :*

$$Cu = D_{60}/D_{10}$$

*$Cu > 2$  : courbe étalée ;  $Cu < 2$  : matériau uniforme ;*

*Les données ne permettent pas de conclure de façon précise.*

- 8) On considère l'échantillon de sable prélevé à la côte -3,53 CM ; le poids spécifique des grains est égal à  $27 \text{ kN/m}^3$  ; déterminez l'indice des vides, la porosité, ainsi que le degré de saturation du sol.

*On trouve :  $n = 0,47$ ,  $e = 0,88$ ,  $S_r = 94 \%$*

- 9) En vous appuyant sur le diagramme de Casagrande, donnez la classe de plasticité des limons constituant le niveau de base des alluvions récentes. On considère l'échantillon de sol prélevé à la côte -24,225 CM ; le poids spécifique des grains est égal à  $26,5 \text{ kN/m}^3$  ; déterminez l'indice des vides, la porosité, ainsi que le degré de saturation du sol.

*$w_L > 50$  et  $I_p$  voisin de 30 : il s'agit de limons très plastiques au sens du diagramme de Casagrande*

*On trouve pour l'échantillon à -24, 2 :  $n = 0,5$ ,  $e = 1$ ,  $S_r = 100 \%$*

## Hydrologie du site

- 10) En quoi la porosité intervient-elle sur le comportement hydraulique des matériaux ? En quoi la taille des grains intervient-elle sur le comportement hydraulique des matériaux ? Définissez la perméabilité d'un sol. Exprimez la perméabilité en fonction de la taille des grains (formule de Hazen) et donnez l'ordre de grandeur de la perméabilité de chacune des couches d'alluvions. Indiquez les modalités d'un essai permettant de déterminer la perméabilité des matériaux.

*La porosité est définie par la proportion de vides contenus par un volume de sol. La porosité intervient donc sur la quantité d'eau que le sol peut contenir.*

*La dimension des vides est en relation avec la taille des grains ; plus les vides sont de dimension importante, et reliés entre eux, plus l'eau peut circuler facilement.*

*La perméabilité s'exprime en m/s ( $k$ ) elle quantifie la quantité d'eau qui peut passer dans une section  $S$  au travers d'un matériau ; la vitesse d'écoulement s'exprime en milieu saturé par :  $v = k \cdot i$ , et le débit par :  $Q = k \cdot i \cdot S$*

*La perméabilité des sables s'approche par la formule de Hazen :  $k = 1.25 \cdot (D_{10})^2$ , avec  $D_{10}$  diamètre de la maille pour 10% de passant exprimé en cm.*

*Les courbes granulométriques fournies ne sont pas très précises ; en posant l'échantillon côte -3.27, 10 % correspond à 0.002cm ,*

*On trouve  $1.25 (0.002)^2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  .*

*La perméabilité des sables est de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $10^{-6}$  m/s. Les sables sont assez peu perméables.*

**11)** Le niveau de la rivière S. varie avec la marée. Les conditions extrêmes de marée, fonction des conditions astronomiques et atmosphériques, sont définies par les niveaux suivants :

- Haute mer de vives eaux d'équinoxe : +9,10 CM,
- Plus basse Haute mer de mortes eaux : + 5,85 CM,
- Plus haute Basse mer de mortes eaux : + 3,20 CM,
- Marée basse de vives eaux d'équinoxe : +0,10 CM.

Décrivez le système hydrologique des alluvions : identifiez les différentes nappes ; identifiez les conditions aux limites de chacune de ces nappes ; donnez une estimation qualitative du fonctionnement de chacune de ces nappes.

*La présence de couches peu perméables conduit à isoler trois nappes principales :*

- *Une nappe superficielle située au-dessus des dépôts organiques récents. Elle va être sensible aux conditions de marée ainsi qu'aux précipitations ;*
- *Une nappe captive au sein des sables ;*
- *Une nappe captive au sein des graviers.*

*Les conditions aux limites pour chacune de ces nappes sont constituées par :*

- *le niveau de la rivière S. qui définit une condition de charge imposée ;*
- *les couches imperméables constituent des conditions de débit imposé.*

*Les nappes vont battre avec la marée. Ce battement sera d'autant plus amorti que les terrains sont peu perméables.*

## **Propriétés mécaniques des matériaux**

**12)** Le critère de Coulomb s'écrit  $\tau = \sigma_n' \tan \phi' + c'$  dans le diagramme de Mohr,  $\sigma_n'$  et  $\tau$  représentant respectivement les composantes normales et tangentielles des contraintes effectives s'appliquant aux facettes sur lesquelles la rupture est atteinte. Ecrivez ce critère dans le diagramme ( $s'$ ,  $t$ ), où  $s'$  et  $t$  désignent respectivement la moyenne des contraintes principales  $s' = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$  et le demi-déviateur  $t = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ .

*Dans le diagramme de Mohr, la droite d'équation  $t = s' \tan \phi' + c'$  constitue l'enveloppe des cercles de Mohr à la rupture ; ces cercles ont pour rayon  $= (s'_1 - s'_3)_{rup}/2$  et pour centre  $(s'_1 + s'_3)_{rup}/2$ .*

*La condition que ces cercles soient tangents à la droite d'équation  $t = s' \tan \phi' + c'$  s'écrit :*

$$(s'_1 - s'_3)_{rup}/2 = c' \cos \phi' + \sin \phi' (s'_1 + s'_3)_{rup}/2$$

*soit :  $t = c' \cos \phi' + s' \sin \phi'$ .*

- 13) Afin de déterminer la résistance au cisaillement, on a réalisé des essais à l'appareil triaxial en condition drainée (Tableau 2). Décrivez le principe de l'essai. Reportez sur un diagramme ( $s'$ ,  $t$ ) les valeurs de  $s'$  et  $t$  atteintes à la rupture pour l'ensemble des essais de cisaillement et déterminez les paramètres de résistance au cisaillement des matériaux. Lorsque c'est justifié, vous distinguerez les couches de sol, dans votre analyse.

*Les essais triaxiaux sont largement décrits dans la littérature.*

*Les essais à l'appareil triaxial conduisent à une valeur moyenne de  $j'$  égale à 39,5 degrés pour une cohésion nulle.*

*Les valeurs mesurées de  $j'$  peuvent donc être retenues pour l'ensemble de la série sablo-limoneuse.*

$$j' \text{ moyen} = 40 \text{ degrés}$$

$$c' \text{ moyen} = 0 \text{ kPa}$$

- 14) Quelles modalités d'essai appliqueriez vous pour déterminer les paramètres de résistance au cisaillement non drainé des limons ? Les essais réalisés conduisent à une valeur de  $\lambda_{cu}$  égale à 0,4. Déduisez-en une valeur représentative de la cohésion non drainée des limons situés à la base des alluvions récentes.

*Les paramètres de résistance au cisaillement non drainé peuvent être obtenus en utilisant l'appareil triaxial et en réalisant des essais de cisaillement en conditions non drainées : essais UU, réalisés sans consolidation préalable, essais CU, réalisés avec consolidation préalable de l'échantillon.*

*Si l'on fait l'hypothèse d'un poids apparent sous la nappe égal à 10 kN/m<sup>3</sup>, d'une surface du terrain avant travaux à la cote +6,5 CM (par ailleurs égal au niveau du toit de la nappe), la contrainte effective à la cote -25 CM est égale à 315 kPa. La cohésion non drainée est alors égale à 126 kPa.*

- 15) Le résultat d'un essai pressiométrique est donné Figure 1. Décrivez brièvement le principe de réalisation et l'appareillage utilisé. Illustrez par un schéma. A quelles caractéristiques géotechniques cet essai permet-il d'accéder ?

*On se reportera à la littérature pour la description de l'essai pressiométrique. Les caractéristiques géotechniques auxquelles il permet d'accéder sont la pression limite et le module pressiométrique.*

- 16) Procédez au dépouillement de l'essai pressiométrique donné en Figure 1 :

- Pourquoi a-t-on établi une « courbe corrigée » ? quelles sont les « corrections » apportées à la mesure ?

*Les corrections tiennent compte de la rigidité propre de la sonde, de la dilatation des tubulures et de la différence de hauteur et donc de pression entre le niveau de la sonde et le niveau du contrôleur de pression.*

- Identifiez de façon sommaire le « palier pseudo-élastique » ; précisez comment est choisi le centre de ce palier pseudo-élastique ;

*Le palier pseudo plastique est délimité sommairement par les points de coordonnées ( $p_1 = 500 \text{ kPa}$ ,  $V_1 = 90 \text{ cm}^3$ ) et ( $P_2 = 1500 \text{ kPa}$ ,  $v_2 = 170 \text{ cm}^3$ ). Le centre de ce palier pseudo plastique est choisi comme étant le lieu de pente minimale de la courbe.*

- Calculez le module pressiométrique du sol (expression donnée en annexe, Equation 1) ;

*On trouve un module pressiométrique égal à 22 MPa environ.*

- La pression limite est définie par convention comme « la pression qui entraîne le doublement du volume de la cellule centrale de mesure » ( $V = V_s + 2V_l$ , compte tenu des conventions de notation adoptées en annexe, Equation 1) ; donnez une estimation de la pression limite du sol.

*Le volume injecté est à la pression limite est égal par convention à  $V_s + 2V_l$ , soit 720  $\text{cm}^3$ . La pression limite prend donc une valeur comprise entre 2,3 et 3 Mpa.*

**17)** Donnez une estimation la valeur du module d'Young de la couche considérée par cet essai. Quelle est l'utilité de ce paramètre ?

*Le module pressiométrique déterminé, on peut le relier au module oedométrique du sol par l'expression  $E_{oed} = E_M/a$ , où  $a$  désigne le coefficient rhéologique du sol, donné par la théorie pressiométrique.*

*Le module oedométrique est lui même relié au module d'Young  $E$ , lequel est utilisé dans les calculs de déformations des sols, en particulier dans le cadre de modélisation en élément fini.*

## **LE QUAI – ANALYSE DU COMPORTEMENT OBSERVE**

### **Principe de l'ouvrage et techniques de réalisation**

Le quai est constitué d'une paroi en béton armé ancrée à un rideau de palplanches (Figure 2) :

- La paroi en béton armé est constituée d'une paroi moulée de 1,20 m d'épaisseur et de 40 m de profondeur ancrée dans les argiles de Villerville, surmontée par une poutre de couronnement en béton armé de 3,43 m de largeur et de 1,50 m de hauteur. L'ensemble est muni d'un masque d'accostage de 9,10 m de hauteur et 1,60 m de largeur.
- La paroi est retenue par deux nappes de tirants passifs faiblement inclinés, mis en place dans les terrains remblayés après terrassement sur 17 m de hauteur environ derrière la paroi. Ces tirants sont fixés à un rideau de palplanches situé à une distance de 45,40 m derrière la paroi moulée.

**18)** Décrire le principe de réalisation de la paroi moulée. On précisera notamment :

- les différentes phases de réalisation d'un panneau de paroi-moulée ;

*Mise en place de murettes guide, excavation et bétonnage par panneaux de longueurs limités. Pour chaque panneau on procède comme suit : excavation, maintenue par de la boue de bentonite, mise en place de la cage de ferrailage, bétonnage au tube plongeur, en remontant, recépage.*

- le rôle de la boue de bentonite en phase de réalisation. Précisez quelle condition s'applique au niveau de la boue dans la tranchée ;

*La boue de bentonite maintient les parois de l'excavation ; en particulier elle empêche l'eau de circuler du terrain vers la fouille ; un niveau de boue supérieur au niveau de la nappe dans les terrains assure que le fluide circule de la fouille vers le terrain. Son caractère thixotropique garantit que la circulation de fluide et donc la perte de boue, reste faible. Le niveau de la boue doit dépasser le toit de la nappe de 1 m à 1m50 minimum.*

- les limites d'emploi de la technique ;

*Les principales limites d'emploi sont : les sols trop perméables à la boue, c'est à dire présentant des cavités ou trop ouverts ; la profondeur (plusieurs dizaines de mètres en usage courant), la présence de nappes artésiennes.*

- les alternatives possibles à cette technique, dans le cas présent.

*Les rideaux combinés métalliques (palplanches et pieux) peuvent être utilisés concurremment à la paroi moulée dans le cas présent. Le havage de caissons et les plate-forme sur pieux sont également des alternatives*

- 19)** Comment justifiez-vous le fait de mettre en place des ancrages en position relativement basse ? Indiquez le phasage de travaux à suivre pour installer ces tirants et donnez les avantages et les inconvénients de cette disposition.

*Cette position des tirants permet une meilleure répartition des moments dans l'écran en créant des points d'appuis mieux répartis. Elle présente l'inconvénient de nécessiter l'ouverture d'une fouille importante pour mise en place des tirants.*

*L'excavation puis le remblaiement permettent cependant de maîtriser la qualité des terrains de remblai, avec contrôle du compactage et de densité et substitution des matériaux supérieurs vasards.*

## **Principes d'instrumentation**

- 20)** Lors de sa réalisation, le quai a été équipé de tubes inclinométriques et d'extensomètres à cordes vibrantes :

- Qu'est-ce qu'un tube inclinométrique ? Comment est-il mis en place ? Que mesure-t-on et suivant quelles modalités ? Que peut-on déduire de la mesure ?

*Un tube inclinométrique est un tube souple scellé dans la paroi ou dans le terrain. On y descend une sonde, munie d'un pendule, permettant la mesure de la verticalité du tube suivant un pas de mesure donné (typiquement 0,5 m). La comparaison de mesures effectuées à différents moments de l'histoire de l'ouvrage permet d'accéder à son mouvement horizontal.*

- Qu'est-ce qu'un extensomètre à corde vibrante ? Quel est le principe de mesure ? Que mesure-t-on et suivant quelles modalités ? Que peut-on déduire de la mesure ?

*Un extensomètre à corde vibrante permet de mesurer la fréquence de vibration d'une corde tendue entre deux points solidaires de la structure. La fréquence de vibration est dépendante de la tension de la corde laquelle varie avec la déformation de la structure. L'extensomètre mesure donc la déformation d'un élément de structure.*

## Comportement de l'ouvrage

Le modèle géotechnique du site retenu pour le calcul de l'ouvrage est donné dans le Tableau 3.

Pour les nappes qui sont en relation avec la marée (terrain situé devant l'ouvrage), la charge hydraulique est modélisée comme suit (Tableau 4) :

- elle est supposée constante en tout point de la nappe,
- elle varie dans le temps avec la marée :
  - avec une amplitude atténuée,
  - avec un déphasage dans le temps,
  - en restant néanmoins centrée autour du niveau de mi-marée.

Pour les nappes qui sont protégées par la paroi (terrain situé derrière l'ouvrage), la charge hydraulique est modélisée comme suit, en situation de service (Tableau 5) :

- la nappe des sables est statique (elle n'est plus influencée par la marée),
- la nappe des graves reste fortement corrélée avec la marée.

**21)** On se place en configuration initiale, avant tous travaux. Pour des situations de marée haute et de marée basse respectivement à +7,90 et +1,30 CM, déterminez les profils :

- des pressions d'eau régnant dans les alluvions,
- des contraintes totales et effectives s'exerçant sur des facettes horizontales du terrain,
- des contraintes effectives et totales s'exerçant sur les facettes verticales du terrain.

Nota : on justifiera les approximations faites, le cas échéant ; pour les couches de sols fins, on indiquera les hypothèses faites, tant pour le calcul des pressions d'eau que des pressions de sol.

*Les charges hydrauliques des nappes sont obtenues, à marée haute et à marée basse compte tenu du coefficient d'amortissement donné dans l'énoncé (le niveau moyen est conservé, mais l'amplitude est réduite du facteur d'amortissement). Ils sont exprimés en m Cotes Marines.*

*Nota : le déphasage n'est pas pris en compte dans ce calcul.*

|             |        |
|-------------|--------|
| Marée haute | 7,9 CM |
| Marée basse | 1,3 CM |
| Mi-marée    | 4,6 CM |

| Nappe dans les terrains | remblais | sable    | graves   |
|-------------------------|----------|----------|----------|
| marée haute             | 6,5 m CM | 5,6 m CM | 6,6 m CM |
| marée basse             | 6,5 m CM | 3,6 m CM | 2,6 m CM |

La contrainte sur une facette horizontale est proportionnelle à l'épaisseur de sol surincombant et au poids volumique du sol. C'est une contrainte principale, le massif de sol étant horizontal, indéfiniment.

Un coefficient  $K$  relie les contraintes principales effectives ( $K_0$  à l'état au repos).

$$s'_v = K_0 * s'_h$$

Nota : on travaille en contrainte effective ( $s' = s - u$ )

Les pressions d'eau sont obtenues dans les couches perméables par  $u = \gamma_w (h-z)$ , où  $h$  est la charge de la nappe, déterminée ci-dessus, égale à la hauteur piézométrique de la nappe, et  $z$  le niveau où le calcul est effectué.

| z<br>(CM,<br>m) | Marée haute         |              |                      |                      |                     | Marée basse  |                      |                      |                     |
|-----------------|---------------------|--------------|----------------------|----------------------|---------------------|--------------|----------------------|----------------------|---------------------|
|                 | $\sigma_v$<br>(kPa) | $u$<br>(kPa) | $\sigma'_v$<br>(kPa) | $\sigma'_h$<br>(kPa) | $\sigma_h$<br>(kPa) | $U$<br>(kPa) | $\sigma'_v$<br>(kPa) | $\sigma'_h$<br>(kPa) | $\sigma_h$<br>(kPa) |
| 9,5             | 0,0                 |              | 0,0                  | 0,0                  | 0,0                 |              | 0,0                  | 0,0                  | 0,0                 |
| 6,5             | 54,0                | 0,0          | 54,0                 | 24,6                 | 24,6                | 0,0          | 54,0                 | 24,6                 | 24,6                |
| 0,0             | 171,0               | 65,0         | 106,0                | 48,3                 | 113,3               | 65,0         | 106,0                | 48,3                 | 113,3               |
| 0,0             | 171,0               | 65,0         | 106,0                | 48,3                 | 113,3               | 65,0         | 106,0                | 48,3                 | 113,3               |
| -2,0            | 203,0               | 75,9         | 127,1                | 50,6                 | 126,5               | 56,1         | 146,9                | 58,5                 | 114,6               |
| -2,0            | 203,0               | 75,9         | 127,1                | 50,6                 | 126,5               | 56,1         | 146,9                | 58,5                 | 114,6               |
| -21,0           | 573,5               | 265,9        | 307,6                | 122,6                | 388,5               | 246,1        | 327,4                | 130,5                | 376,6               |
| -21,0           | 573,5               | 265,9        | 307,6                | 122,6                | 388,5               | 246,1        | 327,4                | 130,5                | 376,6               |
| -26,0           | 663,5               | 325,8        | 337,7                | 120,7                | 446,5               | 286,2        | 377,3                | 134,9                | 421,1               |
| -26,0           | 663,5               | 325,8        | 337,7                | 120,7                | 446,5               | 286,2        | 377,3                | 134,9                | 421,1               |
| -31,5           | 784,5               | 380,8        | 403,7                | 144,3                | 525,1               | 341,2        | 443,3                | 158,5                | 499,7               |

Nota : on fait l'hypothèse que les diagrammes des pressions d'eau dans les couches peu perméables sont obtenus par interpolation linéaire entre les valeurs imposées à leurs limites par les couches perméables.

On cherche à apprécier le comportement observé de l'ouvrage. Dans cet objectif, on considère dans les questions qui suivent différents états de référence du sol, les états d'équilibre limites de poussée et de butée.

On se place en configuration finale de l'ouvrage (Figure 2) et on considère la situation de marée basse, défavorable du point de vue de l'équilibre de l'ouvrage. La situation considérée est caractérisée par un niveau de basse mer à +1,30 CM.

- 22) Déterminez le profil des pressions d'eau qui s'appliquent sur chacune des faces de la paroi, à marée basse ainsi qu'à marée haute. On utilisera les modèles hydrologiques donnés dans les Tableau 4 et Tableau 5.

Les charges hydrauliques des nappes sont obtenues compte-tenu du coefficient d'amortissement donné dans l'énoncé. Ils sont exprimés en m Cotes Marines. Le déphasage n'est pas pris en compte dans les calculs.

|             |        |
|-------------|--------|
| Marée haute | 7,9 CM |
| Marée basse | 1,3 CM |
| M-marée     | 4,6 CM |

| Nappes dans les terrains | Devant la paroi |        | Derrière la paroi |        |
|--------------------------|-----------------|--------|-------------------|--------|
|                          | Sable           | Graves | Sable             | Graves |
| Amplitude                | 2,0 CM          | 4,0 CM | 2,0 CM            | 4,0 CM |
| marée haute              | 5,6 CM          | 6,6 CM | 5,6 CM            | 6,6 CM |
| marée basse              | 3,6 CM          | 2,6CM  | 5,6 CM            | 2,6CM  |

- 23) On s'intéresse aux efforts appliqués sur la face arrière de la paroi (côté sol soutenu). A quelles conditions le terrain soutenu peut-il être amené à l'état d'équilibre de poussée, sur toute la hauteur du soutènement ? Cette condition est-elle remplie ? Etablissez dans ces conditions le diagramme des contraintes effectives appliquées par le terrain soutenu à l'ouvrage. On fera appel à la théorie de Rankine et on indiquera les limites de cette théorie. Le calcul sera mené pour la situation de marée basse.

*Le terrain est amené à l'état d'équilibre de poussée si la paroi se déplace suffisamment. On considère généralement qu'un déplacement de la paroi égal à 0,1% de sa hauteur, soit de l'ordre de 4 cm dans le cas présent, permet d'amener le terrain à l'état d'équilibre limite de poussée. La courbe de déplacement de la paroi montre que le déplacement est suffisant pour que l'état d'équilibre de poussée soit atteint en partie médiane de la paroi, mais reste insuffisant en parties basse et haute de la paroi.*

*La théorie de Rankine est établie pour les massifs de sol semi-infini ; elle ne prend donc pas en compte l'interaction du sol avec la structure (accrochage du sol sur la structure, qui conduit à une rotation des contraintes au voisinage de la structure). Son utilisation au calcul des poussées majore les efforts dans le soutènement.*

- 24) A quelles conditions le terrain situé devant la paroi peut-il être amené à l'état d'équilibre limite de butée, sur toute la hauteur de la fiche ? Etablissez le diagramme de butée effective du terrain sur l'ouvrage. On fera encore appel à la théorie de Rankine et on indiquera les limites de cette théorie. Le calcul sera mené pour la situation de marée basse.

