



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 2010

AGREGATION

Externe

Section génie civil

Rapport de jury présenté par M. Christophe PETIT
Président de jury
Professeur des Universités

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

AGREGATION GENIE CIVIL EXTERNE

Session 2010

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

Gilles BERTAINA, Chargé de recherches, CETE, Lyon.

Didier BODIN, Chargé de recherches, LCPC, Nantes.

Frédéric BOS, Professeur des Universités, IUT Bordeaux 1

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

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

Didier HENNETIER Professeur agrégé à l'IUT de St Nazaire

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 p.1
- Eléments de correction et rapport sur le sujet Modélisation des ouvrages p. 20

EPREUVE 2 : Mécanique des sols et qualité des ambiances

- Eléments de correction et rapport sur le sujet Mécanique des sols p. 34
- Eléments de correction et rapport sur le sujet Qualité des ambiances p. 50

EPREUVE 3 : Projet A

- Eléments de correction et rapport du jury p. 69

EPREUVE 3 : Projet B

- Eléments de correction et rapport du jury p. 93

ADMISSION

EPREUVE DE DOSSIER p. 118

- Rapport du jury

EPREUVE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE p. 120

- Rapport du jury

EPREUVE DE LABORATOIRE p. 123

- Rapport du jury

Présentation générale

Il s'agit d'un concours couvrant un large domaine de compétences de haut niveau scientifique, technique et technologique à démontrer dans un temps limité. Les échelles de notes permettent de bien classer les candidats. Les données statistiques sur les moyennes de notes des précédentes sessions sont destinées à permettre aux candidats de situer leur niveau relatif.

Douze postes étaient offerts au concours en 2010 comme en 2009, ils ont tous été pourvus. 55 candidats ont composé au moins une épreuve. Sur l'ensemble des candidats la moyenne obtenue était de 5,76/20. 27 candidats ont été déclarés admissibles, la moyenne des épreuves écrites des candidats admissibles est de 8,60/20 (8,43 en 2009, 8,18 en 2008), le dernier admissible a obtenu 5,94/20 (4,67/20 en 2009).

La moyenne des épreuves d'admission obtenues par les 26 candidats présents est de 8,79/20 (8,99 en 2009), celle des 12 candidats admis est de 11,35/20 (11,81 en 2009).

La moyenne obtenue aux épreuves écrites et orales du concours de l'agrégation par les 26 candidats présents est de 8,41/20 (8,70 en 2009), celle des 12 admis de 10,64/20 (11,14 en 2009).

D'une manière générale, en 2010 les candidats n'ont pas traité une partie des épreuves écrites. Pour la session 2011, les membres du jury renouvellent le conseil 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 ont eu lieu pour la première fois 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

Le sujet proposé comprend deux parties indépendantes. Dans une première partie (partie A), un maître d'œuvre se propose d'évaluer les performances du matériau bois pour la réalisation d'un pont. La seconde partie (Partie B) porte sur le comportement des chaussées bitumineuses sous l'effet de la température.

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 les résultats obtenus.

Partie A – Evaluation structurelle et environnementale d'un tablier de pont

Un maître d'œuvre, se proposant de répondre à l'appel d'offre de conception d'un pont routier, s'interroge sur les matériaux les plus appropriés vis-à-vis de critères structurel et environnemental.

Choix du matériau pour la sollicitation de flexion

Sur le plan structurel, le problème posé est de minimiser la masse de l'ouvrage car celui-ci doit être préfabriqué. Le maître d'œuvre recourt alors à la méthode développée par Ashby pour son analyse.

Celle-ci permet de déterminer les matériaux adaptés à des performances données. Cette méthode est mise en application ici pour la flexion 3 points. On considère une poutre rectangulaire