*Le terrain est amené à l'état d'équilibre de poussée si la paroi se déplace suffisamment. On considère généralement qu'un déplacement de la paroi égal à 2 à 5 % de la hauteur en fiche, soit de l'ordre de 15 à 30 cm dans le cas présent, permet d'amener un terrain initialement au repos à l'état d'équilibre limite de butée. Le chemin des contraintes suivi ici (terrain déchargé verticalement et comprimé latéralement) conduit à une mobilisation de la butée pour des déplacements plus faibles.*

*La remarque concernant l'utilisation de la théorie de Rankine a été faite ci-dessus. Son utilisation au calcul des butées poussees minore la réaction d'appui disponible, dans le cas courant.*

Eléments de réponse aux question 22, 23 et 24 :

Tableau des propriétés des sol

| Nature des terrains    | Cotes CM     | $\gamma$          | $\phi' (j_u)$ | $c' (c_u)$ | $q_c$ | $p_L - p_0$ | $E_M$ | $K_a$ | $K_p$ |
|------------------------|--------------|-------------------|---------------|------------|-------|-------------|-------|-------|-------|
|                        | M            | kN/m <sup>3</sup> | degré         | kPa        | MPa   | MPa         | MPa   |       |       |
| remblais nouveaux      | +10,2 à -7,5 | 19,5              | 40,0          | 0,0        | 8,0   | -           | 15,0  | 0,2   | 4,6   |
| sables                 | -7,5 à -21   | 19,5              | 40,0          | 0,0        | 15,0  | 2,0         | 20,0  | 0,2   | 4,6   |
| limons inférieurs      | -21 à -26    | 18,0              | 29,0          | 0 (100)    | -     | 1,5         | 22,0  | 0,3   | 2,9   |
| graves de fond         | -26 à -31,5  | 22,0              | 40,0          | 0,0        | -     | 4,6         | 36,0  | 0,2   | 4,6   |
| argiles de Villerville | Substratum   | 20,0              | 20,0          | 20 (200)   | -     | 1,9         | 22,0  | 0,5   | 2,0   |

Tableau d'équilibre de l'écran (marée basse)

| Terrain soutenu |            |       |             |                | Bassin et terrain en butée |            |             |                |                   | Résultantes sur la paroi |        |            |        |        |
|-----------------|------------|-------|-------------|----------------|----------------------------|------------|-------------|----------------|-------------------|--------------------------|--------|------------|--------|--------|
| Z               | $\sigma_v$ | u     | $\sigma'_v$ | $\sigma'_{ha}$ | u                          | $\sigma_v$ | $\sigma'_v$ | $\sigma'_{hp}$ | $\sigma'_{hp}/FB$ | $\Delta\sigma'_h$        | T      | $\Delta u$ | Tu     | T      |
| (CM, m)         | (kPa)      | (kPa) | (kPa)       | (kPa)          | (kPa)                      | (kPa)      | (kPa)       | (kPa)          | (kPa)             | (kPa)                    | (kN)   | (kPa)      | (kN)   | (kN)   |
| 10,2            | 0,0        | 0,0   | 0,0         | 0,0            | 0,0                        | 0,0        | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 0,0                      |        | 0,0        |        | 0,0    |
| 5,6             | 89,9       | 0,0   | 89,9        | 19,5           | 0,0                        | 0,0        | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 19,5                     | 45,0   | 0,0        | 0,0    | 45,0   |
| 3,6             | 128,5      | 19,8  | 108,7       | 23,6           | 0,0                        | 0,0        | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 23,6                     | 87,7   | 19,8       | 19,6   | 107,3  |
| 3,0             | 140,4      | 25,9  | 114,5       | 24,9           | 0,0                        | 0,0        | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 24,9                     | 102,5  | 25,9       | 33,5   | 136,0  |
| 3,0             | 140,4      | 25,9  | 114,5       | 24,9           | 0,0                        | 0,0        | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 24,9                     | 102,5  | 25,9       | 33,5   | -464,0 |
| 1,3             | 173,6      | 42,9  | 130,7       | 28,4           | 0,0                        | 0,0        | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 28,4                     | 147,8  | 42,9       | 92,0   | -360,2 |
| -7,5            | 345,2      | 130,9 | 214,3       | 46,5           | -88,0                      | -88,0      | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 46,5                     | 477,4  | 42,9       | 469,5  | 346,9  |
| -7,5            | 345,2      | 130,9 | 214,3       | 46,5           | -88,0                      | -88,0      | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 46,5                     | 477,4  | 42,9       | 469,5  | -903,1 |
| -15,5           | 501,2      | 210,9 | 290,3       | 63,0           | -168,0                     | -168,0     | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 63,0                     | 915,6  | 42,9       | 812,7  | -121,6 |
| -21,0           | 608,4      | 265,9 | 342,5       | 74,4           | -246,1                     | -275,3     | -29,2       | -133,7         | -58,1             | 16,3                     | 1133,8 | 19,8       | 985,2  | 268,9  |
| -21,0           | 608,4      | 265,9 | 342,5       | 118,7          | -246,1                     | -275,3     | -29,2       | -83,8          | -36,4             | 82,3                     | 1133,8 | 19,8       | 985,2  | 268,9  |
| -26,0           | 698,4      | 286,2 | 412,2       | 142,8          | -286,2                     | -365,3     | -79,1       | -227,3         | -98,8             | 44,0                     | 1449,5 | 0,0        | 1034,7 | 634,1  |
| -26,0           | 698,4      | 286,2 | 412,2       | 89,5           | -286,2                     | -365,3     | -79,1       | -362,5         | -157,6            | -68,1                    | 1449,5 | 0,0        | 1034,7 | 634,1  |
| -31,5           | 819,4      | 341,2 | 478,2       | 103,9          | -341,2                     | -486,3     | -145,1      | -665,1         | -289,2            | -185,3                   | 752,7  | 0,0        | 1034,7 | -62,6  |

Nota : on a considéré que la pression d'eau dans la couche de limon évolue linéairement entre les conditions fixées à ses limites supérieures et inférieures, respectivement par les sables et par les graves

Le coefficient FB est pris égal à 2,3 dans le tableau ci-dessus.

Les efforts d'ancrage mesurés dans les tirants sont donnés Tableau 6 (intensité des efforts d'ancrage de la paroi) et Figure 3 (distribution des efforts dans les tirants).

- 25) Expliquez la forme prise par la distribution de la tension d'ancrage le long des tirants. On expliquera notamment pourquoi la tension est relativement constante sur une partie de la longueur des tirants, puis décroît sur la longueur restante.

*Les tirants ne mobilisent pas de frottement dans la partie du terrain qui est en état d'équilibre limite de poussée, derrière la paroi. Cette partie du terrain a tendance à se décompresser et à « suivre la paroi » dans son déplacement horizontal. Loin de la paroi, le sol reste plus confiné et connaît un déplacement horizontal moindre ; les tirants mobilisent en conséquence un frottement.*

- 26) Expliquez la forme prise par la distribution des efforts de flexion le long des tirants. On expliquera notamment pourquoi la flexion apparaît en extrémité des ancrages. Que préconisez vous pour limiter ces efforts parasites.

*Le sol situé entre la paroi et le rideau d'ancrage présente une rigidité relativement plus faible que la paroi. Lors du remblaiement et lors du déplacement horizontal de la paroi, il a tendance à tasser et impose un déplacement vertical au tirant. Ce déplacement prend une valeur moindre au droit de l'accrochage avec le rideau de palplanches et une valeur nulle au droit de l'accrochage avec la paroi.*

- 27) En considérant les efforts d'ancrage donnés sur le Tableau 6 et le calcul de butée établi à la question 24), justifiez de l'équilibre de l'ouvrage dans la situation de marée basse.

*Le calcul de l'effort tranchant donné dans le tableau ci-dessus donne dans les colonnes « T » le cumul d'efforts calculés depuis le haut de la paroi. Le cumul des pressions d'eau et de sol, ainsi que des réactions d'appui et de la butée mobilisée à moins de 50 % (coefficient FB égal à 2,3) montre que les appuis ainsi constitués sont surabondants (un résidu d'effort d'appui est constaté en pied) et donc que la butée reste mobilisée à moins de 50%.*

La courbe des déplacements mesurés de l'ouvrage est donnée sur la Figure 4.

- 28)** Quel type d'appui la paroi mobilise-t-elle en fiche. On commentera les hypothèses respectives d'un appui simple et d'un encastrement.

*La courbe des déplacements de la paroi ne met pas en évidence de flexion importante de la paroi dans sa partie en fiche. Les moments sont faibles dans cette partie en fiche ce qui témoigne du fait que la butée est mobilisée assez fortement en partie supérieure de la fiche, sans toutefois qu'un encastrement dans la partie basse ne soit mobilisé.*

- 29)** En faisant des hypothèses simples, calculez un ordre de grandeur du moment fléchissant maximal mobilisé dans la paroi.

*Les pentes moyennes  $y'$  des parties à peu près droites de la paroi sont de l'ordre 2,35cm/20m dans la partie supérieure et de -3,35 cm/24 m dans la partie inférieure. La variation de  $y'$  entre -10 et -16 CM vaut est donc de l'ordre 2,6mm/m, ce qui donne une valeur moyenne de  $y''$ , entre -10 et -16 CM égale à  $4,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ .*

*L'inertie de la paroi, d'épaisseur 1,2 m vaut  $I = 0,14 \text{ m}^4$ . Le module du béton vaut de l'ordre de 22 000 Mpa, pour un B28 dont le module est réduit pour tenir compte des effets de long terme.*

*Il en ressort que le moment fléchissant « moyen » entre -10 et -16 CM est de l'ordre de 1500 kN.m*

On s'intéresse maintenant au comportement de la paroi à marée haute (+7,90 CM). Le profil des pressions d'eau qui s'applique sur chacune des faces de la paroi, à marée haute, a été calculé à la question 22).

- 30)** Quel est l'état d'équilibre du terrain derrière la paroi ? Discutez de l'emploi de la méthode du coefficient de réaction pour évaluer la poussée appliquée par le sol à la paroi. En vous appuyant sur la formule de Ménard (Equation 2 en annexe), évaluez le coefficient de réaction du sol soutenu et déduisez en le diagramme des poussées appliquées par le terrain au sol.

*La paroi se déplace d'environ 1 cm vers les terre-pleins lorsque la marée remonte. Les terrains soutenus sont donc re-comprimés et se trouvent dans un état intermédiaire entre l'état d'équilibre limite de poussée et l'état au repos. La méthode du coefficient de réaction permet d'évaluer l'incrément de pression en relation avec le déplacement de la paroi :*

$$Ds'h = Kh y$$

*Le coefficient  $Kh$  est évalué suivant la formule donnée en annexe, en considérant  $a = 40 \text{ m}$  ( $c$ 'est l'ensemble de la paroi qui recule et donc le massif de sol se trouve comprimé sur toute sa hauteur) et  $\alpha = 1/3$  (sols majoritairement sableux).  $E_m = 22 \text{ Mpa}$  conduit à  $kh = 3000 \text{ kN/m}^3$ . Un déplacement de 1 cm de la paroi conduit donc à un incrément de pression dans le sol soutenu égal à 30 kPa, d'un ordre de grandeur voisin à l'incrément de pression causé côté bassin par la remontée de la marée.*

*Le tableau donné ci-dessous donne les pressions calculées en conséquence de part et d'autre de la paroi.*

Tableau d'équilibre de l'écran (marée haute)

| Terrain soutenu (à l'état de poussée) |            |       |             |                | Bassin et terrain en butée |            |             |                |                   |                   | Résultantes sur la paroi |                         |        |            |                |        |
|---------------------------------------|------------|-------|-------------|----------------|----------------------------|------------|-------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------|--------|------------|----------------|--------|
| Z                                     | $\sigma_v$ | u     | $\sigma'_v$ | $\sigma'_{ha}$ | U                          | $\sigma_v$ | $\sigma'_v$ | $\sigma'_{hp}$ | $\sigma'_{hp}/FB$ | $\Delta\sigma'_h$ | K <sub>hy</sub>          | $\Delta\sigma'_h + k_y$ | T      | $\Delta u$ | T <sub>u</sub> | T      |
| (CM, m)                               | (kPa)      | (kPa) | (kPa)       | (kPa)          | (kPa)                      | (kPa)      | (kPa)       | (kPa)          | (kPa)             | (kPa)             | (kPa)                    | (kPa)                   | (kN)   | (kPa)      | (kN)           | (kN)   |
| 10,2                                  | 0,0        |       | 0,0         | 0,0            | 0,0                        | 0,0        | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 0,0               | 30,0                     | 30,0                    |        | 0,0        |                | 0,0    |
| 7,9                                   | 44,9       | 0,0   | 44,9        | 9,7            | 0,0                        | 0,0        | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 9,7               | 30,0                     | 39,7                    | 80,2   | 0,0        | 0,0            | 80,2   |
| 5,6                                   | 89,9       | 0,0   | 89,9        | 19,5           | -23,1                      | -23,1      | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 19,5              | 30,0                     | 49,5                    | 183,3  | -23,1      | -26,7          | 156,6  |
| 3,0                                   | 140,4      | 25,9  | 114,5       | 24,9           | -49,0                      | -49,0      | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 24,9              | 30,0                     | 54,9                    | 318,5  | -23,1      | -86,5          | 232,0  |
| 3,0                                   | 140,4      | 25,9  | 114,5       | 24,9           | -49,0                      | -49,0      | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 24,9              | 30,0                     | 54,9                    | 318,5  | -23,1      | -86,5          | -288,0 |
| -7,5                                  | 345,2      | 130,9 | 214,3       | 46,5           | -154,0                     | -154,0     | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 46,5              | 30,0                     | 76,5                    | 1008,4 | -23,1      | -329,1         | 159,3  |
| -7,5                                  | 345,2      | 130,9 | 214,3       | 46,5           | -154,0                     | -154,0     | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 46,5              | 30,0                     | 76,5                    | 1008,4 | -23,1      | -329,1         | -640,7 |
| -15,5                                 | 501,2      | 210,9 | 290,3       | 63,0           | -234,0                     | -234,0     | 0,0         | 0,0            | 0,0               | 63,0              | 30,0                     | 93,0                    | 1686,6 | -23,1      | -513,9         | -147,2 |
| -21,0                                 | 608,4      | 265,9 | 342,5       | 74,4           | -265,9                     | -341,3     | -75,4       | -345,5         | -98,7             | -24,3             | 30,0                     | 5,7                     | 1958,1 | 0,0        | -577,4         | 60,7   |
| -21,0                                 | 608,4      | 265,9 | 342,5       | 118,7          | -265,9                     | -341,3     | -75,4       | -216,6         | -61,9             | 56,8              | 30,0                     | 86,8                    | 1958,1 | 0,0        | -577,4         | 60,7   |
| -26,0                                 | 698,4      | 325,8 | 372,6       | 129,1          | -325,8                     | -431,3     | -105,5      | -303,2         | -86,6             | 42,5              | 30,0                     | 72,5                    | 2356,4 | 0,0        | -577,4         | 459,0  |
| -26,0                                 | 698,4      | 325,8 | 372,6       | 80,9           | -325,8                     | -431,3     | -105,5      | -483,5         | -138,1            | -57,2             | 30,0                     | -27,2                   | 2356,4 | 0,0        | -577,4         | 459,0  |
| -31,5                                 | 819,4      | 380,8 | 438,6       | 95,3           | -380,8                     | -552,3     | -171,5      | -786,1         | -224,6            | -129,3            | 30,0                     | -99,3                   | 2008,3 | 0,0        | -577,4         | 110,9  |

Nota : le coefficient FB a été pris égal à 3,5 dans la calcul

- 31) En considérant les efforts d'ancrage donnés sur le Tableau 6 et le calcul de butée établi à la question 24), justifiez de l'équilibre de l'ouvrage dans la situation de marée haute.

Le calcul de l'effort tranchant donné dans le tableau ci-dessus donne dans les colonnes « T » le cumul d'efforts calculés depuis le haut de la paroi. Le cumul des pressions d'eau et de sol, ainsi que des réactions d'appui et de la butée mobilisée à moins de 50 % (coefficient FB égal à 3,5) montre que les appuis ainsi constitués sont surabondants (un résidu d'effort d'appui est constaté en pied) et donc que la butée reste mobilisée très en dessous de 50%.

## ANNEXE 1 – FORMULAIRE

$$E_M = 2(1 + \nu)[V_s + (V_1 + V_2)/2](p_2 - p_1)/(V_2 - V_1) \quad \text{Équation 1}$$

- $\nu$  : coefficient de Poisson pris conventionnellement égal à 0,33
- $V_s$  : volume de la cellule centrale de mesure de la sonde ;  $V_s = 540 \text{ cm}^3$
- $p_2, V_2$ , pression et volume correspondant à l'extrémité de la plage pseudoélastique
- $p_1, V_1$ , pression et volume correspondant à l'origine de la plage pseudoélastique

$$k_h = \frac{E_M}{\frac{aa}{2} + 0,133(9a)^a} \quad \text{Équation 2}$$

- $a$  : coefficient rhéologique, pris égal à 0,33 dans les sables
- $E_M$  : module pressiométrique de Ménard
- $a$  : dimension caractéristique de la structure en interaction avec le sol (dimension de la zone de contact de la structure avec le sol).
-

## ANNEXE 2 - TABLEAUX DE DONNEES

Tableau 1- Nature et état des alluvions récentes.

| Cote<br>CM<br>(m) | Nature géologique   | Granulométrie (proportion, en<br>masse, passant la maille) |        |            |             | w    | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | w <sub>P</sub> | w <sub>L</sub> |
|-------------------|---------------------|------------------------------------------------------------|--------|------------|-------------|------|----------------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|
|                   |                     | 2 mm                                                       | 0,2 mm | 0,02<br>mm | 0,002<br>mm |      |                                  |                                    |                |                |
| 1,8               | Sable fin           |                                                            |        |            |             | 17,4 | 20                               | 17                                 |                |                |
| 0,5               | Sable fin           |                                                            |        |            |             | 23,4 | 19,5                             | 15,8                               |                |                |
| -0,13             | Limon argileux      | 100                                                        | 100    | 70         | 23          | 63   | 16,5                             | 10,3                               |                |                |
| -0,5              | Limon argileux      | 100                                                        | 98     | 43         | 10          | 57,6 | 17,2                             | 10,9                               | 40             | 75             |
| -1,65             | Sable fin, limoneux | 100                                                        | 90     | 23         | 13          |      |                                  |                                    |                |                |
| -2,55             | Sable fin           | 100                                                        | 78     | 2          | 0           | 21   |                                  | 16,1                               |                |                |
| -3,28             | Sable fin           | 100                                                        | 82     | 2          | 0           | 20,8 |                                  | 16,9                               |                |                |
| -3,53             | Sable fin, limoneux | 100                                                        | 92     | 7          | 0           | 31   | 18,7                             | 14,3                               |                |                |
| -6,68             | Sable fin           | 100                                                        | 99     | 3          | 1           | 29,5 |                                  | 16                                 |                |                |
| -7,65             | Sable fin, limoneux | 100                                                        | 91     | 10         | 0           | 22,8 | 19                               | 15,5                               |                |                |
| -10,13            | Sable fin           | 100                                                        | 90     | 3          | 0           | 32   | 18,7                             | 14,1                               |                |                |
| -13,125           | Sable grossier      | 100                                                        | 35     | 0          | 0           |      |                                  |                                    |                |                |
| -13,48            | Sable grossier      | 100                                                        | 25     | 0          | 0           |      |                                  |                                    |                |                |
| -13,98            | Sable fin           | 100                                                        | 97     | 5          | 0           | 29,7 | 19,7                             | 15,2                               |                |                |
| -16,53            | Sable fin           | 100                                                        | 76     | 0          | 0           |      |                                  |                                    |                |                |
| -17,3             | Sable fin           | 100                                                        | 88     | 0          | 0           |      |                                  |                                    |                |                |
| -19,3             | Sable fin           | 100                                                        | 95     | 0          | 0           |      |                                  |                                    |                |                |
| -21,24            | Limon argileux      | 100                                                        | 99     | 79         | 32          | 45,5 | 17,9                             | 12,3                               | 21             | 65             |
| -22,405           | Sable fin, limoneux | 100                                                        | 100    | 32         | 8           | 37,4 | 17,8                             | 13                                 | 33             | 54             |
| -23               | Limon argileux      | 100                                                        | 100    | 85         | 40          | 47   |                                  |                                    |                |                |
| -24,225           | Limon argileux      | 100                                                        | 100    | 65         | 30          | 42   | 18,9                             | 13,3                               |                | 66             |
| -25,08            | Sable limoneux      | 100                                                        | 98     | 39         | 5           | 40,9 | 17,4                             | 12,4                               | 41             | 74             |

Tableau 2 – Résistance au cisaillement des alluvions : résultat des essais triaxiaux (consolidés drainés).

| Cote CM (m) | Nature géologique       | s'    | t     |
|-------------|-------------------------|-------|-------|
| 0,5         | Sable fin               | 78,5  | 48,5  |
| 0,5         | Sable fin               | 155,5 | 103,5 |
| 0,5         | Sable fin               | 252   | 151   |
| -0,225      | Silt vaseux             | 227,5 | 127,5 |
| -0,225      | Silt vaseux             | 470   | 270   |
| -0,225      | Silt vaseux             | 890   | 490   |
| -1,1        | Silt vaseux             | 217,5 | 117,5 |
| -1,1        | Silt vaseux             | 485   | 285   |
| -1,1        | Silt vaseux             | 920   | 520   |
| -1,4        | Silt vaseux             | 260   | 160   |
| -1,4        | Silt vaseux             | 487,5 | 287,5 |
| -1,8        | Silt vaseux             | 852,5 | 452,5 |
| -1,8        | Silt vaseux             | 250   | 150   |
| -1,8        | Silt vaseux             | 452,5 | 252,5 |
| -1,8        | Silt vaseux             | 827,5 | 427,5 |
| -7,005      | Sable mal gradué        | 220   | 120   |
| -7,005      | Sable mal gradué        | 555   | 355   |
| -7,005      | Sable mal gradué        | 855   | 555   |
| -13,98      | Sable limoneux          | 485   | 335   |
| -13,98      | Sable limoneux          | 1110  | 760   |
| -13,98      | Sable limoneux          | 1780  | 1230  |
| -17,13      | Sable mal gradué        | 1925  | 1425  |
| -17,13      | Sable mal gradué        | 1150  | 800   |
| -17,13      | Sable mal gradué        | 675   | 475   |
| -21,24      | Limon tourbeux          | 246   | 127   |
| -21,24      | Limon tourbeux          | 343   | 142   |
| -21,24      | Limon tourbeux          | 338   | 172   |
| -22         | Limon sableux           | 357   | 127   |
| -22         | Limon sableux           | 410   | 131   |
| -22         | Limon sableux           | 305   | 185   |
| -22         | Limon sableux           | 324   | 198   |
| -22         | Limon sableux           | 324   | 200   |
| -22         | Limon sableux           | 403   | 214   |
| -22,28      | Limon sableux organique | 700   | 400   |
| -22,28      | Limon sableux organique | 790   | 440   |
| -22,28      | Limon sableux organique | 874   | 474   |
| -23,18      | Sable limoneux          | 765   | 465   |
| -23,18      | Sable limoneux          | 966   | 616   |
| -23,18      | Sable limoneux          | 993   | 593   |

Tableau 3 – Modèle géotechnique du site.

| Nature des terrains       | Cotes CM         | $\gamma$          | $\phi'$ ( $\phi_u$ ) | $c'$ ( $c_u$ ) | $q_c$ | $p_L-p_0$ | $E_M$ |
|---------------------------|------------------|-------------------|----------------------|----------------|-------|-----------|-------|
|                           | m                | kN/m <sup>3</sup> | degré                | kPa            | MPa   | MPa       | MPa   |
| remblais nouveaux         | +10,2 à -7,5     | 19,5              | 35                   | 0              | 8     | -         | (15)  |
| remblais hydrauliques     | TN (+9,5) à +0,0 | 18,0              | 33                   | 0              | 10    | 0,7       | 7     |
| dépôts organiques récents | +0,0 à -2,0      | 16,0              | 20 (0)               | 0 (2 à 15)     | 1     | -         | (10)  |
| sables                    | -2,0 à -21       | 19,5              | 37                   | 0              | 15    | 2         | 20    |
| limons inférieurs         | -21 à -26        | 18,0              | 29 (0)               | 0 (100)        | -     | 1,5       | 22    |
| graves de fond            | -26 à -31,5      | 22,0              | 40                   | 0              | -     | 4,6       | 36    |
| argiles de Villerville    | substratum       | 20,0              | 20 (0)               | 20 (200)       | -     | 1,9       | 22    |

Tableau 4 – Modèle hydrologique du site, avant construction de la paroi.

| Nature des terrains       | Cotes CM         | Surélévation moyenne     | Coefficient d'atténuation                                                   | Déphasage |
|---------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
|                           | m                | m                        | (rapport de l'amplitude de variation de la nappe à l'amplitude de la marée) | (temps)   |
| remblais nouveaux         | +10,2 à -7,5     | 0                        | 0,3                                                                         | 1h        |
| remblais hydrauliques     | TN (+9,5) à +0,0 | Nappe statique à 6,50 CM |                                                                             |           |
| dépôts organiques récents | +0,0 à -2,0      |                          |                                                                             |           |
| sables                    | -2,0 à -21       | 0                        | 0,3                                                                         | 1 h       |
| Limons inférieurs         | -21 à -26        |                          |                                                                             |           |
| graves de fond            | -26 à -31,5      | 0                        | 0,60                                                                        | 30 mn     |
| argiles de Villerville    | substratum       |                          |                                                                             |           |

Tableau 5 – Modèle hydrologique des terrains abrités par la paroi, après construction de la paroi.

| Nature des terrains    | Cotes CM     | Surélévation moyenne     | Coefficient d'atténuation                                                   | Déphasage |
|------------------------|--------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
|                        | m            | m                        | (rapport de l'amplitude de variation de la nappe à l'amplitude de la marée) | (temps)   |
| remblais nouveaux      | +10,2 à -7,5 | Nappe statique à 5,60 CM |                                                                             |           |
| sables                 | -7,50 à -21  | Nappe statique à 5,60 CM |                                                                             |           |
| Limons inférieurs      | -21 à -26    |                          |                                                                             |           |
| graves de fond         | -26 à -31,5  | 0                        | 0,60                                                                        | 30 mn     |
| argiles de Villerville | substratum   |                          |                                                                             |           |

Tableau 6 – Efforts d'ancrage mesurés, donnés par mètre linéaire de paroi.

| Situation               | Tirants de la nappe supérieure (kN/m de paroi) | Tirants de la nappe inférieure (kN/m de paroi) |
|-------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Marée haute (+7,90 CM)  | 520                                            | 800                                            |
| Marée basse (+ 1,30 CM) | 600                                            | 1250                                           |

## ANNEXE 2 – GRAPHIQUES

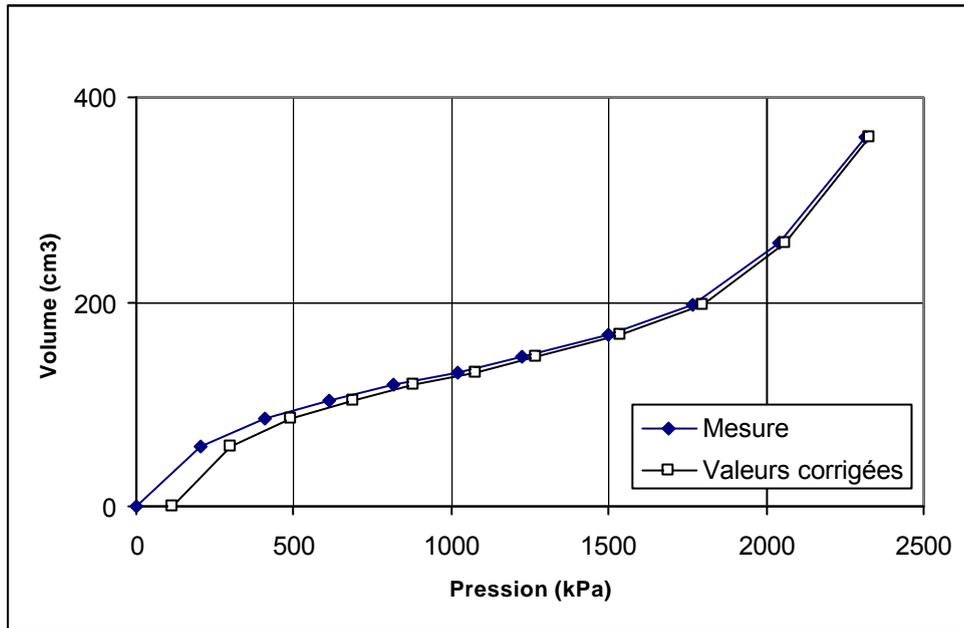


Figure 1 – Résultat d'un essai pressiométrique réalisé à la côte -8,00 CM.

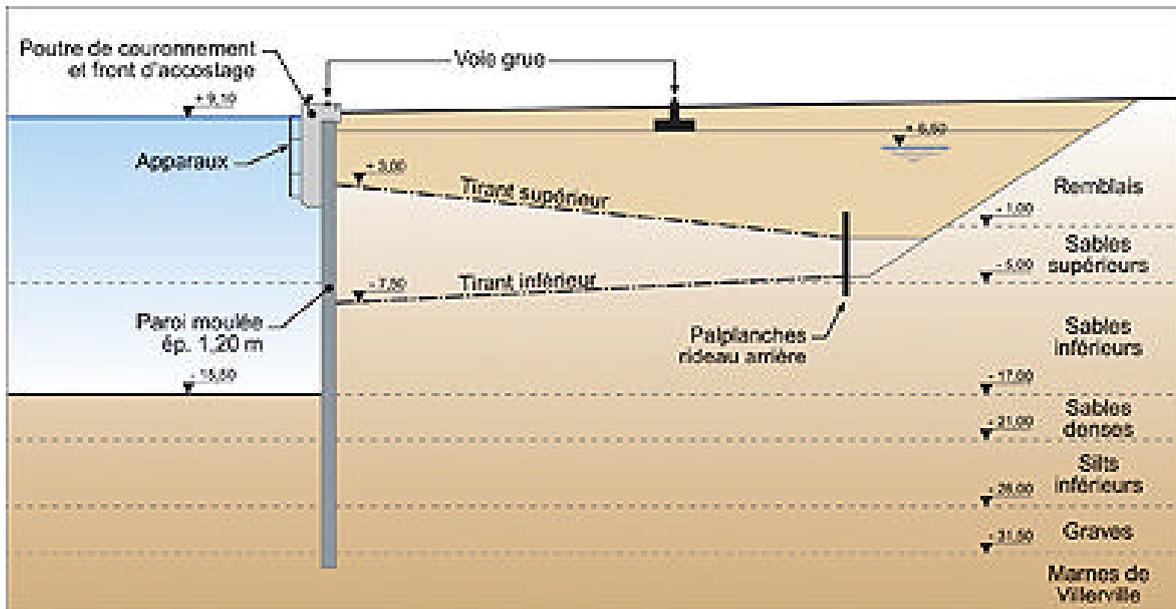
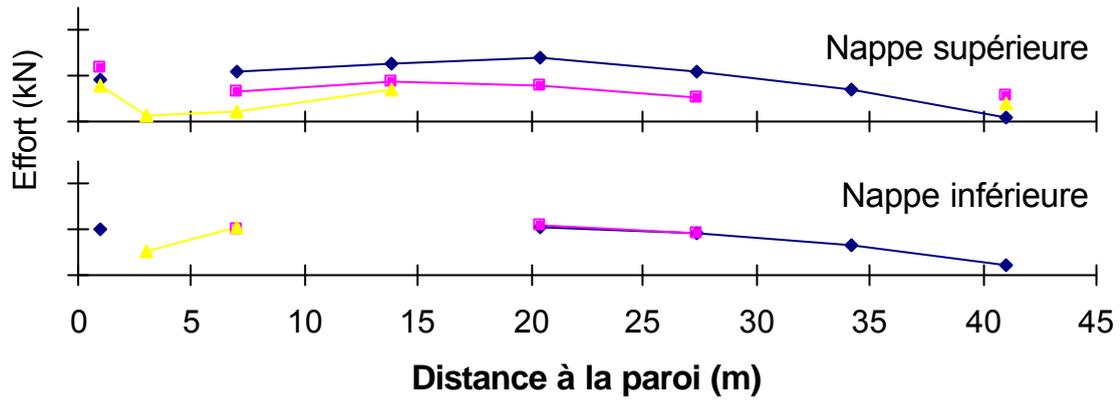
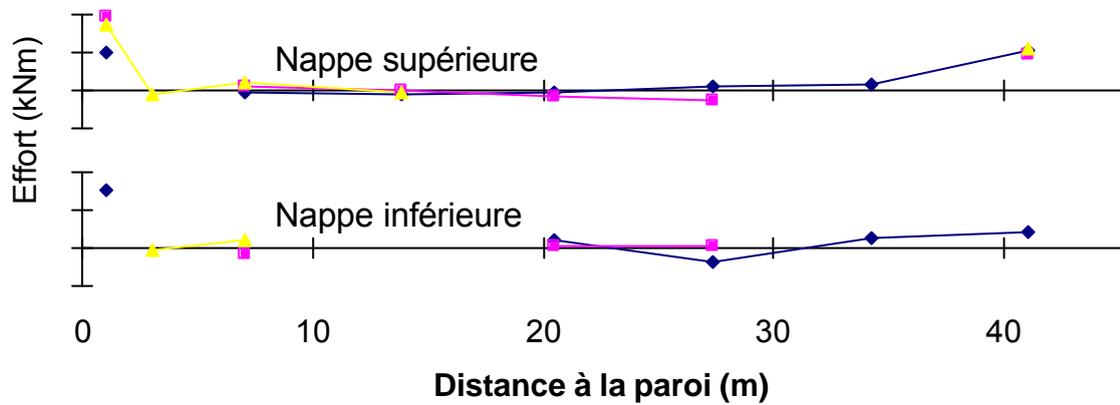


Figure 2 – Coupe type du quai.



a)



—◆— PM 336    —■— PM 248    —▲— PM 246

b)

Figure 3 – Efforts mesurés dans les ancrages a) Tension dans les tirants ; b) Moment fléchissant dans les tirants.

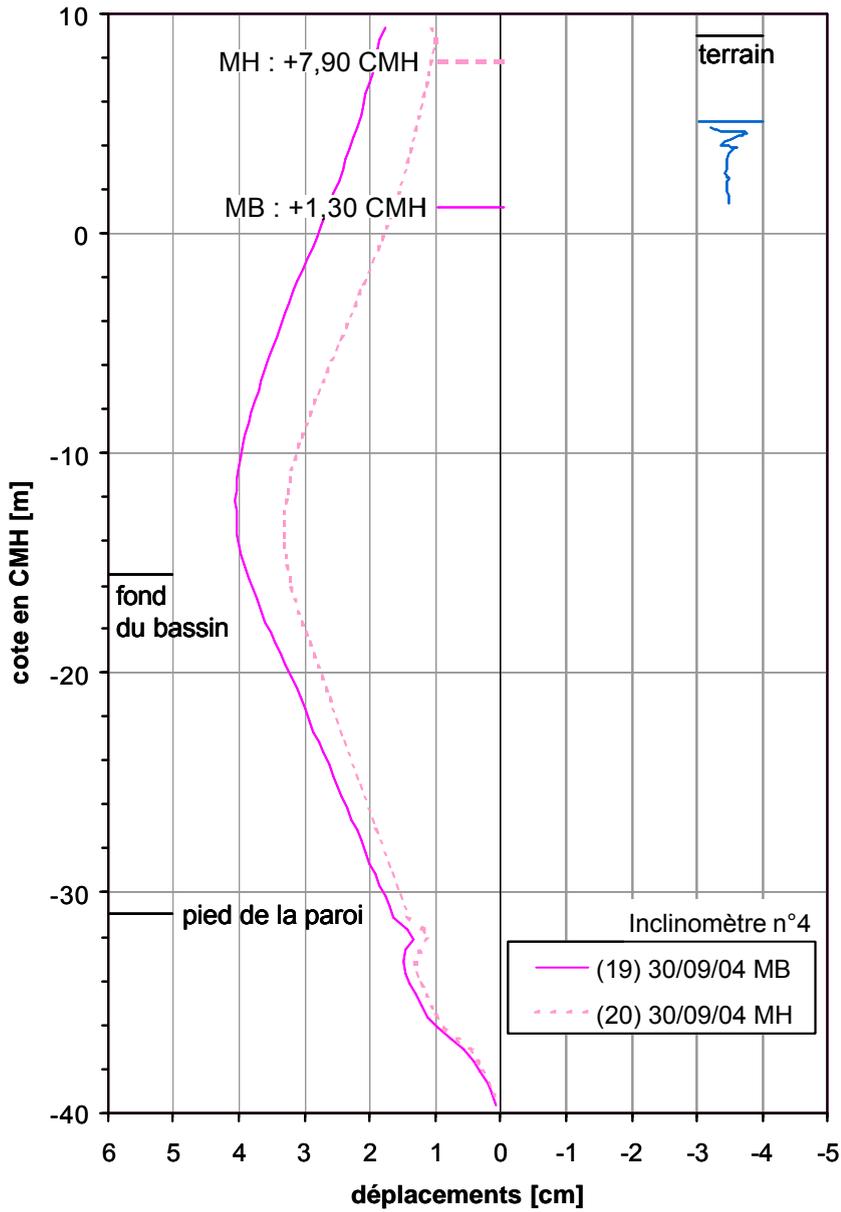
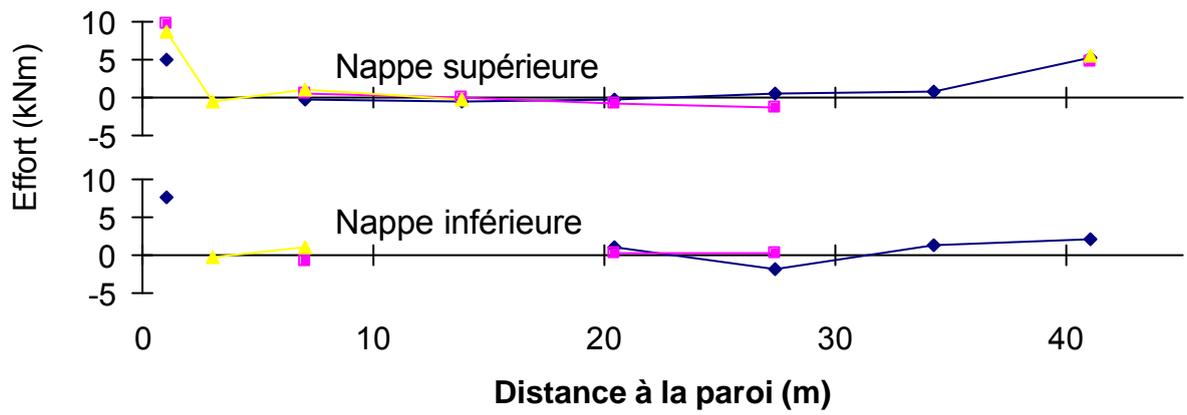
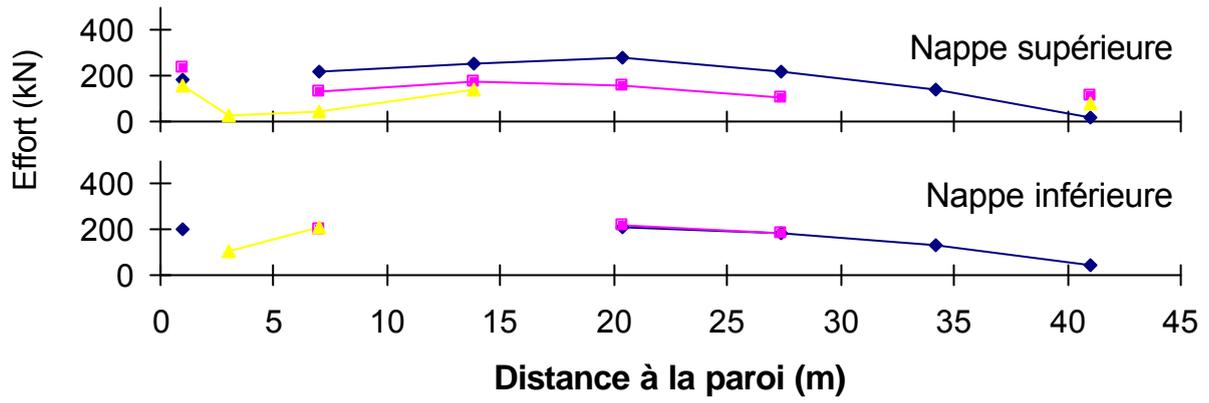


Figure 4 : Déplacement de la paroi mesurés dans la configuration finale, pour les situations de marée basse et de marée haute.



—◆— PM 336    —■— PM 248    —▲— PM 246

## Composition de Géotechnique et Environnement

### Rapport du jury 2009

*Le sujet « option géotechnique-qualité des ambiances » répond aux orientations de l'Agrégation de Génie Civil, telles que définies réglementairement.*

*Les membres du jury proposaient aux candidats une problématique qui permette des développements des fondamentaux de la mécanique des sols en direction de l'identification et la caractérisation des matériaux géotechniques et en direction de l'interaction sol-structures.*

*Sur la base d'un projet de soutènement pour aménagement portuaire, la composition 2009 traitait des aspects relatifs :*

- à la géologie du site,
- à la compréhension des grands mécanismes régissant les massifs de sol dans leur état naturel,
- à la reconnaissance géotechnique et à l'interprétation des données résultantes,
- à l'interaction sol-structure et au dimensionnement de l'ouvrage,
- aux techniques de construction et à la surveillance de l'ouvrage en cours de construction

*Les différentes parties et sous-parties pouvaient être traitées de manière relativement indépendante.*

Le nombre de candidats ayant composé est de 54. Notés sur 10 points, les candidats ont obtenu des notes comprises entre 0 et 08, la note moyenne s'élevant à 3,5. Trois candidats ont rendu une copie blanche.

**D'une façon générale**, il est utile de rappeler :

- l'importance de rédiger en évitant les fautes d'orthographe et de grammaire,
- le soin à apporter à la présentation des copies.
- l'avantage que trouveront les candidats à procéder à une lecture attentive du sujet. Il est étonnant d'observer que des questions faciles ne sont pas traitées par le plus grand nombre et que des questions accompagnées d'éléments permettant leur résolution aisée ne sont pas traitées.

Le sujet était organisé en deux grandes parties : **géologie et propriétés géotechniques** (17 questions), **analyse et comportement observé** (14 questions).

La partie **géologie et propriétés géotechniques** des matériaux du site est celle sur laquelle les candidats ont porté l'essentiel de leurs efforts :

- 51 candidats ont composé partiellement cette partie,
- La majorité des points attribués par les correcteurs ont été acquis sur cette partie.

Les questions traitant de la ***géologie générale du site*** été traitées de façon fragmentaire :

- Les grandes ères géologiques ne sont pas maîtrisées, la datation même approximative reste inconnue de la grande majorité,
- Les phénomènes de glaciations sont largement cités,
- Les phénomènes de régression et transgression liés au niveau des mers sont explicités,
- L'interprétation lithologique est peu réalisée.

Les questions sur ***la nature et état des matériaux du site*** (caractérisation physique) sont majoritairement traitées pour les candidats ayant composé 51 candidats ont traités cette partie :

- la séparation dans la classification est globalement correcte ; des éléments donnés dans l'énoncé permettaient de répondre aisément,
- les notions de poids volumiques, d'indice des vides et de degrés de saturation sont maîtrisés,
- le diagramme de Casagrande est partiellement connu.

La partie ***hydrologie du site*** est très partiellement traitée (12 candidats). Le lien entre granulométrie, porosité et perméabilité des matériaux est signalé. Les ordres de grandeurs de la perméabilité qui étaient demandés pour les matériaux sableux et argileux sont peu traités.

La partie ***propriétés mécaniques des matériaux*** est assez bien traitée par un nombre important de candidat.

- le principe de l'essai triaxial est correctement décrit par les candidats ayant traités la question. Le changement de repère demandé dans la question précédente pour l'exploitation du critère de Coulomb pour la représentation des contraintes a conduit nombre de candidats à renoncer à exploiter les résultats des essais,
- la description de l'essai pressiométrique est traitée correctement par ceux ayant répondu (28 candidats). Les valeurs du module pressiomérique et de la pression limite sont déterminés assez correctement pour les candidats traitant la question (30 candidats).
- Quelques candidats ont estimé la valeur du module d'Young ; 4 candidats ont cité l'utilisation pour les modélisations numériques.

La partie ouvrage, ***analyse du comportement observé*** comportait 14 questions ayant trait à la paroi moulée, le système d'ancrage, et le contrôle de comportement en service.

Cette partie du problème est traité principalement sur la partie ***principe de l'ouvrage et de sa réalisation*** (31 candidats) : le principe de réalisation de la paroi est largement présenté. Toutefois des descriptions trop sommaires sont faites de la technique ; les candidats maîtrisent peu l'aspect « réalisation opérationnelle » des ouvrages.

Les : ***principes d'instrumentation***, ne sont pas maîtrisés. 18 candidats ont abordés la question ; seuls 3 ont donnés des éléments satisfaisants.

Les : ***états des contraintes avant travaux*** sont très peu abordés (9 candidats). Ils ne sont pas maîtrisés.

Le ***comportement de l'ouvrage*** (9 questions), est abordé par 11 candidats. Les éléments de réponse sont très faibles. Cette partie demandait réflexion mais pouvait apporter des points.

Les membres du jury regrettent que les candidats n'aient pas pu consacrer du temps à cette partie.

Finalement, on observe que les candidats qui ont réussi l'épreuve

- disposaient des connaissances dans les différentes sous-parties qui constituent des fondamentaux de la géotechnique et ont composé sur l'ensemble la première partie ;
- ont traité de façon opportune de sous-parties de la deuxième partie jugées les plus accessibles : techniques de réalisation, instrumentation, en particulier.

Les correcteurs regrettent :

- que les questions liées à l'analyse et au comportement de l'ouvrage n'aient pas été davantage traitées. C'était déjà le cas l'année précédente. Ces questions d'instrumentation des ouvrages constituent en effet un point de passage obligé en géotechnique, et se présentent de façon relativement générique.
- que l'application des théories (élasticité et plasticité, états limites, poussée-butée) n'aient pas permis à davantage de candidats de traiter de la partie consacrée au calcul du comportement de la paroi.

# AGRÉGATION DE GÉNIE CIVIL

## Épreuve « Qualité des ambiances »

Session 2009

### Partie « Acoustique »

#### *Acoustique du bâtiment et environnementale*

#### Mesure de l'absorption acoustique d'un matériau

##### Problème n°1 : Mesure en chambre réverbérante

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

- (a) L'hypothèse principale de la théorie utilisée pour obtenir cette équation (théorie de la réverbération, théorie de Sabine) repose sur la notion de champ diffus, qui stipule que :
- Que le champ sonore est homogène dans toute la salle : autrement dit les niveaux sonores et temps de réverbération sont uniformes dans la salle ;
  - L'intensité sonore (i.e. le flux d'énergie) est nulle.
- (b) Signification des termes de l'équation (1) :

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

- Premier terme (terme de gauche de l'équation): puissance injectée dans la salle (terme source) ;
  - Second terme (premier terme du membre de droite de l'équation): Distribution de la puissance dans la salle au cours du temps ;
  - Troisième terme : puissance absorbée par les parois absorbantes ;
  - Quatrième terme : puissance absorbée par l'air (absorption atmosphérique).
- (c) Définition du terme  $A_1$  : aire d'absorption équivalente  $A_1 = \alpha S$ , produit de la surface par l'absorption acoustique correspondante (théorie de Sabine).

##### 2 – Réverbération dans la salle.

- (a) Résolution de l'équation (1) en régime variable après extinction de la source :

$$P(t) = 0 = V \frac{\partial w}{\partial t} + c \frac{A_1}{4} w + m c V w,$$

$$V \frac{\partial w}{\partial t} = \left( -c \frac{A_1}{4} - m c V \right) w,$$

$$w(t) = \mathbf{A} \exp \left[ \left( -c \frac{A_1}{4V} - m c \right) t \right]$$

(b) Définition de la durée de réverbération (noté  $T_1$ ) : temps mis par l'énergie sonore pour décroissance de 60 dB.

(c) Expression de la durée de réverbération  $T_1$  en fonction de  $V$ ,  $c$ ,  $A_1$  et  $m$  :

$$w_0 = w(t=0) = \mathbf{A}$$

$$w_1 = w(t=T_1) = \mathbf{A} \exp \left[ \left( -c \frac{A_1}{4V} - m c \right) T_1 \right]$$

$$10 \log \left( \frac{w_1}{w_0} \right) = 60 = \frac{10}{\ln(10)} \left( -c \frac{A_1}{4V} - m c \right)$$

$$T_1 = \frac{24 \ln(10)}{c} \frac{V}{A_1 + 4mV} = \frac{55.3}{c} \frac{V}{A_1 + 4mV}$$

(d) Expression de  $A_1$  :

$$T_1 \frac{c}{55.3V} = \frac{1}{A_1 + 4mV}$$

$$\frac{55.3V}{c T_1} = A_1 + 4mV$$

$$A_1 = \frac{55.3V}{c T_1} - 4mV \quad (2)$$

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

(a) En ajoutant un matériau absorbant dans la salle réverbérante, on augmente l'aire d'absorption équivalente, ce qui a pour effet de diminuer le temps de réverbération. ;

(b) Expression du paramètre  $A_2$  de la salle en présence de l'échantillon, en fonction de la nouvelle durée de réverbération  $T_2$  (en considérant que les conditions expérimentales soient inchangées) :

$$A_2 = \frac{55.3V}{c T_2} - 4mV \quad (3)$$

(c) Expression du paramètre  $A_m$  du matériau :

$$A_2 = \mathbf{a}_m S_m + \mathbf{a}(S - S_m) \approx \mathbf{a}_m S_m + \mathbf{a}S = A_m + A_1$$

$$A_m = A_2 - A_1$$

(d) En déduire que le coefficient d'absorption  $\mathbf{a}_m$  du matériau s'obtient par la relation ( $c=340\text{m/s}$ ) :

$$\mathbf{a}_m S_m = \frac{55.3V}{c T_2} - 4mV - \frac{55.3V}{c T_1} - 4mV = \frac{55.3V}{c} \left[ \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right] = 0.163V \left[ \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right]$$

$$\mathbf{a}_m = 0.163 \frac{V}{S_m} \left[ \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right] \quad (4)$$

#### 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 m<sup>2</sup>, en utilisant une salle réverbérante d'un volume de 215.6 m<sup>3</sup> et de surface 224.9 m<sup>2</sup>. On mesure les durées moyennes de réverbération avec et sans l'échantillon (tableau 1).

(a) Tableau 1 ;

| Bande d'octave | $T_1$ (s) | $T_2$ (s) | A (m <sup>2</sup> ) | $\mathbf{a}_m$ |
|----------------|-----------|-----------|---------------------|----------------|
| 125 Hz         | 21.38     | 7.01      | 3.37                | 0.28           |
| 250 Hz         | 19.78     | 3.7       | 7.72                | 0.64           |
| 500 Hz         | 15.04     | 2.39      | 12.37               | 1.02           |
| 1000 Hz        | 11.10     | 2.12      | 13.41               | 1.12           |
| 2000 Hz        | 5.89      | 1.79      | 13.67               | 1.14           |

- (b) En théorie, le coefficient d'absorption ne devrait pas dépasser 1 (unité), puisqu'il ne peut pas y avoir plus d'énergie absorbée que d'énergie incidente sur le matériau. En pratique, du fait de l'approximation précédente (3(c)), du fait de l'hypothèse théorique (champ diffus) qui n'est pas réellement applicable, du fait des incertitudes expérimentales (épaisseur et forme du matériau, incertitudes sur la mesure)... il n'est pas rare de mesurer des coefficients d'absorption légèrement supérieurs à l'unité. Toutefois, si la valeur mesurée est « trop » supérieur à l'unité, il convient quand même de s'interroger !
- (c) Une salle réverbérante présente généralement des dispositifs acoustiques spécifiques (diffuseur, réflecteur) et une forme « irrégulière ». Ceci a pour effet de favoriser la diffusion du champ sonore dans la salle (diffuseur, réflecteur) et de minimiser les effets de mode (forme irrégulière de la salle) notamment en basse fréquence. Globalement, ces dispositifs tendent à se rapprocher de l'hypothèse de champ diffus.
- (d) Principales différences entre la mesure du coefficient d'absorption en salle réverbérante et la mesure avec un tube d'impédance :
- a. Mesure en salle réverbérante :
    - i. La notion de champ diffus implique l'estimation d'un coefficient d'absorption en incidence aléatoire (l'énergie arrive dans toutes les directions) ;
    - ii. Compte tenu de la taille de la salle, on peut mesurer le coefficient d'absorption de grands échantillons, ce qui permet par ailleurs d'avoir une estimation de l'absorption en basse fréquence ;
  - b. Mesure en tube d'impédance :
    - i. Compte tenu de la géométrie de mesure, le coefficient d'absorption mesuré traduit une absorption en incidence normale ;
    - ii. Le diamètre du tube étant la plupart du temps assez petit, la méthode est limitée en basse fréquence. Pour « descendre » en fréquence, il faut un tube de diamètre plus large. Le calcul du diamètre du tube en fonction de la limite basse fréquence, peut être estimé analytiquement.

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

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

(a) Onde réfléchiée par la paroi (propagation dans le sens des  $x$  négatifs) :

$$p_r(x,t) = R \times p_0 \exp(i[\omega t + kx]),$$

(b) Onde sonore totale :

$$p(x,t) = p_i(x,t) + p_r(x,t)$$

$$p(x,t) = p_0 [\exp(i[\omega t - kx]) + R \exp(i[\omega t + kx])]$$

$$p(x,t) = p_0 [\exp(-ikx) + R \exp(ikx)] \times \exp(i\omega t)$$

$$p(x,t) = p_0 [1 + R \exp(2ikx)] \times \exp(i\omega t) \times \exp(-ikx)$$

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

(a) La vitesse particulière  $v(x,t)$  devant la paroi s'écrit :

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

$$v(x,t) = \frac{k p_0}{\rho_0 \omega} [\exp(-ikx) - R \exp(ikx)] \times \exp(i\omega t)$$

$$v(x,t) = \frac{k p_0}{\rho_0 \omega} [1 - R \exp(2ikx)] \times \exp(i\omega t) \times \exp(-ikx)$$

(b) L'impédance étant définie comme le rapport de la pression acoustique sur la vitesse particulière, elle s'exprime par :

$$Z(x) = \frac{p(x,t)}{v(x,t)}$$

$$Z(x) = \frac{\rho_0 \omega \exp(-ikx) + R \exp(ikx)}{k \exp(-ikx) - R \exp(ikx)}$$

$$Z(x) = \frac{\rho_0 \omega [1 + R \exp(2ikx)]}{k [1 - R \exp(2ikx)]}$$

(c) En  $x=0$ , l'expression précédente donne immédiatement :

$$Z = \frac{\rho_0 \omega}{k} \frac{1+R}{1-R} = \rho_0 c \frac{1+R}{1-R}$$

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

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

$$I(x) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[p v^*], \quad (5)$$

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

(a) L'intensité  $I_i$  de l'onde incidente s'écrit :

$$I_i(x) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[ p_0 \exp(i[\omega t - kx]) \times \frac{k p_0^*}{\rho_0 \omega} \exp(+ikx) \times \exp(-i\omega t) \right]$$

$$I_i(x) = \frac{1}{2} \frac{k |p_0|^2}{\rho_0 \omega} \operatorname{Re} [\exp(i[\omega t - kx]) \exp(+ikx) \times \exp(-i\omega t)]$$

$$I_i(x) = \frac{1}{2} \frac{k |p_0|^2}{\rho_0 \omega} = \frac{1}{2} \frac{|p_0|^2}{\rho_0 c}$$

L'intensité  $I_r$  de l'onde réfléchie s'écrit :

$$I_r(x) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[ R \times p_0 \exp(i[\omega t + kx]) \times (-1) \times R^* \times \frac{k p_0^*}{\rho_0 \omega} \exp(-ikx) \times \exp(-i\omega t) \right]$$

$$I_r(x) = -\frac{|R|^2 k |p_0|^2}{2 \rho_0 \omega} = -\frac{r^2 k |p_0|^2}{2 \rho_0 \omega} = -\frac{r^2 |p_0|^2}{2 \rho_0 c}$$

(b) La puissance absorbée  $I_a = |I_i| - |I_r|$  par la paroi s'écrit alors :

$$I_a(x) = \frac{1}{2} \frac{k |p_0|^2}{\rho_0 \omega} - \frac{r^2 k |p_0|^2}{2 \rho_0 \omega}$$

$$I_a(x) = \frac{1}{2} \frac{|p_0|^2}{\rho_0 c} (1 - r^2)$$

(c) Le coefficient d'absorption  $\mathbf{a}$  de la paroi étant défini comme le rapport de l'intensité absorbée sur l'intensité incidente, on a :

$$\mathbf{a} = \frac{I_a}{I_i} = \frac{\frac{1}{2} \frac{|p_0|^2}{\rho_0 c} (1 - r^2)}{\frac{1}{2} \frac{|p_0|^2}{\rho_0 c}}$$

$$\mathbf{a} = 1 - r^2$$

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

(a) La pression efficace dans le tube a pour expression :

$$p_e^2(x) = \frac{1}{2} p_0 [\exp(-ikx) + R \exp(ikx)] \times \exp(i\omega t) \times p_0^* \times [\exp(ikx) + R^* \exp(-ikx)] \times \exp(-i\omega t)$$

$$p_e^2(x) = \frac{1}{2} |p_0|^2 [1 + |R|^2 + R \exp(2ikx) + R^* \exp(-2ikx)]$$

$$p_e^2(x) = \frac{1}{2} |p_0|^2 [1 + |R|^2 + r \exp(2ikx + i\mathbf{j}) + r \exp(-2ikx - i\mathbf{j})]$$

$$p_e^2(x) = \frac{1}{2} |p_0|^2 [1 + r^2 + r \times \{\exp(2ikx + i\mathbf{j}) + \exp(-2ikx - i\mathbf{j})\}]$$

$$p_e^2(x) = \frac{1}{2} |p_0|^2 [1 + r^2 + 2r \cos(2kx + \mathbf{j})]$$

(b) Suivant la valeur de l'argument du cosinus dans l'expression précédente, la pression efficace passe par une succession de minima et de maxima :

a. Pour les minima :

$$\cos(2kx + \mathbf{j}) = -1 \Rightarrow 2kx + \mathbf{j} = (2n+1)\mathbf{p} \quad n \in \mathbf{N}$$

$$p_{\min}^2(x) = \frac{1}{2} |p_0|^2 [1 + r^2 - 2r] = \frac{1}{2} |p_0|^2 (1-r)^2.$$

$$p_{\min} = \frac{|p_0|}{\sqrt{2}} (1-r)$$

b. Pour les maxima :

$$\cos(2kx + \mathbf{j}) = +1 \Rightarrow 2kx + \mathbf{j} = 2n\mathbf{p} \quad n \in \mathbf{N}$$

$$p_{\max}^2(x) = \frac{1}{2} |p_0|^2 [1 + r^2 + 2r] = \frac{1}{2} |p_0|^2 (1+r)^2.$$

$$p_{\max} = \frac{|p_0|}{\sqrt{2}} (1+r)$$

(c) Le taux d'ondes stationnaires  $s$  est défini comme le rapport de  $p_{\max}$  sur  $p_{\min}$  :

$$s = \frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{1+r}{1-r}$$

(d) En manipulant l'expression précédente, on a :

$$s \times (1-r) = 1+r \Rightarrow 1-s = -r \times (1+s)$$

$$r = \frac{s-1}{s+1}$$

(e) Le coefficient d'absorption  $\mathbf{a}$  de la paroi peut alors s'exprimer en fonction du taux d'ondes stationnaires  $s$  :

$$\mathbf{a} = 1 - r^2 = 1 - \frac{s^2 + 1 - 2s}{s^2 + 1 + 2s} = \frac{s^2 + 1 + 2s - s^2 - 1 + 2s}{s^2 + 1 + 2s}$$

$$\mathbf{a} = \frac{4s}{s^2 + 1 + 2s}$$

# AGRÉGATION DE GÉNIE CIVIL

## Épreuve « Qualité des ambiances »

Session 2009

### 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  $\lambda$  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 ( $x=0$ )

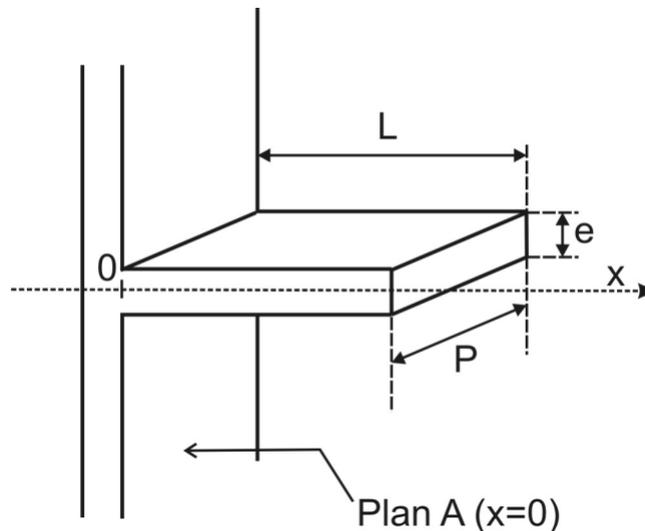


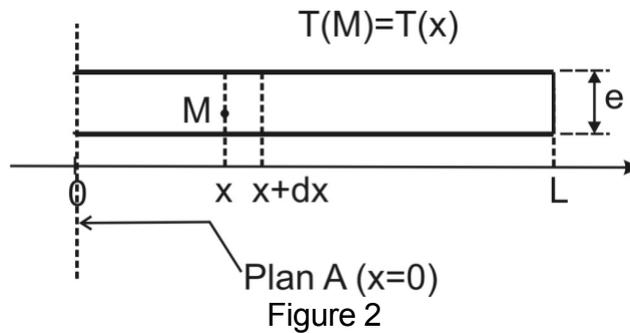
Figure 1 : disposition du balcon

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).



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  $h=5 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ .

**Éléments de réponse**

Dans ce cas, la convection peut être naturelle ou forcée, en fonction de la présence ou non de vent. Elle peut être laminaire ou turbulente. On détermine dans quel cas on se trouve puis on utilise les nombres adimensionnels adéquats ( $Re$ ,  $Gr$ ,  $Pr$ ...) afin de calculer le nombre de Nusselt.  $Nu$  est en général calculé à partir de corrélations empiriques, et permet de déterminer  $h$ .

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  $\lambda$ ,  $e$ ,  $P$ ,  $h$  et la température  $T$ .

**Éléments de réponse**

Flux de conduction entrant dans la section en  $x$  – Flux de conduction sortant de la section en  $x+dx$  = Flux échangé avec l'extérieur par convection

$$\left( -\lambda.S \left( \frac{dT}{dx} \right)_x \right) - \left( -\lambda.S \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x+dx} \right) = h((2P + 2e).dx).(T(x) - T_a)$$

$S$  = section du balcon  $S=P.e$

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

**Éléments de réponse**

$$\left( \lambda.S \frac{d^2T(x)}{dx^2} \right) = h(2P + 2e).(T(x) - T_a)$$

En posant  $\theta(x) = T(x) - T_a$  avec  $T_a = \text{Cste}$

$$\left( \lambda.S. \frac{d^2\theta(x)}{dx^2} \right) = h(2P + 2e).\theta(x)$$

$$\frac{d^2\theta(x)}{dx^2} - \frac{h(2P + 2e)}{\lambda.S}.\theta(x) = 0$$

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

Rappel : une solution générale de l'équation différentielle de la forme

$$\left( \frac{d^2\theta(x)}{dx^2} \right) - m^2.\theta(x) = 0 \text{ peut s'écrire : } \theta(x) = C_1.\cosh(mx) + C_2.\sinh(mx)$$

où C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub> sont 2 constantes. cosh et sinh désignent respectivement le cosinus et le sinus hyperboliques.

Eléments de réponse

Conditions aux limites

i) T(0)=T<sub>0</sub> ⇒ θ(0) = C<sub>1</sub> = T<sub>0</sub> - T<sub>a</sub> = θ<sub>0</sub>

ii) en x=L le flux est nul (condition limite adiabatique) d'où  $\left( \frac{d\theta}{dx} \right)_{x=L} = 0$

$$\frac{d\theta(x)}{dx} = m.\theta_0.\sinh(mx) + m.C_2.\cosh(mx)$$

$$\left( \frac{d\theta(x)}{dx} \right)_{x=L} = m.\theta_0.\sinh(mL) + m.C_2.\cosh(mL) = 0 \text{ avec } m = \sqrt{\frac{2h(P+e)}{\lambda.S}}$$

$$C_2 = -\theta_0 \cdot \frac{\sinh(mL)}{\cosh(mL)}$$

$$\theta(x) = \theta_0.\cosh(mx) - \theta_0 \cdot \frac{\sinh(mL)}{\cosh(mL)}.\sinh(mx)$$

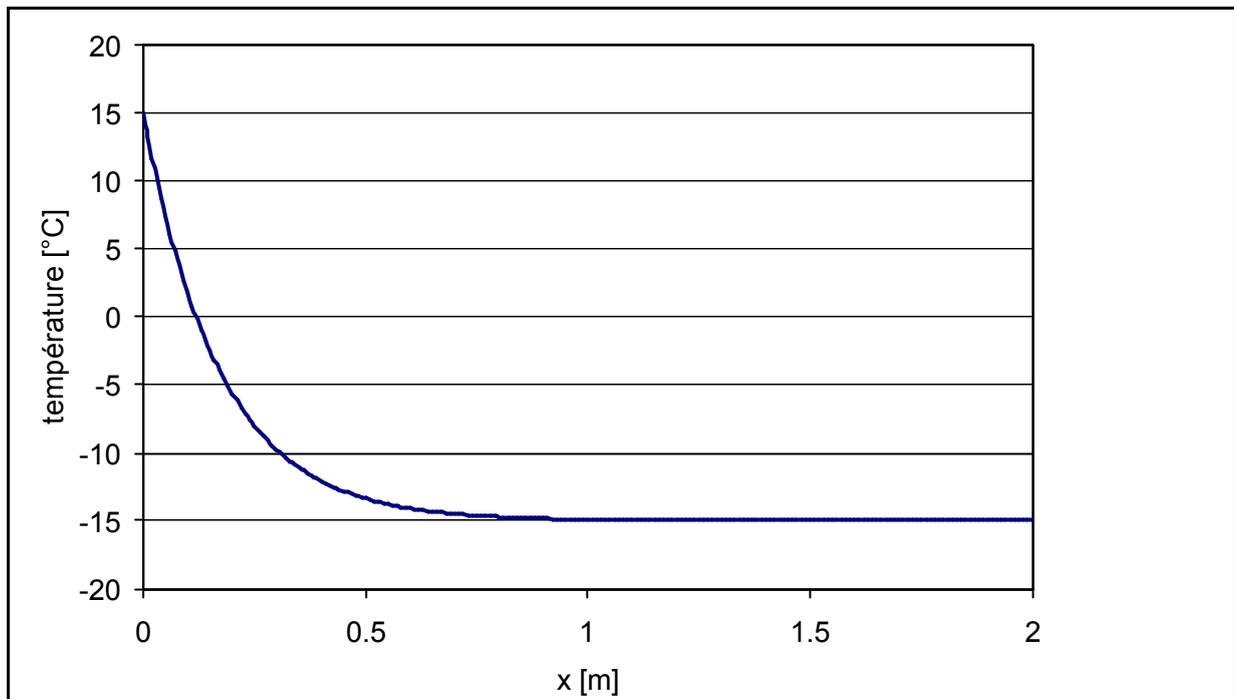
D'où :

$$\theta(x) = \theta_0 \cdot \frac{\cosh(mx).\cosh(mL) - \sinh(mL).\sinh(mx)}{\cosh(mL)}$$

$$\text{Soit } \theta(x) = \theta_0 \cdot \frac{\cosh(m(L-x))}{\cosh(mL)}$$

5) Tracer la courbe de la température dans la saillie en fonction de x dans le cas où T<sub>0</sub>=15°C et T<sub>a</sub>=-15°C. Justifier dans ce cas l'hypothèse e (extrémité de la saillie adiabatique).

Eléments de réponse



En  $x=2$  m, la température de la saillie est très proche de la température extérieure, le flux échangé à l'extrémité de la saillie peut donc être négligé par rapport au flux échangé le long de celle-ci, en particulier le flux échangé entre  $x=0$  et  $x=1$  m.

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

Éléments de réponse

$$Q_f = -\lambda.S \left( \frac{d\theta(x)}{dx} \right)_{x=0} \quad \text{avec} \quad \theta(x) = \theta_0 \cdot \frac{\cosh(m(L-x))}{\cosh(mL)}$$

$$\frac{d\theta(x)}{dx} = -m\theta_0 \cdot \frac{\sinh(m(L-x))}{\cosh(mL)}$$

$$\left( \frac{d\theta(x)}{dx} \right)_{x=0} = -m\theta_0 \cdot \frac{\sinh(mL)}{\cosh(mL)} = -m\theta_0 \cdot \tanh(mL)$$

$$Q_f = \lambda.S.m\theta_0 \cdot \tanh(mL) = \lambda.S.m \cdot \tanh(mL) \cdot (T_0 - T_a)$$

7) Déterminer sa valeur numérique.

Éléments de réponse

$$m = \sqrt{\frac{2h(P+e)}{\lambda.S}} = 5.8166 \text{ m}^{-1}$$

$$Q_f = \lambda.S.m \cdot \tanh(mL) \cdot (T_0 - T_a) = 523 \text{ W}$$

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) ?

Eléments de réponse

Il y aurait uniformisation de la température dans le balcon  $T(x)=T_0$

C'est le cas où  $m \rightarrow 0$

$\tanh(mL) \rightarrow mL$

$$Q_m = \lambda.S.m\theta_0.mL = h.2.(P+e).(T_0 - T_a)$$

Ou encore :

Le flux de fuite est égal au flux échangé par le balcon et son environnement (extérieur). Le balcon est à température constante  $T_0$ . La surface d'échange est la surface latérale du balcon soit  $(2P+2e).L$ .

Le flux échangé vaut donc :  $Q_m=h.2(P+e).L.(T_0-T_a)$

Soit  $Q_m=6090 \text{ W}$

Cette saillie est intégrée dans une série de  $N$  balcons parallèles espacés d'une distance  $\Delta_b = 2,5 \text{ m}$  (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,  $P=10\text{m}$ .

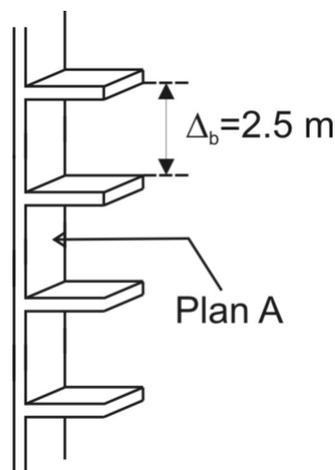
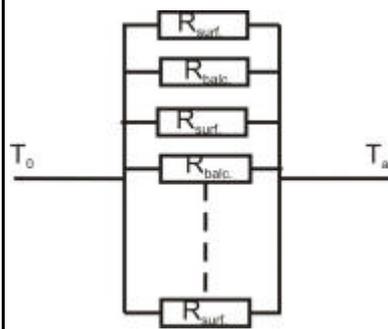


Figure 3

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 :  $h=5 \text{ W}/(\text{m.K})$ .

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 ?

Eléments de réponse



Il y a  $N$  balcons donc  $N+1$  surfaces à la température  $T_0$

Flux échangé à travers 1 balcon :  $Q_f$

Flux échangé à travers une surface intermédiaire :  $h \cdot \Delta_b \cdot P \cdot (T_0 - T_a)$

Au total :  $Q_t = N \cdot Q_f + (N+1) \cdot h \cdot \Delta_b \cdot P \cdot (T_0 - T_a)$

Application numérique :  $Q_t = 37,9 \text{ kW}$

10) On ajoute un isolant d'épaisseur  $e_i=3 \text{ cm}$  et de conductivité thermique  $\lambda_i=0.035 \text{ W/(m.K)}$  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 ?

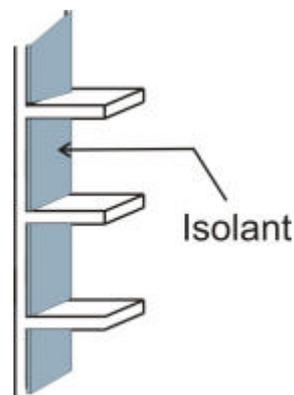
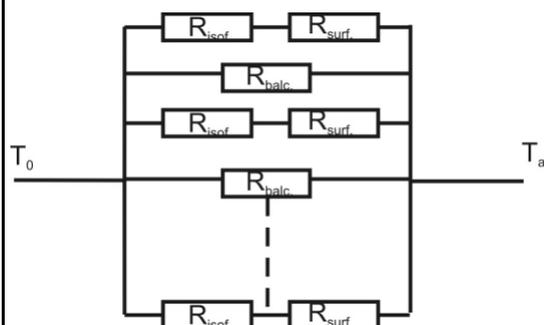


Figure 4

Eléments de réponse



Il y a N balcons donc N+1 surfaces à la température  $T_0$   
Flux échangé à travers 1 balcon :  $Q_f$  (on suppose que ce flux n'est pas perturbé).

Flux échangé à travers une surface intermédiaire :  $\frac{\Delta_b \cdot P \cdot (T_0 - T_a)}{1/h + e_i / \lambda_i}$

Au total :  $Q_t = N \cdot Q_f + \frac{(N+1) \cdot \Delta_b \cdot P \cdot (T_0 - T_a)}{1/h + e_i / \lambda_i}$

Application numérique :  $Q_t = 4.2 \text{ kW} + 6.3 \text{ kW} = 10.5 \text{ kW}$

La part des ponts thermiques (saillies) est de 39%

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

Eléments de réponse

Points froids → Condensation, moisissures...

→ consommation énergétique globale plus élevée

→ confort thermique réduit (non uniforme)...

on peut les limiter en utilisant des rupteurs de ponts thermiques

## Rapport sur le sujet « ambiance » - Agrégation Génie Civil 2009 Épreuve de Géotechnique et de qualité des ambiances

### Partie Acoustique

Le premier problème portant sur la mesure de l'absorption acoustique en salle réverbérante (peu calculatoire) a globalement été mieux traité que le second problème portant sur la mesure au tube d'impédance (plus calculatoire).

Concernant le premier problème, on peut faire les remarques suivantes :

? les candidats ont presque systématiquement ignoré les questions demandant « un début de réflexion », et ont préféré se concentrer sur les questions « calculatoires ». Les questions 1(a), 1(b), 4(b) 4(d) ont ainsi été « oubliées » par bon nombre de candidats ;

? dans la précipitation, plusieurs candidats ont fait la même erreur au niveau de la question 4. Cette question mentionnait « 5 échantillons de surface unitaire  $2.4\text{m}^2$  », ce qui représente une surface totale de  $12\text{m}^2$ , et non de  $2.4\text{m}^2$  comme certains l'ont considéré. Le tableau 1 de la question 4(a) a ainsi été mal complété.

Concernant le second problème :

? il est regrettable de constater que certains candidats ne connaissent pas le conjugué d'un nombre complexe ;

? plusieurs candidats ont fait la même erreur à la question 1(b). Si l'onde « aller » est dans la direction positive des abscisses (axe x), l'onde « réfléchi » est nécessairement en sens inverse, donc dans la direction négative.

Globalement, il faut rappeler que les réponses doivent être concises et doivent répondre précisément à la question posée. En effet, les candidats ont tendance à faire du hors sujet ou à en mettre un peu plus que demandé, sans répondre explicitement à la question. Il est probable que les candidats espèrent que le correcteur trouvera de lui-même la réponse à la question posée, à partir des éléments qu'ils auront donnés, voire même des éléments de réponse aux questions qui n'ont pas encore été posées ! Enfin, il faut rappeler aux candidats que les fautes d'orthographe nuisent à la lecture des copies.

### Partie Thermique

38 candidats seulement ont essayé de traiter cette partie, avec une réussite très variable, plusieurs candidats n'ayant pas dépassé la première question, d'autres ayant traité l'ensemble du sujet quasi parfaitement. On note une hétérogénéité très importante entre les candidats ayant des bases de thermique, et certains qui semblent ne même pas avoir de notion de transfert de chaleur.

La première question n'a en général pas été traitée correctement par les candidats, qui ont soit 'oublié' la deuxième partie de la question, soit expliqué comment ils auraient mesuré expérimentalement h...

Dans la seconde question, le jury a été étonné du nombre de candidats tentant de traiter la question en considérant une simplification de 'problème mur' alors que la question portait sur une étude locale du phénomène. Par ailleurs, on donnait la profondeur du balcon, il fallait donc soit étudier la convection sur les parois latérales, soit justifier du fait de les négliger, sinon l'absence de ce phénomène a été pénalisée.

Les questions 3 et 4 ont été globalement bien traitées par les candidats ayant réussi à poser le bon bilan thermique dans la question 2. Certains candidats n'ayant pas réussi à

poser ledit bilan ont également pu rattraper le fil de l'épreuve grâce aux indications 'de guidage' données dans le texte.

Dans la question 5, il est regrettable que certains candidats à l'agrégation représentent des courbes sans en donner la légende, ou les unités des grandeurs représentées. Par ailleurs, il n'est pas suffisant de dire que 'la température au bout du balcon est proche de la température ambiante, donc il n'y a pas de transfert', il faut justifier du fait de négliger ce transfert PAR RAPPORT à quelque chose...

Des erreurs étranges sont apparues en question 8, plusieurs candidats justifiant du fait que le balcon 'infiniment conducteur' serait uniformément à la température ambiante  $T_a$ ...

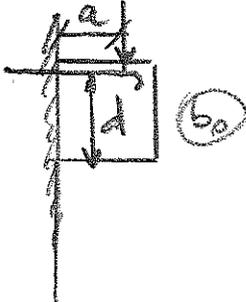
La représentation par l'analogie électrique semble bien maîtrisée, seules quelques erreurs ont pu être relevées sur ce point. De même, les candidats ayant réussi à exprimer le flux en question 8 ont en général répondu correctement aux questions 9 et 10.

La dernière question a été traitée de façon décevante, la majorité des candidats ne semblant pas avoir entendu parler des problèmes de ponts thermiques...

## B2 ETUDE DES POTEAUX

### 1. Partie d'appui de la poutre

On suppose que la charge de charpente est identique des 2 côtés du poteau. Chaque console porte donc  $G=140$  kN et  $N=54,5$  kN.



$$a = 140 + \frac{120}{2} = 200$$

$$d = 465 - 35 = 430$$

$$b_0 = 550 - 2 \times 120 = 310$$

Attention à la rainure, se limiter à la largeur pleine intérieure.

Console courte BAEL Annexe E6 applicable car  $d \geq a$  ( $430 \geq 200$ ).

Bilan des sollicitations sous G, N, W  
Combinaison ELU  $1.35 G + 1.5 N + (1.3 \times 0.77) W$

$$\begin{aligned} V_u &= 1.35 \times 140 + 1.5 \times 54.5 = 271 \text{ kN} \\ H_u &= 1.5 \times 21 + 21 = 52.2 \text{ kN} \\ M_u &= 271 \times 0.2 = 54.2 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Contrainte tangente :

$$\tau_u = \frac{V_u}{b_0 d} = \frac{0.271}{0.31 \times 0.43} = 2.03 \text{ MPa}$$

$$\text{D'où } \tau_{u1} = \frac{2.03}{1 - 0.6 \times \frac{52.5}{271}} = 2.3$$

Contrainte admissible

$$\delta = \frac{d}{a} = \frac{430}{200} = 2.15$$

$$\text{Or min } \left| \begin{array}{l} \tau_u = 0.03 (2 + 2.15) \times 30 = 3.74 \text{ MPa} \\ 4 \text{ MPa} \end{array} \right| = 3.74 \text{ MPa}$$

$$\text{Soit } \tau_{u1} = \frac{3.74}{1 - 0.6 \times \frac{52.5}{271}} = 4.23$$

On vérifie  $2.3 \text{ MPa} < 4.23 \text{ MPa}$

Ferrailage

$$A = \frac{Mu}{3fe/\partial s} \times \frac{Hu}{fe/\partial s}$$

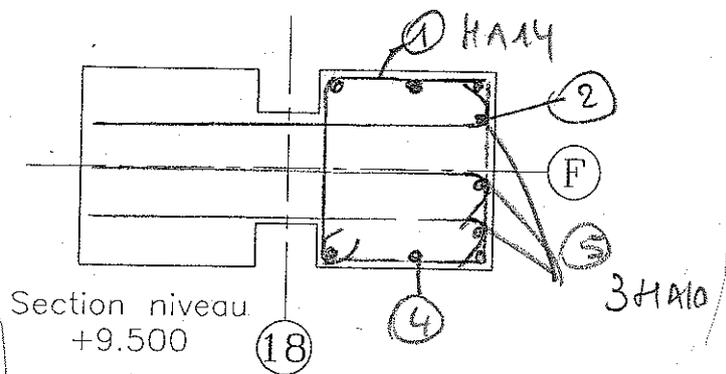
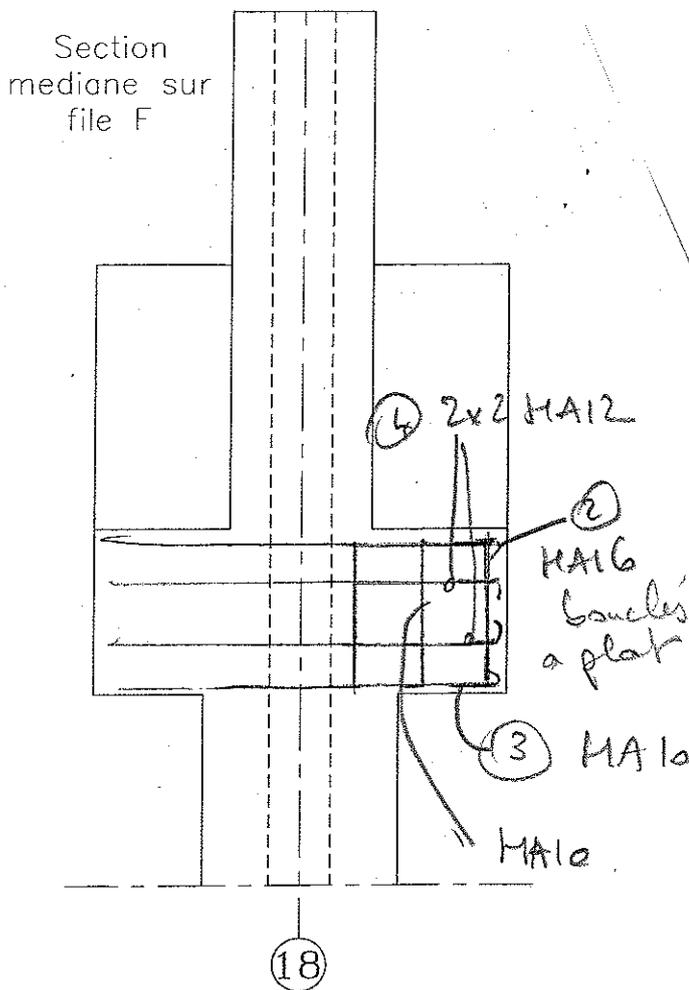
$$Z = \min \left| \begin{array}{l} 0.7 \times 0.43 \times (1 + 0.1 \times 2.15) = 0.37 \\ 2.4 \times 0.20 \times (0.4 + 0.1 \times 2.15) = 0.30 \end{array} \right| = 0.30 \text{ m}$$

$$A = \frac{0.0542}{0.30 \times \frac{500}{1.15}} + \frac{0.0525}{500/1.15}$$

$$A = 4,16 + 1,21 = 5,36 \text{ } 10^{-4} = 5,36 \text{ cm}^2 \text{ soit } 3 \text{ HA16}$$

$$\sum A_r = \lambda A \text{ avec } \lambda = \frac{1}{4} \left( 2.15 + \frac{12 \times 2.3}{30} - 1 \right) = 0.52$$

$$\sum A_r = 0.52 \times 5.36 = 2.8 \text{ cm}^2 \text{ soit } 4 \text{ HA12}$$



## 2. Flambement et ferrailage base poteau

Pas soumis à compression centrée puisque soumis au moment du à la position de la charge V et à la force horizontale. Il faut utiliser l'article A 4.3.5.

✦ Longueur libre  $L_0 = 9.76 - (-1.20) = 10.96\text{m}$  à la base de la semelle (voire 10.36m à mi hauteur)

✦ Longueur de flambement.

Articulé en tête, encastre un pied  $L_f = \frac{L_0}{\sqrt{2}} = 7.75\text{m}$  (ou 7.33m)

Ou bien 0.7  $L_0$  (bâtiment)  $L_f = 7.67\text{m}$  (ou 7.25m)

✦ Rayon de giration d'une section carrée 55x50 :  $i = \frac{0.55}{\sqrt{12}} = 0.16$

✦ Elancement  $\lambda = \frac{L_f}{i} = \frac{7.75}{0.16} = 48.44$

Pour info, avec l'article B 8.4.1, on aurait  $\alpha = \frac{0.85}{1 - 0.2 \left( \frac{\lambda}{35} \right)^2} = 0.64$

$N_u = 1.35 \times (88 + 280) + 1.5 \times 109 = 660 \text{ kN}$

Avec  $A = 0$   $N_{ulim} = 0.64 \times \frac{0.53 \times 0.53 \times 30}{0.9 \times 1.5} = 4000 \text{ kN}$

Pas besoin de ferrailage

✦ Poids du poteau 88kN

On applique l'A 4.3.5 Excentricités additionnelles

$e_a = \max \left( 2 \text{ cm}, l / 250 \right) = \left( 2; \frac{1096}{250} = 4.38 \right) = 4.38 \text{ cm}$

$e_2 = \frac{3 L_f^2}{10^4 h} (2 + \alpha \phi) = \frac{3 \times 7.75^2}{10^4 \times 0.55} (2 + 0.72 \times 2) = 0.11$

Avec  $\alpha = \frac{MG}{MG + MSN} = \frac{280}{280 + 109} = 0.72$

$\phi = 2$

$e = e_1 + e_2 = (0.4 + 0.044) + 0.11 = 0.55 \text{ m}$

La méthode forfaitaire peut être appliquée car  $l/h < \max(15; 20 e_1/h)$

$\frac{7.75}{0.55} = 14 < \max(15; 20 \times 0.444/0.55 = 16) = 16$

Poids du poteau :

$$\begin{aligned} & 85 \times (0.55 \times 0.55 - 2 \times 0.12 \times 0.17) \times (9.295 + 0.40) = 63.4 \\ & 25 \times 0.55 \times 0.55 \times (1.20 - 0.4) = 6.1 \\ & 25 \times (1.16 \times 0.55 - 2 \times 0.12 \times 0.17) \times 0.465 = 6.9 \\ & 25 \times 0.38 \times 0.74 \times 0.175 \times 4 = 4.9 \\ & 25 \times (0.40 \times 0.55 - 2 \times 0.12 \times 0.17) \times (0.74 + 0.70) = 6.45 \\ & \qquad \qquad \qquad = 87.8 \text{ arrondi à } 88 \text{ kN} \end{aligned}$$

D'où :

$$N_u = 1.35 (88 + 280) + 1.5 \times 109 = 660 \text{ kN}$$

$$M_u = (0.53 - 0.4) \times (1.35 \times 140 + 1.5 \times 54.5) + (1.5 \times 21 + 21) \times 10.96 = 610 \text{ kN.m}$$

Torseur ELU :

$$\begin{aligned} N_u &= 660 \text{ kN} \\ M_u &= 610 \text{ kN.m} \\ V_u &= 52.5 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$A = 30.4 \text{ cm}^2 \text{ soit } 10 \text{ HA20}$$

### 3. Torseur des efforts à l'encastrement sur la semelle

Torseur

$$\begin{aligned} N_u &= 660 \text{ kN} \\ M_u &= 610 \text{ kN.m} \\ V_u &= 52.5 \text{ kN} \end{aligned}$$

### 4. Contraintes au sol

$$\text{Poids de la semelle : } 25 \times (0.4 \times 2.6 \times 1.8 + 0.85 \times (1.0 \times 1.0 - .55 \times .55)) = 61.6 \text{ kN}$$

Torseur ELS :

$$\begin{aligned} N &= (88 + 280 + 61.6) + 109 = 538.6 \text{ kN} \\ M_V &= (0.53 - 0.40) \times (280 + 109) = 50.6 \text{ kN.m} \\ M_H &= 21 \times (10.48 + 0.40 + 1.45) = 257 \text{ kN.m} \\ M &= 307.6 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

$$\sigma = 538.6 / (2.60 \times 1.80) \pm 307.6 (1.80 \times 2.60^2 / 6) = 115 \pm 151$$

# Rapport du jury Projet A

Les membres du jury rappellent aux candidats que l'épreuve de projet option A ne se limite pas au calcul de structure.

Le barème de correction est dans tous les cas plus favorable aux copies qui abordent toutes les parties du sujet.

Les domaines du Génie Civil étant très variés (bâtiments, ouvrages fonctionnels, ouvrages industriels, ouvrages d'art, terrassements, ...), il faut pouvoir composer dans tous ces domaines.

## Partie B1 - Etude de la structure

### 1. Actions climatiques

Etude de la neige

Cette première partie est globalement bien traitée. Certains candidats se focalisent sur la neige accidentelle qui n'est pas demandée.

Les cas d'accumulation sont bien traités par la moitié des candidats.

Etude du vent

Il faut faire un effort dans la présentation des résultats, en prenant des hypothèses qui simplifient le problème. L'étude des pressions dynamiques n'étaient pas demandées (Un tiers des candidats ont traité ce problème).

### 2. Etude d'une panne courante

Aucun candidat ne connaissait le montage des pannes cantilever.

Environ la moitié des candidats ne sait pas lire et utiliser les combinaisons d'actions correctement.

Le calcul des sollicitations est globalement erroné. Moins de dix candidats tiennent correctement compte de la liaison cantilever. Un quart des candidats évoquent le déversement mais peu le traitent correctement.

### 3. Dimensionnement des poutres

Personne n'évoque la construction en cantilever. Les candidats savent globalement traiter le problème d'une poutre sur trois appuis avec un prédimensionnement en contraintes.

Beaucoup utilisent des largeurs de poutres supérieures à 22 cm sans tenir compte ni des possibilités du lamellé collé, ni des plan des porteurs verticaux fournis dans le sujet.

Seuls deux candidats abordent la question de la tenue au feu.

## **Partie B2- Etude des poteaux**

L'ensemble des candidats ayant traité le sujet a utilisé les règles BAEL et non Eurocodes.

### **1. Calcul de la console**

Cette partie a été très peu traitée (moins de la moitié des candidats). La pondération ELU est souvent oubliée. L'effort horizontal a toujours été oublié.  
Le ferrailage a été à peine esquissé par les candidats.

### **2. Vérification du poteau**

Cette partie a été plus abordée.  
Le torseur des efforts à la base du poteau, à l'encastrement sur la semelle, est erroné pour 2/3 des candidats ayant traité la question: l'effort horizontal en tête ne se retrouve pas en pied et n'apporte pas de moment !

### **3. Calcul des contraintes sous la semelle**

Cette partie a été très peu traitée. En absence de moment (cf observation sur torseur ci-dessus), le calcul de contrainte se limite à une division (Charge/Surface).

## **Partie B3- Etudes de réalisation**

### **4. Réalisation des fondations**

Le quantitatif a été globalement bien traité, on peut cependant regretter que le terrassement a une profondeur de 1.800 soit réalisé sans talus et que le foisonnement de terres ne soit pas pris en compte.

La détermination des effectifs globaux est convenable, mais la composition des équipes manque souvent de réalisme par rapport à la pratique du chantier.

Le planning a été beaucoup plus rarement abordé, des discontinuités d'intervention d'équipes sont fréquentes.

### **5. Pose des poteaux**

Le mode opératoire a très peu été traité, les consignes données dans le sujet ne sont pas respectées.

Lorsque des candidats ont abordés cette question, ils ont produit un document très général dans lequel les problèmes concrets du travail à réaliser ne sont pas traités, le document est mal présenté et inutilisable pour transmettre les consignes aux équipes chargées de la pose des poteaux.

Le choix de grue a été plus souvent traité et quelques candidats l'ont très bien traité, mais beaucoup de candidats ne respectent pas les consignes données dans le sujet.

### **6. Panneaux de façades**

Cette partie a été très peu traitée.

La plupart des candidats qui l'ont abordée n'ont pas tenu compte de la structure porteuse de la façade défini par les plans du dossier technique et ont placé les panneaux dans le sens vertical.

Le traitement des liaisons avec la structure manque trop souvent de réalisme, et les croquis produits sont d'une qualité médiocre, on serait en droit d'attendre une présentation d'une bien meilleure qualité de la part d'enseignant en poste ou de futurs enseignants.

Le traitement des joints n'a que très rarement été abordé, et quand il l'a été, les solutions proposées sont fantaisistes.

## **Conclusions**

Un approfondissement des connaissances des candidats en technologie est nécessaire pour aborder cette épreuve.

Des visites et un suivi de chantier dans la durée sont indispensables pour que les candidats abordent les questions d'organisation de chantier avec le réalisme et la rigueur dont doit faire preuve un cadre dans les tâches qu'il accomplit au cours de la période de préparation d'un chantier.

Très souvent, dans leur copie, les candidats se contentent de donner les résultats alors qu'on attend la présentation des hypothèses et la justification des calculs réalisés.

## Éléments de correction Projet Ingénierie Option B

### Partie 1 : Etude économique et environnementale de la chaufferie mixte

#### Question 1 : Consommation énergétique du projet et répartition par énergie

Calcul des besoins annuels pour le chauffage du projet :  $E_{ch} = \frac{24 \times DJU \times I \times D}{\Delta\theta}$

Avec DJU : Degrés Jours Unifiés  
I : Facteur d'intermittence  
D : Déperditions totales (parois et renouvellement d'air) en kW  
 $\Delta\theta$  : Ecart de température,  $\theta_i - \theta_E$  en °C

$$E_{ch} = \underline{200 \text{ MWh}}$$

Calcul des besoins annuels pour la production d' ECS :  $E_{ECS} = 365 \cdot \rho \cdot V \cdot Cp \cdot \frac{(\theta_{ECS} - \theta_{EF})}{3600}$

Avec V : Consommation journalière d'ECS en m<sup>3</sup>/jour  
 $\rho$  : Masse volumique de l'eau en kg/m<sup>3</sup>  
 $\theta_{ECS}$  : Température de stockage en °C  
 $\theta_{EF}$  : Température d'eau froide en °C

$$E_{ECS} = \underline{51 \text{ MWh}}$$

TOTAL des besoins annuels du projet (hors apport solaire) :

$$\underline{251 \text{ MWh}}$$

Répartition des puissances entre la chaudière fioul et la chaudière bois, pour les conditions extérieures de base :

|                          |               |                                            |               |
|--------------------------|---------------|--------------------------------------------|---------------|
| Déperditions du projet : | 114 kW        | Puissance Chaudière bois pour le chauffage | 114 kW (100%) |
| Puissance ECS :          | 130 kW        | Puissance Chaudière bois pour ECS          | 66 kW (50%)   |
|                          |               | Puissance Chaudière fioul en appoint       | 64 kW         |
| <b>TOTAL</b>             | <b>244 kW</b> | <b>TOTAL</b>                               | <b>244 kW</b> |

Remarque : en première approximation, on peut considérer que les besoins en ECS sont constants en fonction de la température extérieure.

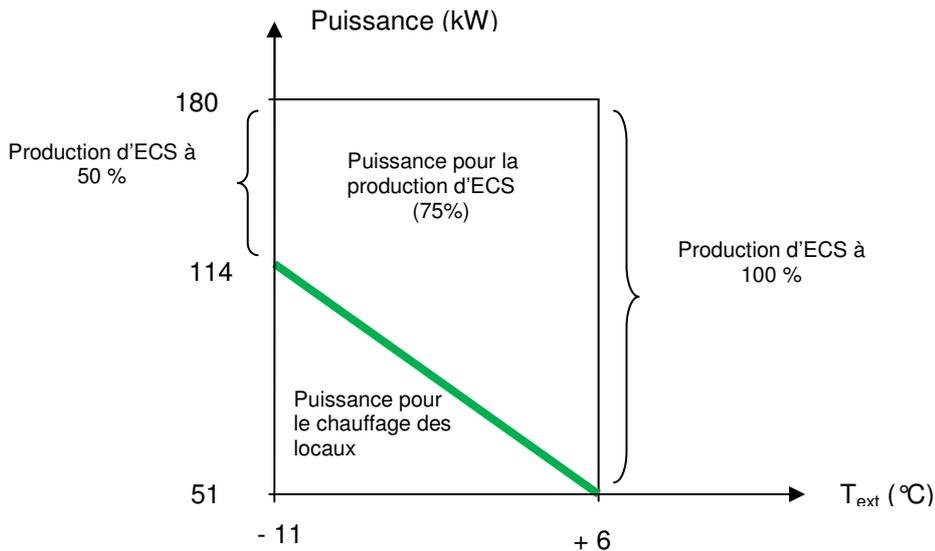
Détermination de la température extérieure limite, pour laquelle, la chaudière bois peut couvrir seule les besoins en ECS et en chauffage :

Les déperditions sont proportionnelles à l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur :

$$D = K \cdot (\theta_i - \theta_E) \rightarrow K = 114/31 = 3,68 \text{ kW/°C}$$

Température extérieure à partir de laquelle la chaudière bois devient insuffisante :

$$(180 - 130) = K (20 - \theta_E) \rightarrow \theta_E = 6,4 \text{ °C}$$



Répartition de la puissance pour la chaudière bois pour les températures extérieures de - 11 °C à + 6 °C

Hypothèse : Pour les calculs de consommation d'énergie, on va prendre comme température de non chauffage 18 °C. Cela revient à considérer que les apports gratuits participent au chauffage à hauteur de 2 °C.

Calcul des consommations énergétiques pour le projet :

DJU par période :

De - 11 °C à +6 °C de T.ext  
**1818**

De +7 °C à +13 °C de T.ext  
**794**

De +14 °C à 17 °C de T.ext  
**57**

Consommations d'énergie par chaudière et par usage :

Détermination du rendement global :  $\eta_g = \eta_{ch} \times \eta_{distribution} \times \eta_{régulation} \times \eta_{émission}$

Hypothèses : Pertes réseaux estimées à : 10 %  
Rendement de régulation : 95 %  
Rendement d'émission : 95 %

Documents annexes :

Rendement de la chaudière bois à 100 % de taux de charge : 85,7 %  
Rendement de la chaudière fioul à 100 % de taux de charge : 92,5 %

Rendement global avec la chaudière bois :  $\eta_g = 70 \%$

Rendement global avec la chaudière fioul :  $\eta_g = 75 \%$

Consommation d'énergie des chaudières pour le chauffage des locaux :  $C_{ch} = \frac{24 \times DJU \times I \times D}{\Delta\theta \times \eta_g}$

Consommation d'énergie des chaudières pour la production d'ECS :  $C = Nbj \cdot \rho \cdot V \cdot Cp \cdot \frac{(\theta_{ECS} - \theta_{EF})}{3600 \times \eta_g}$

## Scénario de consommation :

| Production d'énergie                                | Scénario              | Nb de Jours | DJU (°C.j) | Consommation ECS (MWh) | Consommation Chauffage (MWh) | Consommation Globale (MWh) |
|-----------------------------------------------------|-----------------------|-------------|------------|------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Chaudière fioul seule                               | Text $\geq$ 14 °C     | 19          | 57         | 3,5                    | 5,7                          |                            |
| Chaudière bois seule                                | 7 $\leq$ Text < 14 °C | 96          | 794        | 19,1                   | 85,0                         |                            |
| Chaudière bois et appoint fioul :<br>Bois<br>Fioul  | Text < 7 °C           | 113         | 1818       | 16,9<br>5,0            | 194,6                        |                            |
| Hors saison de chauffage :<br>Chaudière fioul seule |                       | 137         |            | 25,5                   | -                            |                            |
| <b>TOTAL</b>                                        |                       | 365         | 2 669      | 70,0                   | 285,3                        |                            |
| <b>Chaudière bois</b>                               |                       |             |            | 36,0                   | 279,6                        | 315,6                      |
| <b>Chaudière fioul</b>                              |                       |             |            | 34,0                   | 5,7                          | 39,7                       |

**Conclusion :** Dans ce projet, la part couverte par la chaudière biomasse sur une année de consommation de chauffage et de production d'ECS est d'environ 89 %, l'appoint assuré par la chaudière fioul étant de 11 %.

## Question 2 : Comparatif entre la chaufferie mixte biomasse et une chaufferie fioul

Les besoins utiles en sortie chaufferie représentent la quantité d'énergie qui est fournie en sortie de la chaufferie alimentant le réseau de distribution. Ils correspondent donc aux besoins de chauffage augmentés des pertes liées à la régulation, à l'émission et à la distribution. Dans le cas étudié, les besoins utiles sont d'environ 310 MWh (arrondi à 300 MWh), assuré à 90% par la chaudière biomasse soit 270 MWh et le complément 10 % par la chaudière fioul soit 30 MWh.

### Calcul du PCI des plaquettes forestières :

$$PCS = 108 \times C = 5\,346 \text{ kWh/t}$$

$$PCI = PCS - 60,5 \times H = 5\,346 - 60,5 \times 6 = 4\,983 \text{ kWh/t anhydre}$$

$$PCI = PCI \text{ anhydre} \times (100 - E) / 100 = 4\,983 \times (100 - 30) / 100 = \mathbf{3\,488 \text{ kWh/t}}$$

Evaluation du tonnage annuel de plaquettes forestières : Consommation / PCI = (270/0,85) / 3,488 = **91 t**

Volume apparent de plaquettes : tonnage / Masse volumique = 101,9 / 0,275 = **331 MAP / an**

*Les fournisseurs de combustible bois disposent de camions bennes ou de camions équipés de caissons, et peuvent livrer par 40 ou 80 m<sup>3</sup>. 9 livraisons de 40 m<sup>3</sup> seront nécessaires pendant la période de chauffe (soit en moyenne une par quinzaine).*

### Estimation du tonnage de cendre à enlever :

Energie fournie par la chaudière bois : 270 / 0,85 = 317 MWh (rendement global annuel estimé à 85 %)

D'après la documentation du constructeur, la production de cendres de la chaudière est estimée à 4,4 kg/MWh, soit 4,4 x 317 = 1 400 kg cendres à enlever par an.

### Estimation de la consommation de fioul, avec une solution de base de chauffage par fioul uniquement :

Rendement global annuel de production de la chaudière fioul estimé à 90 %.

Consommation de fioul : 300 / 0,90 = 333 MWh

Soit : 28 587 kg<sub>fioul</sub> / an

33,6 m<sup>3</sup> / an

## Etude économique et environnementale de la chaufferie

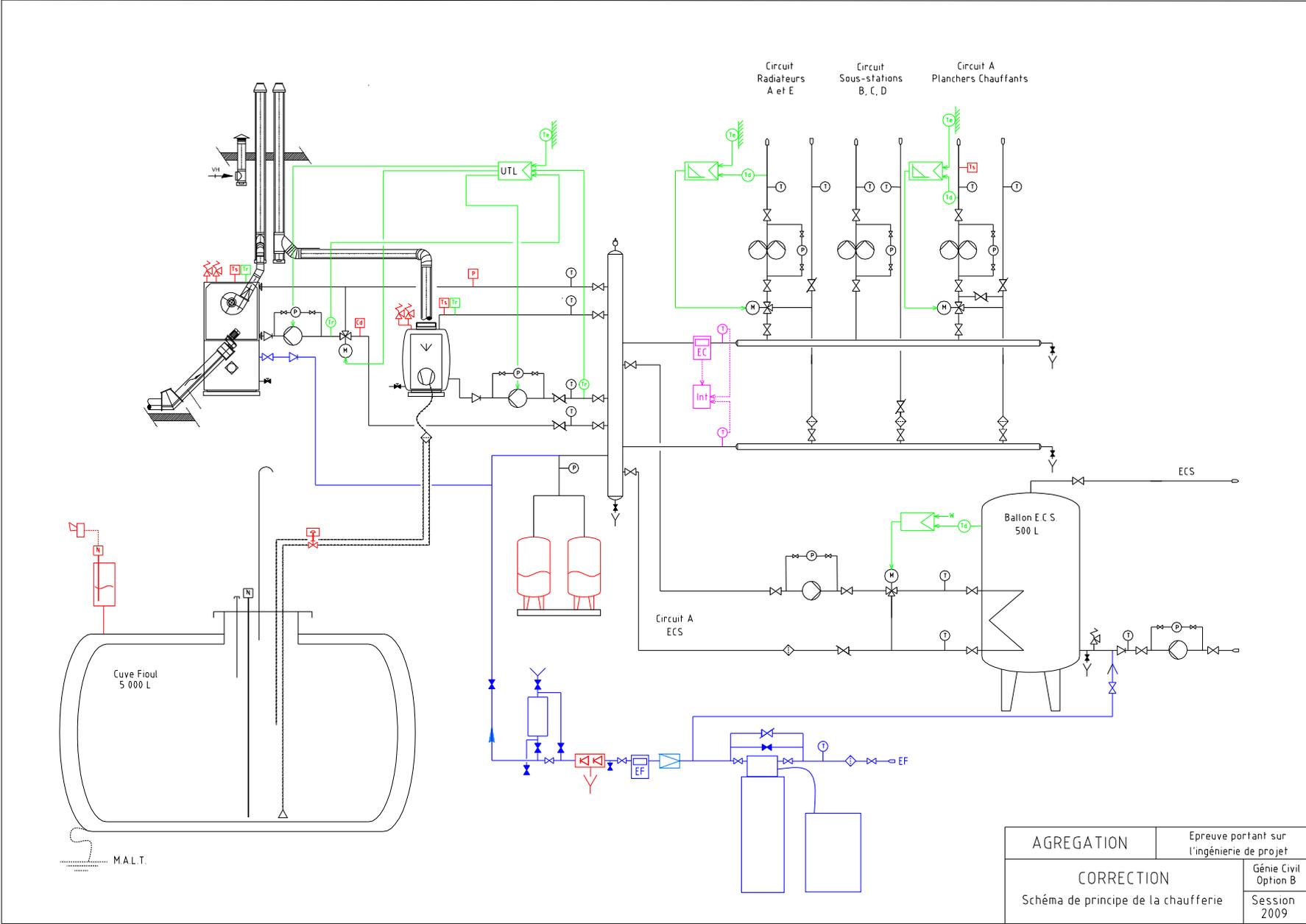
|                               |                                                                        | Solution de base en fioul domestique                              | Solution mixte avec biomasse                                                                   |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Paramètres thermiques</b>  | Puissance de la chaudière bois (kW)                                    | -                                                                 | 180                                                                                            |
|                               | Puissance de la chaudière fioul (kW)                                   | 405                                                               | 225                                                                                            |
|                               | Rendement annuel de la chaufferie (%)                                  | 90                                                                | 85                                                                                             |
|                               | Consommation annuelle de plaquettes forestières (kWh)                  | -                                                                 | 317 000                                                                                        |
|                               | Consommation annuelle de combustible de fioul domestique (kWh) et (kg) | 333 000 kWh<br>28 587 kg                                          | 33 300 kWh<br>2 859 kg                                                                         |
|                               | Quantité de SO <sub>2</sub> émise (kg <sub>SO2</sub> )                 | 0,156 mole/kg x 32 g/mole x 28 587 kg =<br>143 kg SO <sub>2</sub> | 0 pour le bois<br>14,3 kg pour le fioul                                                        |
| <b>Coûts Energétiques</b>     | Quantités de plaquettes forestières (tonnes)                           | -                                                                 | 91                                                                                             |
|                               | Quantité de fioul domestique (litres)                                  | 33 631                                                            | 3 361                                                                                          |
|                               | Prix du combustible<br>- Fioul domestique<br>- Plaquettes forestières  | 0,86 € TTC /litre<br>46 € TTC /tonne                              |                                                                                                |
|                               | Prix du combustible F.O.D. (Euros/an)                                  | 28 922 € TTC                                                      | 2 892 TTC                                                                                      |
|                               | Prix des plaquettes forestières (Euros/an)                             | -                                                                 | 4 186 € TTC                                                                                    |
| <b>Paramètres économiques</b> | Investissement – Coût total (€ TTC)                                    | 214 299 €                                                         |                                                                                                |
|                               | Coût annuel de l'exploitation technique (€ TTC)                        | 1 800                                                             | 4 300                                                                                          |
|                               | Coût annuel d'exploitation des installations (€ TTC)                   | 30 722                                                            | 11 378                                                                                         |
|                               | Temps de retour sur investissement (an)                                | -                                                                 | 214299 x 0,75 /<br>(30722 – 11378) =<br>8,3 ans                                                |
| <b>Bilan ACV</b>              | Bilan Energie (MWh Energie Primaire)                                   | 1,50 x 250 =<br>375 MWh <sub>ep</sub>                             | Bois : 0,26 x 220 =<br>57,2 MWh <sub>ep</sub><br>Fioul : 1,50 x 25 =<br>37,5 MWh <sub>ep</sub> |
|                               | Bilan effet de serre (t <sub>CO2</sub> émis)                           | 490 x 250 =<br>123 t <sub>CO2</sub>                               | Bois : 24 x 220 =<br>5,28 t <sub>CO2</sub><br>Fioul : 490 x 25 =<br>12,25 t <sub>CO2</sub>     |

### Commentaire :

Le temps de retour est convenable (moins de 10 ans) pour ce type d'investissement. Au niveau environnemental, le bilan est positif et permet de réduire l'émission de CO<sub>2</sub> de 104,5 tonnes, à condition que les plaquettes proviennent d'une production locale (moins de 30 km) pour limiter les émissions de CO<sub>2</sub> liées au transport. Le point négatif de ce type d'installation reste l'augmentation de la pollution locale (émission de poussières).

# Partie 2 : Conception de la chaufferie

## Question 1 : Schéma de principe

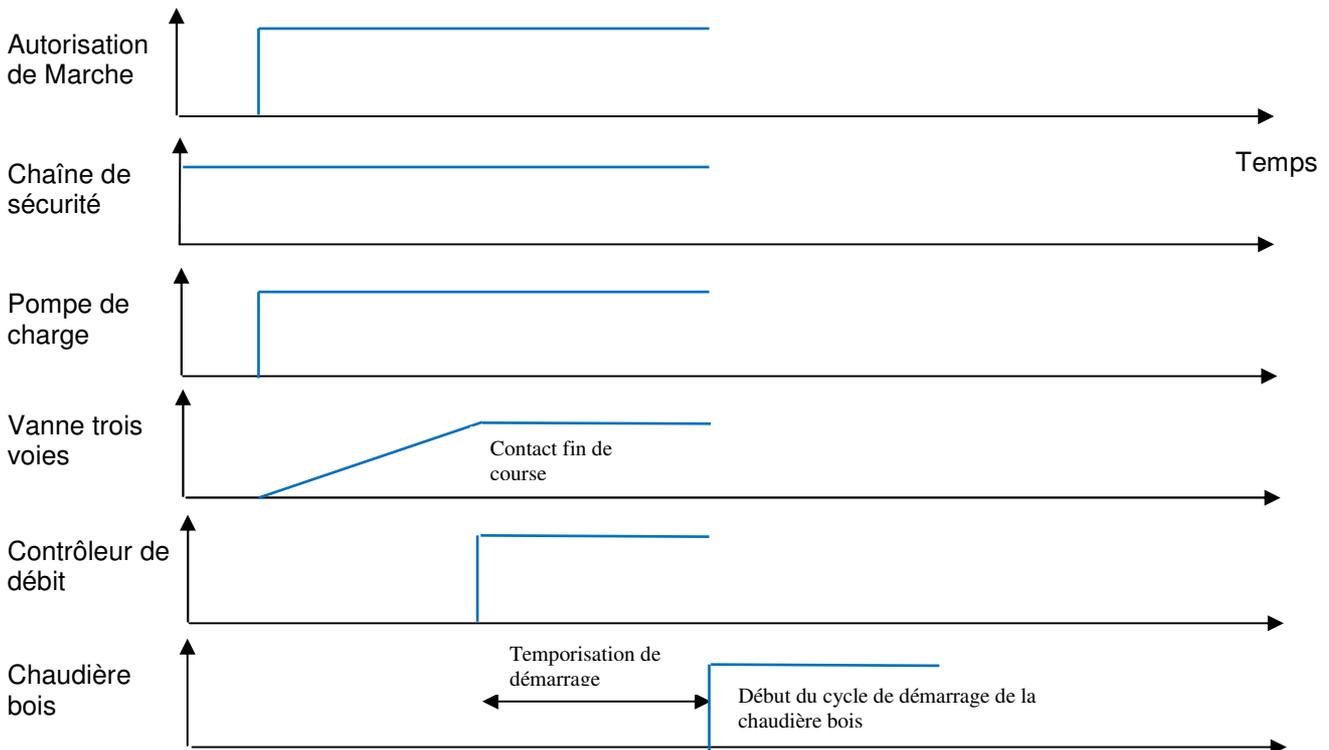


|                                     |                                            |
|-------------------------------------|--------------------------------------------|
| AGREGATION                          | Epreuve portant sur l'ingénierie de projet |
| CORRECTION                          | Génie Civil Option B                       |
| Schéma de principe de la chaufferie |                                            |
| Session 2009                        |                                            |

## Question 2 : Régulation cascade des chaudières

### Mise en service de la chaudière bois prioritaire :

- Autorisation de marche si Température extérieure  $< 14\text{ °C}$ ,
- Aucun défaut sur la chaîne de sécurité (thermostat de sécurité, disjoncteur, arrêt d'urgence ...),
- Thermostat de régulation en demande (température départ inférieure à la consigne de  $85\text{ °C}$ ),
- Mise en marche de la pompe de charge de la chaudière bois,
- Si  $Tr > 68\text{ °C}$ , ouverture progressive de la vanne trois voies,
- Contact fin de course de la vanne détectant l'ouverture complète,
- Détection de la présence de débit par le contrôleur de débit,
- Temporisation de démarrage (quelques minutes),
- Mise en marche du cycle de démarrage de la chaudière bois.



### Mise en service de la chaudière fioul :

- Autorisation de marche si :
  - $14\text{ °C} < \text{Température extérieure} < 18\text{ °C}$  (faible charge thermique),
  - Demande de forçage manuel (chaudière bois en défaut),
  - Température de retour inférieure à la consigne (fonctionnement en mode appoint),
- Aucun défaut sur la chaîne de sécurité (thermostat de sécurité, disjoncteur, arrêt d'urgence ...),
- Thermostat de régulation en demande (température départ inférieure à la consigne de  $85\text{ °C}$ ),
- Mise en marche de la pompe de charge de la chaudière fioul,
- Temporisation de démarrage (quelques minutes),
- Mise en marche du cycle de démarrage de la chaudière fioul.

### Mise à l'arrêt de la chaudière bois :

- Autorisation d'arrêt de la chaudière bois (signal de la GTC, si  $Text > 14\text{ °C}$ ),
- Cycle d'arrêt de la chaudière bois (arrêt de la combustion),
- Temporisation de post-irrigation (15 minutes),
- Fermeture progressive de la vanne trois voies – action contact fin de course,
- Arrêt de la pompe de charge de la chaudière.

### Partie 3 : Etude la combustion et pollution atmosphérique

#### Questions 1 et 2.

Une étude de combustion est nécessaire, en prenant en compte les excès d'air des 2 chaudières.

Composition de l'air comburant : 21 % O<sub>2</sub>, 79 % N<sub>2</sub> (par hypothèse).

#### **Pour la biomasse :**

| Composant | %<br>massique | Masse<br>constituant<br>(g) | Nb moles<br>constituant | Nb moles<br>O <sub>2</sub> | Réaction                                              | Nb moles<br>CO <sub>2</sub> | Nb moles<br>H <sub>2</sub> O | Nb moles<br>N <sub>2</sub> |
|-----------|---------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| C         | 49,5          | 495                         | 41,25                   | 41,25                      | C + O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub>                  | 41,25                       |                              |                            |
| H         | 6             | 60                          | 30                      | 15                         | H <sub>2</sub> +1/2 O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O |                             | 30                           |                            |
| N         | 0,5           | 5                           | 0,178                   |                            | N <sub>2</sub> →N <sub>2</sub>                        |                             |                              | 0,178                      |
| O         | 44            | 440                         | 13,75                   | -13,75                     |                                                       |                             |                              |                            |

42,5

#### **Résultats pour la combustion neutre :**

$$VO_2 = nO_2 \cdot V = 0,952 \text{ m}^3_{(n)}/\text{kg}_{\text{ bois anhydre}}$$

$$Va = VO_2 / 0,21 = 4,53 \text{ m}^3_{(n)}/\text{kg}_{\text{ bois anhydre}}$$

$$VCO_2 = 0,924 \text{ m}^3_{(n)} / \text{kg}_{\text{ bois anhydre}}$$

$$Vfs = VCO_2 + VN_2 = VCO_2 + 0,79 \cdot Va + VN_2 \text{ combustible}$$

$$= 4,68 \text{ m}^3_{(n)}/\text{kg}_{\text{ bois anhydre}}$$

$$Vfh = Vfs + VfH_2O = 5,35 \text{ m}^3_{(n)} / \text{kg}_{\text{ bois anhydre}}$$

Pour tenir compte de l'excès d'air et de la combustion oxydante correspondante, il faut faire un bilan analytique sur les fumées, pour déterminer l'excès d'air d'après la mesure du taux d'oxygène (valeur donnée dans la documentation fabricant) :

$$e = \frac{E}{Va} = \frac{4,76 \cdot VO_2}{Va} = \frac{4,76 \cdot \chi \cdot Vfs'}{Va} \quad (\chi : \text{taux de } O_2 \text{ mesuré})$$

$$\text{Or } Vfs' = VFS + E = Vfs + 4,76 \cdot VO_2 = Vfs + 4,76 \cdot \chi \cdot Vfs'$$

$$Vfs' \cdot (1 - 4,76 \cdot \chi) = Vfs$$

$$e = \frac{4,76 \cdot \chi \cdot Vfs}{Va \cdot (1 - 4,76 \cdot \chi)} = \frac{Vfs}{Va} \cdot \left( \frac{\chi}{1 - 4,76 \cdot \chi} \right) = \frac{Vfs}{Va} \left( \frac{\chi}{0,21 - \chi} \right)$$

Résultat pour % O<sub>2</sub> = 8 % → e = 0,635 soit 63.5% d'excès d'air. (d' après annexe N°5 à P max)

#### **Récapitulatif :**

**Débit d'air :**

$$Qva = Qm \text{ bois} \cdot (1+e) \cdot Va = \underline{\underline{310 \text{ m}^3_{(n)}/\text{h}}}$$

**Débit des fumées humides :**

$$Qvfh = Qm \text{ bois} \cdot (Vfh + e \cdot Va) = \underline{\underline{365 \text{ m}^3_{(n)}/\text{h}}}$$

**Pour le fioul :**

| Composant | %<br>massique | Masse<br>constituant<br>(g) | Nb moles<br>constituant | Nb<br>moles<br>O <sub>2</sub> | Réaction                         | Nb<br>moles<br>CO <sub>2</sub> | Nb<br>moles<br>H <sub>2</sub> O | Nb<br>moles<br>SO <sub>2</sub> | Nb<br>moles<br>N <sub>2</sub> |
|-----------|---------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| C         | 84,3          | 843                         | 70,25                   | 70,25                         | $C + O_2 \rightarrow CO_2$       | 70,25                          |                                 |                                |                               |
| H         | 12,4          | 124                         | 62                      | 31                            | $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$ |                                | 62                              |                                |                               |
| S         | 0,5           | 5                           | 0,16                    | 0,16                          | $S + O_2 \rightarrow SO_2$       |                                |                                 | 0,16                           |                               |
| N         | 0,8           | 8                           | 0,29                    |                               | $N_2 \rightarrow N_2$            |                                |                                 |                                | 0,29                          |
| O         | 2             | 20                          | 1,25                    | - 1,25                        |                                  |                                |                                 |                                |                               |
| 100,2     |               |                             |                         |                               |                                  |                                |                                 |                                |                               |

**Résultats pour la combustion neutre:**

$$VO_2 = 2,24 \text{ m}^3_{(n)}/\text{kg fioul}$$

$$Va = 10,68 \text{ m}^3_{(n)}/\text{kg fioul}$$

$$VCO_2 = 1,57 \text{ m}^3_{(n)}/\text{kg fioul}$$

$$Vfs = 10,02 \text{ m}^3_{(n)}/\text{kg fioul}$$

$$Vfh = 11,40 \text{ m}^3_{(n)}/\text{kg fioul}$$

$$\% CO_2 \text{ maxi} = CO_2 / Vfs = 0,157 \text{ soit } 15,7 \%$$

D'après la documentation VIESSMANN :

$$Pu = 225 \text{ kW}$$

Rendement utile: 92,5 %

Taux de CO<sub>2</sub> = 13 %

Pour une combustion avec excès d'air, le volume d'air en excès  $VEA = e \cdot Va = (VCO_2 / \gamma_{CO_2} - Vfs)$ , soit un excès d'air de 19,4 %.

$$\text{Puissance absorbée : } Pb = Pu / \eta_u = 243 \text{ kW}$$

$$\text{Débit de combustible : } Qm \text{ fioul} = Pb / PCI = 5,79 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

**Récapitulatif :**

**Débit d'air :**

$$Qva = Qm \text{ fioul} \cdot (1 + e) \cdot Va =$$

$$\underline{265 \text{ m}^3_{(n)}/\text{h}}$$

**Débit de fumées humides :**

$$Qvfh = Qm \text{ fioul} \cdot (Vfh + e \cdot Va) =$$

$$\underline{280 \text{ m}^3_{(n)}/\text{h}}$$

**Question 3 : liste des polluants émis**

| Polluant             | Effet sur la santé                                                | Impact sur l'environnement                                                         |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| SO <sub>2</sub>      | Inflammation des bronches, altération des fonctions respiratoires | Pluies acides, dégradation de la végétation et des matériaux de construction       |
| CO <sub>2</sub>      | Acceptable aux concentrations habituelles rencontrées dans l'air  | Effet de serre                                                                     |
| CO                   | Maux de tête, vertiges, en fonction des doses coma et mort        | Effet de serre via son oxydation en CO <sub>2</sub>                                |
| NO <sub>2</sub> , NO | Gaz irritant pour les voies respiratoires                         | Pluies acides, effet de serre                                                      |
| Poussières           | Irritation des voies respiratoires                                | Diffusion de polluants dans l'environnement local ou sur plusieurs centaines de km |

## Partie 4 : ECS solaire

**Question 1** En suivant les règles fournies en annexe, et en respectant les données techniques du capteur solaire, il fallait déterminer l'énergie utile mensuelle pour 1 capteur puis 5 capteurs. Enfin, il fallait déterminer le taux de couverture théorique et pratique.

Ville: DIJON Angle d'inclinaison du capteur  $\alpha$  : 30 °  
 Latitude 47.3 ° Nord Orientation des capteurs Sud

Besoin ECS: **1261** Kwh/mois  
 Pertes Ballon Vitocell B300 additionner : 84 kWh/mois  
 Total  $Q_{ECS}$  : **1345** Kwh/mois

Capteurs:  
**Vitosol 100**  $S = \underline{\quad 2,3 \quad} \text{ m}^2$

n° colonnes:

|                                        | 1                              | 2    | 3      | 4     | 5     | 6          | 7                             | 8     | 1 capt | 2 capt | 3 capt | 4 capt | 5 capt | 6 capt | 7 capt | 8 capt | 9 capt | 10 capt |  |  |  |
|----------------------------------------|--------------------------------|------|--------|-------|-------|------------|-------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--|--|--|
|                                        | Gm<br>kWh/m <sup>2</sup> /mois | T °C | $\eta$ | Csite | Azim. | R $\alpha$ | Q<br>kWh/m <sup>2</sup> /mois |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |  |  |  |
| J                                      | 31                             | 6,3  | 0,515  | 1,07  | 1     | 1,44       | 24,6                          | 56,6  |        |        |        |        | 282,9  |        |        |        |        |         |  |  |  |
| F                                      | 49,6                           | 7,6  | 0,52   | 1,07  | 1     | 1,35       | 37,3                          | 85,7  |        |        |        |        | 428,5  |        |        |        |        |         |  |  |  |
| M                                      | 86,4                           | 11,9 | 0,535  | 1,07  | 1     | 1,09       | 53,9                          | 124,0 |        |        |        |        | 620,0  |        |        |        |        |         |  |  |  |
| A                                      | 127,4                          | 15,4 | 0,547  | 0,95  | 1     | 1,08       | 71,5                          | 164,4 |        |        |        |        | 822,2  |        |        |        |        |         |  |  |  |
| M                                      | 155,9                          | 19,3 | 0,562  | 0,95  | 1     | 0,99       | 82,4                          | 189,5 |        |        |        |        | 947,6  |        |        |        |        |         |  |  |  |
| J                                      | 169,3                          | 22,7 | 0,575  | 0,95  | 1     | 0,97       | 89,7                          | 206,3 |        |        |        |        | 1031,6 |        |        |        |        |         |  |  |  |
| J                                      | 178,3                          | 24,6 | 0,582  | 0,95  | 1     | 0,98       | 96,6                          | 222,2 |        |        |        |        | 1111,0 |        |        |        |        |         |  |  |  |
| A                                      | 146,5                          | 24   | 0,579  | 0,95  | 1     | 1,05       | 84,6                          | 194,6 |        |        |        |        | 973,0  |        |        |        |        |         |  |  |  |
| S                                      | 114,2                          | 20,9 | 0,567  | 0,95  | 1     | 1,19       | 73,2                          | 168,4 |        |        |        |        | 841,8  |        |        |        |        |         |  |  |  |
| O                                      | 66,2                           | 15,5 | 0,55   | 1,07  | 1     | 1,4        | 54,5                          | 125,4 |        |        |        |        | 627,2  |        |        |        |        |         |  |  |  |
| N                                      | 31,8                           | 10,7 | 0,53   | 1,07  | 1     | 1,47       | 26,5                          | 61,0  |        |        |        |        | 304,9  |        |        |        |        |         |  |  |  |
| D                                      | 23,8                           | 7,1  | 0,518  | 1,07  | 1     | 1,43       | 18,9                          | 43,4  |        |        |        |        | 216,9  |        |        |        |        |         |  |  |  |
| kWh/an                                 |                                |      |        |       |       |            |                               |       |        |        |        |        | 8207,7 |        |        |        |        |         |  |  |  |
| Taux de couverture théorique Tx:       |                                |      |        |       |       |            |                               |       |        |        |        |        | 0,51   |        |        |        |        |         |  |  |  |
| Taux de couverture pratique = Tx x 0,9 |                                |      |        |       |       |            |                               |       |        |        |        |        | 0,46   |        |        |        |        |         |  |  |  |

### Question 2 : Choix de la surface optimum de capteur

La surface de capteurs doit être déterminée pour obtenir un taux de couverture solaire proche de 100 % pour le mois le plus favorable. Les calculs menés précédemment montrent un taux de couverture maximal pour le mois de juillet. La surface pourrait être étendue à 6 capteurs pour un taux de couverture de  $82 / 5 * 6 = 98,4$  %. Au-delà de 6 capteurs, la surface supplémentaire entraînerait une surchauffe en période estivale, et les problèmes techniques inévitables, à savoir montée en température et pression du circuit solaire, vidange du circuit solaire par la soupape de sécurité, baisse de la pression à froid, intervention nécessaire pour le remplissage.

## Partie 5 : Traitement de l'air du bassin du local Bassin

### Question 1 : Calcul des charges thermiques du hall bassin

#### Charges latentes :

**Calcul du débit d'eau d'évaporation du hall du bassin de la piscine, selon la méthode VDI.**

Bassin :

$$\begin{aligned}
 P_s &= 42,41 \text{ mbar (d'après tableau des pressions partielles à la saturation)} \\
 P_i &= \varphi \times P_s = 0,65 \times 35,64 = 23,17 \text{ mbar} \\
 q_{m_w} \text{ Bassin} &= \varepsilon \times S \times (P_s - P_i) \quad \quad \quad \underline{+ 4,3 \text{ kg/h}}
 \end{aligned}$$

#### **Calcul des apports latents par les personnes :**

Hypothèse : Public enfant donc minoration de 20 % des apports thermiques avec une activité moyenne

$$\begin{aligned}
 \text{Métabolisme :} \quad \quad \quad \text{charges latentes : } &110 \text{ W/pers} \\
 \text{Apports latents par les personnes :} &110 \times 4 \times 0,8 = 352 \text{ W} \\
 M = H_{lat}/L_v = &1,4 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} \quad \quad \quad \underline{+ 0,5 \text{ kg/h}}
 \end{aligned}$$

**TOTAL Apports latent : 4,8 kg/h**

#### Charges sensibles :

**Calcul des déperditions du hall bassin** - 1 166 W

Hypothèse : Les pertes thermiques vers les locaux chauffés seront négligées.

#### **Calcul des apports sensibles par les personnes :**

Hypothèse : Public enfant donc minoration de 20 % des apports thermiques avec une activité moyenne

$$\text{Apports sensibles par les personnes :} \quad \quad \quad \underline{+ 198 \text{ W}}$$

**Calcul des apports sensibles par l'éclairage :** + 986 W

#### **Calcul des apports sensibles par le plan d'eau du bassin :**

$$\text{Flux de chaleur par convection et rayonnement : } (h_c + h_r) \cdot S \cdot (\theta_{eau} - \theta_i)$$

$$\text{Avec } h_c = 5,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$h_r = 3,72 \times \frac{\left(\frac{\theta_{eau}}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_i}{100}\right)^4}{\theta_{eau} - \theta_i} = 4,07 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$\text{Apports sensibles :} \quad \quad \quad \underline{+ 431 \text{ W}}$$

#### **Calcul des apports solaires par les vitrages :**

Méthode COSTIC : Charge surfacique par vitrage : 137 W/m<sup>2</sup>, le 21 juin à 18 h

Apports sensibles par les vitrages :

$$\text{Charge surfacique} \times \text{Surface} \times F \quad \quad \quad \underline{+ 526 \text{ W}}$$

#### **Calcul des apports solaires par les parois verticales :**

$$\text{Apports sensibles par les parois verticales : } \alpha \cdot U \cdot S \cdot \Delta\theta_{\text{virtuel}} \quad \quad \quad \underline{+ 23 \text{ W}}$$

| Charges Thermiques           | HIVER        |                | ETE            |                |
|------------------------------|--------------|----------------|----------------|----------------|
|                              | Sensible (W) | Latent (W)     | Sensible (W)   | Latent (W)     |
| Déperditions par les parois  | - 1 166      | -              |                | -              |
| Apports par les parois       |              |                | + 23           |                |
| Eclairage                    | + 986        | -              | + 986          | -              |
| Occupants                    | + 198        | + 352          | + 198          | + 352          |
| Apports Solaires             | -            | -              | + 526          | -              |
| Apports par le plan d'eau    | + 431        | + 3 000        | + 431          | + 3 000        |
| <b>TOTAL avec occupation</b> | <b>+ 449</b> | <b>+ 3 352</b> | <b>+ 2 164</b> | <b>+ 3 352</b> |
| <b>TOTAL sans occupation</b> | <b>- 735</b> | <b>+ 3 000</b> | <b>+ 725</b>   | <b>+ 3 000</b> |

### Sélection du système monobloc de déshumidification :

MERNERGA Thermocond Série 29-11-11 :

- Puissance de déshumidification : 4,9 kg/h
- Débit nominal de soufflage : 1 100 m<sup>3</sup>/h
- Efficacité de l'échangeur : 70 %

### Bilans du hall piscine :

Bilan enthalpique :  $H_0 = qm_{as} \times (h_i - h_s)$

Bilan hydrique :  $M = qm_{as} \times (r_i - r_s)$

Pour chaque cas de fonctionnement du système de déshumidification, il faut déterminer la droite d'évolution de l'air dans le hall et les conditions de soufflage.

### Cycle Hiver avec occupation :

Bilan des charges :

$$\begin{array}{lcl} H_{sens} & : & + 449 \text{ W} \\ H_{lat} & : & 3\,352 \text{ W} \\ M & : & 4,8 \text{ kg/h} \end{array}$$

Air Neuf hygiénique : 22 m<sup>3</sup>/h.pers

88 m<sup>3</sup>/h

Le taux d'air neuf minimum devra être de  $88/1\,100 \times 100 = 8 \%$

#### Conditions de soufflage :

$$M = qm_{as} \times (r_i - r_s) \quad \text{Avec } qm_{as} = qv_{as} / v_s$$

Comme on ne connaît pas le volume spécifique de soufflage, on prendra en première approximation  $v_l = 0,87 \text{ m}^3/\text{kg}_{as}$ .

$$qm_{as} = qv_{as} / v_l$$

0,35 kg<sub>as</sub>/s

D'où  $r_s = r_l - M / qm_{as}$

10,7 10<sup>-3</sup> kg<sub>e</sub>/ kg<sub>as</sub>

Les charges sensibles étant très faibles, l'écart de soufflage sera faible :

$$H_{sens} = qm_{as} \cdot Cp_{as} \cdot \Delta\theta$$

$$\text{Soit un écart de soufflage de } \Delta\theta = H_{sens} / (qm_{as} \cdot Cp_{as}) \rightarrow 1,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Donc } \theta_s = 25,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

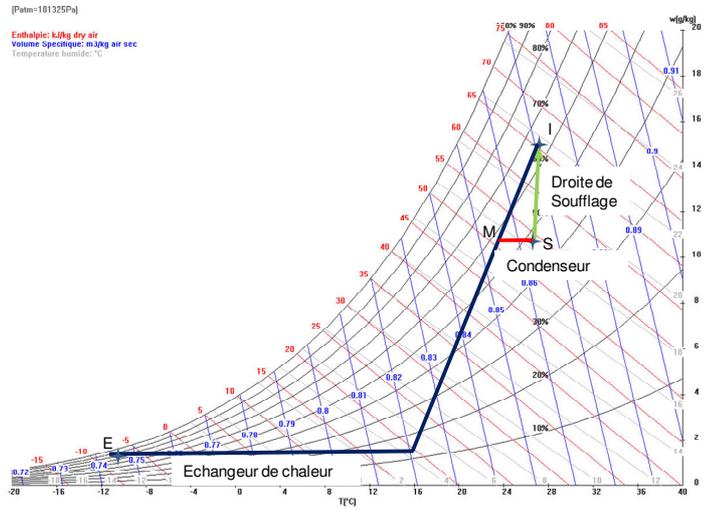
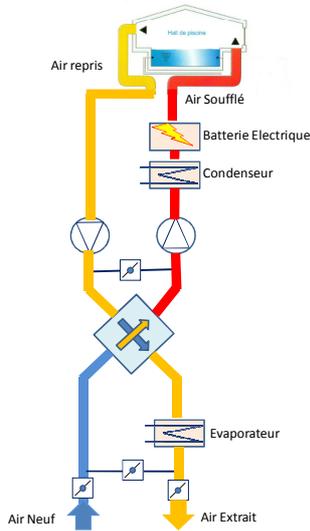
Dans ce cas de figure, pour obtenir les conditions de soufflage, il faut augmenter le taux d'air neuf à 30 % et ensuite utiliser le condenseur pour compléter la déshumidification.

Détermination du point A, en sortie d'échangeur :

$$\text{Efficacité de l'échangeur : } \varepsilon = \frac{\theta_A - \theta_E}{\theta_I - \theta_E} \quad \text{Donc } \theta_A = \varepsilon \cdot (\theta_I - \theta_E) + \theta = 15,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

**Tableau récapitulatif des points caractéristiques :**

| Points | $\theta$ (°C) | $\phi$ (%) | $r$ (g <sub>e</sub> /kg <sub>as</sub> ) | $h$ (kJ/kg <sub>as</sub> ) |
|--------|---------------|------------|-----------------------------------------|----------------------------|
| I      | 27            | 65         | 14,5                                    | 64                         |
| E      | -11           | 90         | 1,5                                     | - 7,5                      |
| S      | 25,7          | 49         | 10,7                                    | 54                         |
| M      | 23,5          | 58         | 10,7                                    | 50                         |
| A      | 15,6          | 13         | 1,5                                     | 20                         |



**Cycle Hiver sans occupation :**

Dans ce cas de fonctionnement, il n'est pas nécessaire d'introduire de l'air neuf. La déshumidification sera assurée uniquement par l'évaporateur du système monobloc puis par le condenseur. L'allure de l'évolution sur le diagramme d'air humide est donnée ci-après :

Bilan des charges :

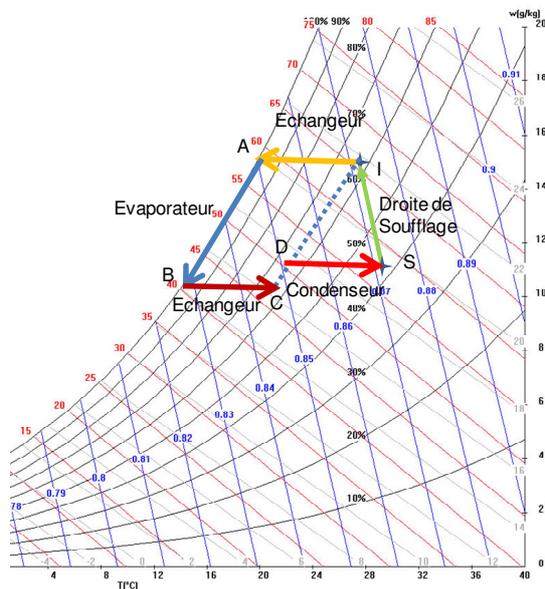
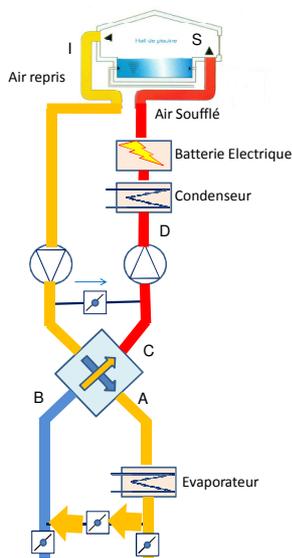
$$\begin{aligned}
 H_{\text{sens}} &: & - 735 \text{ W} \\
 H_{\text{lat}} &: & 3\,000 \text{ W} \\
 M &: & 4,3 \text{ kg/h}
 \end{aligned}$$

Détermination des conditions de soufflage :  $r_s = r_1 - M / q_{m_{as}} = 11,1 \cdot 10^{-3} \text{ kg}_e / \text{kg}_{as}$

Ecart de soufflage :  $H_{\text{sens}} = q_{m_{as}} \cdot C_{p_{as}} \cdot \Delta\theta$

Soit un écart de soufflage de  $\Delta\theta = H_{\text{sens}} / (q_{m_{as}} \cdot C_{p_{as}}) = - 2,1 \text{ °C}$

Le tracé du cycle dans le système monobloc est représenté par les évolutions suivantes :



**Cycle Été avec occupation :**

Bilan des charges :

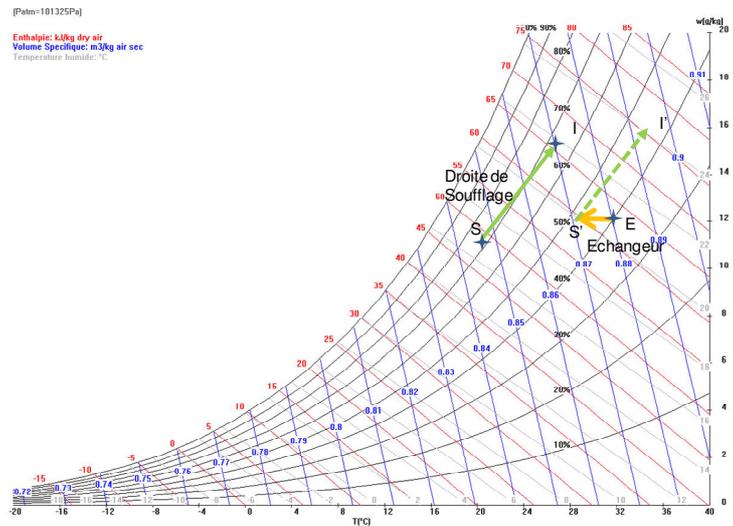
|            |   |          |
|------------|---|----------|
| $H_{sens}$ | : | 2 164 W  |
| $H_{lat}$  | : | 3 352 W  |
| $M$        | : | 4,8 kg/h |

Détermination des conditions de soufflage :  $r_s = r_i - M / qm_{as} = 10,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg}_e / \text{kg}_{as}$

Ecart de soufflage :  $H_{sens} = qm_{as} \cdot Cp_{as} \cdot \Delta\theta$

Soit un écart de soufflage de  $\Delta\theta = H_{sens} / (qm_{as} \cdot Cp_{as}) = 6,2 \text{ }^\circ\text{C}$

D'après la documentation du constructeur, la déshumidification en été est assurée uniquement par l'introduction d'air neuf qui traverse l'échangeur. Dans ces conditions, la température intérieure, ne sera pas contrôlée. Le point de soufflage calculé se trouve en S, or nous utilisons uniquement la ventilation (économie d'énergie), donc le point de soufflage réel se situera en S'. On peut observer une augmentation de la température intérieure. Le cycle d'évolution de l'air dans le système monobloc est représenté sur le diagramme suivant :



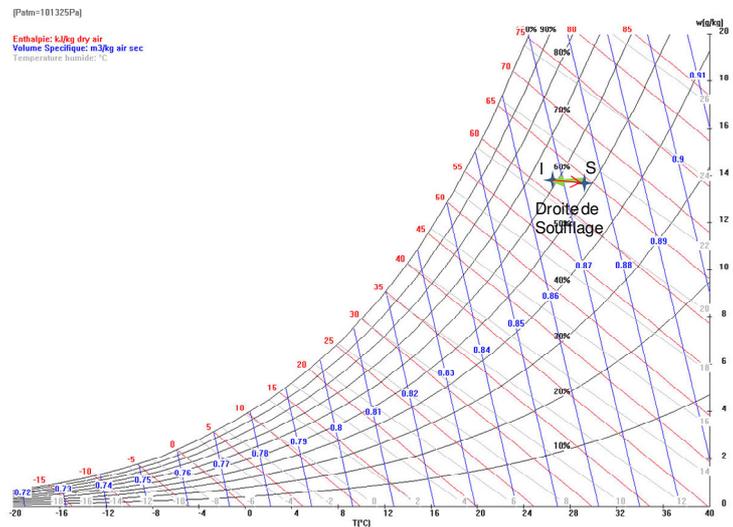
**Cycle de chauffage par recyclage uniquement :**

Dans ce mode de fonctionnement, la batterie chaude électrique compense uniquement les déperditions. Ce mode peut être envisagé, lors des phases de nettoyage du bassin, ou lors de périodes d'inoccupation avec un bassin couvert, pour éviter les apports d'humidité.

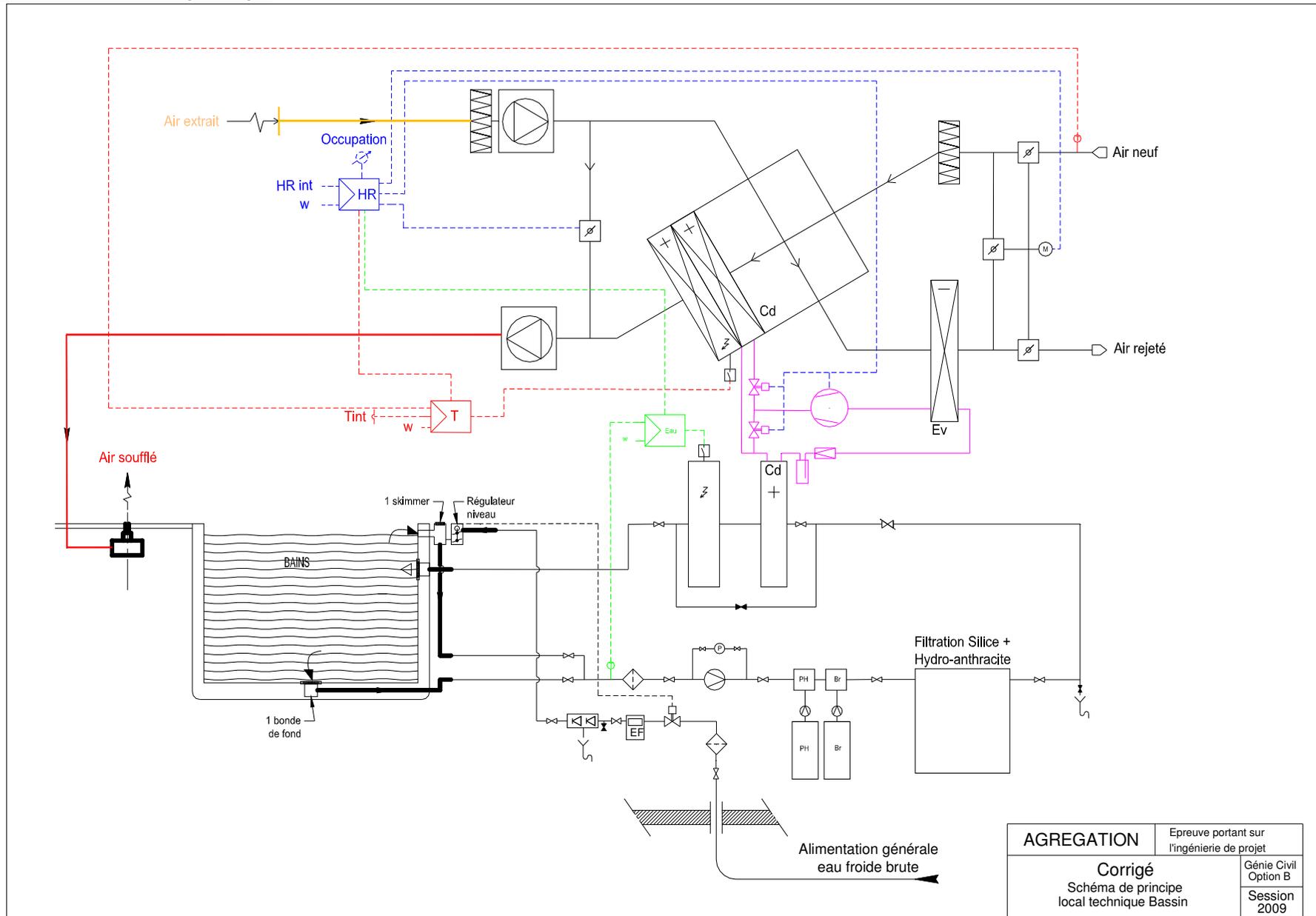
Bilan des charges :  $H_{sens} : - 1 166 \text{ W}$

Ecart de soufflage :  $H_{sens} = qm_{as} \cdot Cp_{as} \cdot \Delta\theta$

Soit un écart de soufflage de  $\Delta\theta = H_{sens} / (qm_{as} \cdot Cp_{as}) = 3,4 \text{ }^\circ\text{C}$



**Question 2 : Schéma de principe**



|                                              |                                               |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>AGREGATION</b>                            | Epreuve portant sur<br>l'ingénierie de projet |
| <b>Corrigé</b>                               |                                               |
| Schéma de principe<br>local technique Bassin |                                               |
| Génie Civil<br>Option B                      | Session<br>2009                               |

## Partie 6 : Solaire Photovoltaïque

### Question 1 : Implantation

L'implantation demandée consiste à dessiner sur la feuille réponse l'encombrement des panneaux solaires photovoltaïques. Il est alors possible de prévoir 2 capteurs équipés chacun de 18 modules.

En vue de dessus, il faut tenir compte de l'angle d'inclinaison de 30 ° des châssis.

Dimensions d'un module : 1 593 x 790 (mm)

Longueur capteur : 6 x 1593 = 9 558 mm = 9,56 m

Hauteur capteur : 3 x 790 = 2 370 mm = 2,37 m

**Encombrement des capteurs en terrasse :** longueur : 9,56 m  
Largeur : 2,37 x cos 30° = 2,05 m

Ce montage sur châssis peut se faire sur terrasse sans modification des éléments déjà implantés (traînage de ventilation).

### Question 2 : Production d'électricité des panneaux photovoltaïques

D'après l'extrait RT 2005 :

$$E_{PV} = H_i \cdot P_o \cdot R_p$$

$$H_i = H_{\text{horiz,zone}} \times F_T$$

$$H_{\text{horiz,zone}} = 1150 \text{ kWh/m}^2 \text{ (dépt 21, Bourgogne), zone PV4.}$$

D'après le tableau de FT, en zone PV4, l'inclinaison de 30 °, orientation Sud, donne  $F_T = 1,11$ .

$$P_o = 165 \text{ W par module} \times 36 = 5760 \text{ W} = \mathbf{5,76 \text{ kWc}}$$

$$R_p = 0,80 \text{ (module très ventilé sur châssis en toiture)}$$

$$\mathbf{E_{PV} = 1150 \times 1,11 \times 5,760 \times 0,8 = 5 882 \text{ kWh.}}$$

Incidence sur la valeur du coefficient Cep du bâtiment A :

D'après l'étude, l'installation du champ de panneaux photovoltaïques aura comme conséquence une diminution de 15 175 kWhep (2,58 x 5 882) sur le coefficient Cep du bâtiment A.

### Question 3 : Couplage des modules à l'onduleur

D'après les caractéristiques techniques des modules photovoltaïques BP 3160 :

Puissance nominale d'un module : 160 Wc

$$\rightarrow \text{Puissance totale installée} = 160 \times 18 \times 2 = 5760 \text{ Wc.}$$

$$V_{co} = 44,2 \text{ V (à } 25 \text{ °C)} \quad (\text{tension à vide})$$

$$I_{cc} = 4,8 \text{ A} \quad (\text{courant de court circuit})$$

Le point de puissance maximale est défini par :

$$V_{ppm} = 35,1 \text{ V} \quad (\text{à } 25 \text{ °C)}$$

$$I_{ppm} = 4,6 \text{ A}$$

Coefficient de Température de  $V_{co}$  : - (160 ± 20) mV/K

Sélection du modèle d'onduleur **SMC 5000 A** d'une puissance d'entrée max de 5 750 W

Caractéristiques techniques de l'onduleur :

$$\text{Plage de tension PV, MPPT : } 246 - 480 \text{ V} \quad (U_{PV\text{inf}} = 246 \text{ V}, U_{PV\text{sup}} = 480 \text{ V})$$

$$\text{Tension DC max : } U_{\text{maxDC}} = 600 \text{ V}$$

$$\text{Courant d'entrée max : } 26 \text{ A}$$

$$\text{Nb max de strings (chaînes en parallèle) de l'onduleur : } 4$$

Détermination des caractéristiques des modules photovoltaïques sur la plage de -10 à 70 °C :

$$V_{co (-10^{\circ}\text{C})} = 44,2 - (-0,16 \times 35) = 49,8 \text{ V}$$

$$V_{co (70^{\circ}\text{C})} = 44,2 + (-0,16 \times 45) = 37 \text{ V}$$

Tension au point de puissance maximale:

$$V_{ppm (-10^{\circ}\text{C})} = 35,1 - (-0,16 \times 35) = 40,7 \text{ V}$$

$$V_{ppm (+70^{\circ}\text{C})} = 35,1 + (-0,16 \times 45) = 27,9 \text{ V}$$

Détermination du nombre de modules en série :

$$\text{nb modules max} = U_{PVsup} / V_{ppm (-10^{\circ}\text{C})} = 480 / 40,7 = 11,79$$

$$\text{nb modules min} = U_{PVinf} / V_{ppm (-70^{\circ}\text{C})} = 246 / 27,9 = 8,81$$

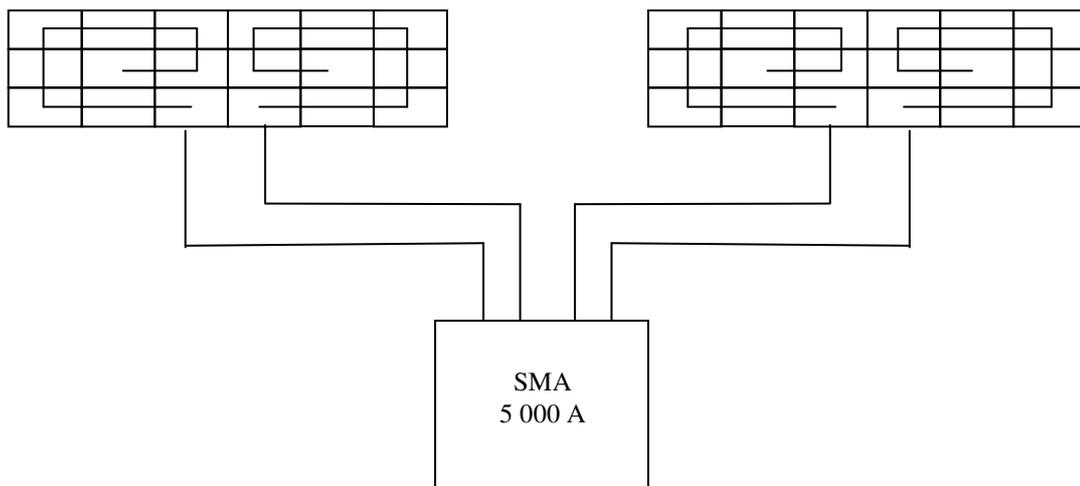
Vérification de la tension à vide :

$$n \text{ max modules} = U_{maxDC} / V_{co (-10^{\circ}\text{C})} = 600/49,8 = 12,04$$

Donc le nombre de modules doit être compris entre 8,81 et 11,79 soit en 9 et 11 modules en série.

Vu le nombre total de modules (36), il faut prévoir **4 strings** (chaînes) de 9 modules en série.

Vérification du courant maximal des 4 strings :  $I_{ppm} = 4,6 \times 4 = 18,4 \text{ A} < 26 \text{ A}$  donc possible.



## **Commentaire du jury Projet Ingénierie Option B**

### **Partie 1. Etude économique et environnementale de la chaufferie mixte**

La consommation globale annuelle pour le chauffage et la production d'ECS a été déterminée, mais les parts relatives couvertes par la chaudière biomasse et la chaudière fioul n'ont été déterminées de manière correcte que par un seul candidat.

Le jury attendait une analyse plus pertinente en tenant compte des scénarios de fonctionnement indiqué dans le CCTP ( $T^{\circ} > 14^{\circ}\text{C}$  → chaudière fioul seule, si  $T < 14^{\circ}\text{C}$ , chaudière biomasse et fioul en complément).

Connaissant les puissances des chaudières, les déperditions du bâtiment et la puissance installée en ECS, il fallait déterminer jusqu'à quelle température la chaudière biomasse pouvait assurer seule le chauffage.

L'argumentaire économique et environnemental a été mieux réussi. Cependant, il n'y a pas eu de distinction entre énergie utile et énergie consommée, ce qui fausse les données chiffrées.

### **Partie 2. Conception de la chaufferie**

Les candidats ont dans l'ensemble assez mal réussie cette partie. Les schémas de principe sont très médiocres, la présentation est déplorable. Le réseau primaire ne répondait pas aux exigences du CCTP. Il fallait nécessairement présenter une V3V sur le retour de la chaudière biomasse de manière à avoir une  $T^{\circ}$  retour minimale de  $68^{\circ}\text{C}$ . La plupart des réponses ne comportaient pas de régulation. A noter aussi qu'il manquait souvent des équipements de sécurité et des éléments nécessaires au bon fonctionnement (manomètres, thermomètres, vannes d'arrêt, traitement d'eau). Sur les réseaux secondaires, le jury a relevé des erreurs de montage de V3V et des bipasses fixes mal placés (il en fallait un sur le circuit plancher chauffant uniquement).

La régulation de la cascade des chaudières a été très peu traitée, et pour l'ensemble des copies hors sujet. Il était attendu une description des étapes de mise en marche d'une chaudière dans un premier temps, puis dans un deuxième temps la réalisation d'un chronogramme en fonction du temps de démarrage de la chaudière bois.

### **Partie 3. Etude de la combustion et de la pollution atmosphérique**

Les questions 1 et 2 ont été traitées. L'excès d'air n'a pas été déterminé d'après les données avancées par les fabricants (à savoir le taux d' $\text{O}_2$  ou de  $\text{CO}_2$ ), or cela était nécessaire pour déterminer le débit de fumées.

La moitié des candidats a donné la liste des polluants les plus courants, les effets sur la santé ou sur l'environnement sont dans l'ensemble bien évoqués.

#### **Partie 4. Production ECS solaire pour les bâtiments d'hébergement**

Cette partie a été traitée par 15 candidats /19. Le sujet comportait un document de guidance pour compléter la feuille de calcul, rendant la partie abordable même sans connaissance préalable de cette méthode de calcul simplifiée. Les calculs parfois trop longs, auraient dû être réduits aux résultats d'un panneau puis 5 panneaux seulement.

La notion de couverture solaire est maîtrisée, mais des erreurs de calcul n'ont pas permis de déterminer un nombre de capteurs optimum pour beaucoup de candidats.

#### **Partie 5. Traitement d'air du hall Bassin**

Cette partie a été très mal traitée. Les candidats ont manqué de clarté dans le calcul des déperditions et des charges été avec ou sans occupation.

Une erreur courante sur la détermination de la pression de vapeur à 65 % d'humidité relative et non pas à 100 %, a entraîné des résultats faux sur la génération de vapeur d'eau au dessus du bassin.

Le système monobloc de déshumidification et ses 4 modes de fonctionnement ont été mal compris, la présence d'un échangeur double n'a pas été respectée pour les tracés sur les diagrammes d'air humide.

#### **Partie 6. Solaire photovoltaïque**

L'implantation des capteurs a été traitée par 7 candidats sur 19 seulement. Il fallait déterminer la position des 36 modules sur la terrasse, sans modifier les réseaux déjà en place équipant le bâtiment (traînage de VMC).

La quantité d'électricité produite à l'aide des règles RT 2005, a bien été déterminée par les candidats. La conséquence sur la valeur du coefficient Cep du bâtiment A, a aussi été déterminée.

Le couplage des modules photovoltaïques à l'onduleur n'a été traité que partiellement par 6 candidats, il fallait proposer 4 chaînes (strings) constituées chacune de 9 modules en série. Il fallait ensuite vérifier si les tensions à vide sur la plage de température (-10 à 70°C) étaient admissibles pour l'onduleur.

CONCOURS AGREGATION EXTERNE DE GENIE CIVIL – SESSION 2009  
ORAL D'ADMISSION  
EPREUVE DE DOSSIER  
Commentaires du jury

Le jury a apprécié les dossiers pertinents, actuels prenant en compte les enjeux de la construction tant dans les domaines des matériaux, des techniques de construction, d'équipements techniques du bâtiment, et du développement durable. Toutefois le jury a noté, tant sur le fond que sur la forme, un certain nombre d'insuffisances comme :

- l'introduction générale ne doit pas occulter l'environnement général de l'ouvrage (Situation et contraintes, acteurs, etc.).
- des dossiers trop anciens qui font appel à des règlements ou des techniques obsolètes,
- des dossiers déjà présentés par les candidats les années précédentes avec les mêmes études,
- des supports techniques inadaptés, à la marge de la construction BTP même prise au sens large et ne permettant pas une exploitation pédagogique centrée dans les programmes,
- des supports techniques riches, exploités de façon très limitée : soit uniquement sous l'aspect calcul de structure, soit uniquement du point de vue des méthodes.
- des justifications hors sujet par rapports aux phénomènes physiques abordés ou menées à partir de règlements anciens,
- des modélisations parfois complexes de phénomènes physiques n'aboutissant qu'à des évidences,
- des dossiers remplis de fautes d'orthographe, fautes que l'on retrouve souvent sur les diapositives de présentation orale,
- les hypothèses nécessaires à la mise en œuvre d'outils de calculs informatiques ne sont pas suffisamment explicites et sont même souvent inexistantes,
- une mauvaise utilisation du temps d'exposé (parfois plus faible),

Le jury rappelle une nouvelle fois que la durée maximum de l'exposé est de 40 mn et doit comporter trois temps forts : la présentation du dossier support, le développement d'un point scientifique ou technique, l'exploitation pédagogique.

Le jury regrette enfin que peu de dossiers fassent référence aux aspects environnementaux et aux évolutions associées tant dans les domaines de la conception, que dans ceux de la construction, de la maintenance et même de la déconstruction.

## LEÇON A CARACTERE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE

L'esprit de cette épreuve est de traiter d'un sujet à un niveau défini, avec ses aspects transversaux en évitant le cloisonnement des spécialités du génie civil (durabilité et structure, économies d'énergie et transferts de chaleur, géotechnique et RDM, etc.).

Le jury doit pouvoir apprécier d'une part le spectre large des connaissances scientifiques et techniques du candidat et d'autre part la capacité pédagogique du candidat à transmettre un point particulier, avec précision et rigueur, afin que l'exposé ne reste pas général et superficiel.

Le jury déplore que trop de candidats se soient présentés aux épreuves orales avec un niveau trop faible et manifestement sans préparation spécifique. Il rappelle que les oraux comptent pour la moitié de la note.

### 1- LE CONTENU DE LA LEÇON

Deux types de sujets sont proposés à chaque tirage :

- des leçons « thématiques » correspondant à la spécialisation choisie par le candidat au moment des épreuves écrites ;
- des leçons « mixtes », élaborées par le jury en cohérence avec le contenu du programme des épreuves communes de l'écrit.

Les indications complémentaires fournies dans la feuille de sujet ont un caractère indicatif. L'exposé peut intégrer les éléments du dossier mais peut être élargi à d'autres exemples. Il n'est pas nécessaire d'utiliser l'ensemble des éléments du dossier. Le recours à d'autres documents de la bibliothèque de la salle préparatoire est non seulement autorisé, mais vivement recommandé.

Les leçons doivent être construites en faisant référence aux connaissances spécifiques à l'option, à la culture scientifique et technologique générale.

S'agissant du contenu de la leçon le jury attend :

- une présentation et une description des phénomènes physiques sur lesquels porte la leçon adaptées au niveau requis : trop de candidats ne traitent que des modèles, dans le but d'arriver à un résultat, sans expliquer le phénomène physique en question et les principes physiques sous-tendant le modèle qui est utilisé ;
- un formalisme théorique solide précisant notamment les hypothèses et les domaines d'applications, des notations rigoureuses, les unités ;

### 2 – L'ASPECT PEDAGOGIQUE

Le jury rappelle que la leçon vise à apporter des savoirs nouveaux. Elle doit être clairement structurée autour de ces objectifs, qui doivent être en nombre limité. La leçon doit présenter un relief mettant en exergue les savoirs fondamentaux qu'elle vise à transmettre. Les analyses faisant appel à la physique, démonstrations ou exemples ne sont pas des buts en soit mais sont mis au service des objectifs principaux.

L'aspect pédagogique de la leçon (adaptation au niveau des élèves, gestion du tableau et des documents, orthographe ...) est essentiel. Le jury rappelle que dans la première partie de l'épreuve, il s'agit d'une leçon destinée à des élèves de niveau baccalauréat ou à des étudiants de niveau bac+2. Le candidat fera attention à définir systématiquement et rigoureusement les grandeurs physiques, les noms des coefficients et paramètres, les unités, les hypothèses...

Le candidat doit présenter une leçon où les apports de connaissance sont réels avec une présentation structurée.

Il doit éviter de se limiter à exposer des généralités ou des calculs répétitifs sans intérêt. Il doit également éviter la facilité qui consiste à rejeter «au cours suivant ou dans les années d'études supérieures», les notions plus difficiles à exposer.

Le jury attend :

- des leçons structurées avec des objectifs bien définis et des plans cohérents ;
- des présentations équilibrées entre les aspects scientifiques et technologiques; les défauts en particulier constatés sont soit l'abus de généralités, soit l'utilisation de modèles sans relation à la physique, soit la présentation de catalogues de solutions technologiques,
- des exemples concrets permettant des mises en situation et des déclinaisons technologiques à la fois pertinentes, créatives et attractives ;
- du candidat une présentation dynamique s'adressant à un jury et non à des élèves virtuels. Il est donc inutile d'interpeler le jury ou de lui distribuer des documents pédagogiques.

A noter que des candidats ont fait l'erreur de « dire la façon dont ils feraient la leçon » et non de « faire la leçon ».

### **3 – L'ENTRETIEN**

Le questionnement du jury permet d'approfondir des questions scientifiques et technologiques aussi bien que pédagogiques. Il met parfois en évidence l'absence ou le défaut de maîtrise de certains points énoncés comme des évidences lors de l'exposé. Certains candidats ont à l'inverse développé leur propos de manière très satisfaisante, corrigeant le manque de confiance dans l'exposé initial (situation bien compréhensible en cette occasion).

L'entretien permet également au jury de revenir sur des erreurs faites par les candidats dans leur présentation.

L'attitude des candidats face à leurs erreurs est variable : soit il y a une prise de conscience de l'erreur, de son acceptation et son auto-correction, soit une persistance dans l'erreur en argumentant improprement avec une certitude parfois déconcertante pour le jury. L'attitude passive et consentante n'est pas non plus celle attendue d'un futur enseignant.

### **4- BILAN**

Nombre de candidats présents : 28  
Moyenne des candidats admis : /20  
Ecart-type des candidats admis :

# Agrégation de génie civil

Concours externe

Session 2009

## *Epreuves orales d'admission*

### 3 - Travaux pratiques de laboratoire et de mise en œuvre

#### 3.1 – LISTE DES TRAVAUX PRATIQUES

**Option A : matériaux, ouvrages et aménagements**

| Intitulé                                           |
|----------------------------------------------------|
| Poutre en flexion                                  |
| Poutre hyperstatique                               |
| Poutre cantilever                                  |
| Flexion composée                                   |
| Portique hyperstatique                             |
| Utilisation d'un niveau de chantier                |
| Utilisation d'un théodolite                        |
| Caractérisation d'un sol fin                       |
| Caractérisation d'un sable à béton                 |
| Caractérisation d'un matériau de remblai           |
| Flexion d'une poutre en Lamellé Collé (Rupture)    |
| Flexion d'une poutre en bois LNC et LC             |
| Flexion d'une poutre en béton précontraint         |
| Flexion d'une poutre en béton armé                 |
| Coffrage d'un plancher                             |
| Coffrage d'un voile                                |
| Arrangement granulaire                             |
| Etat frais du mortier                              |
| Résistance d'un mortier                            |
| Caractérisation d'un ciment                        |
| Cisaillement direct des sols                       |
| Hydraulique des sols                               |
| consolidation des sols                             |
| Comportement mécanique des sols par essai triaxial |

**Option B : équipements et énergies**

| Intitulé                               |
|----------------------------------------|
| Calorimétrie                           |
| Échangeur de chaleur                   |
| Conduction                             |
| Pompe à chaleur                        |
| Protection électrique dans le bâtiment |
| Traitement de l'air                    |
| Circuit aéraulique                     |

|                        |
|------------------------|
| Circuit hydraulique    |
| Mesure des débits      |
| Acoustique du bâtiment |
| Photométrie            |
| Eclairage d'une salle  |
| Rayonnement            |
| Pertes de charges      |

### 3.2 –DEROULEMENT DE L'EPREUVE

Rappels sur le déroulement attendu de l'épreuve

- 30 mn de manipulation devant le jury et exploitation au plus haut niveau des expérimentations réalisées.
- 15 mn de présentation de l'exploitation et insertion pédagogique
- 15 mn d'entretien avec le jury.

Durant l'épreuve, **le candidat doit être capable d'expliquer au plus au niveau les concepts scientifiques et techniques sur lesquels reposent les expérimentations.**

Le jury prend en compte dans l'évaluation le choix de l'expérimentation par le candidat en fonction du sujet proposé (ce choix conditionne le niveau scientifique et technique).

Les candidats n'ont pas toujours répondu aux attentes du jury :

- Les candidats ont dans l'ensemble bien respecté le temps consacré à la présentation des résultats de l'expérimentation, par contre l'exploitation pédagogique est souvent succincte et limitée à quelques minutes. Cela doit dépasser la simple insertion dans un référentiel.
- Les candidats doivent s'efforcer de manipuler devant le jury, globalement cette session les candidats ont bien respectés cette consigne. Les connaissances de base nécessaires à l'exploitation de la manipulation doivent être rappelées rapidement et le candidat doit consacrer l'essentiel de son temps à la l'expérimentation et l'exploitation des résultats obtenus dans la préparation. Il est inutile et déconseiller de détailler les différents éléments de base car les candidats s'adressent à un jury d'experts et non à des élèves (l'épreuve n'est pas une leçon !)
- Pour une majorité des candidats, la présentation des possibilités pédagogiques reste trop succincte ;
- Rappelons que cette épreuve n'est pas une leçon de laboratoire devant des élèves mais une manipulation et exploitation devant un jury d'experts (se limiter à l'écriture au tableau en temps réel des éléments essentiels à la compréhension et l'exploitation) .
- Bien définir l'objectif de l'expérimentation en introduction
- Beaucoup de candidat n'ont pas eu la rigueur suffisante dans les manipulations.

### 3.3 - BILAN

Nombre de candidats présents : 28

Moyenne des candidats admis : 12,00/20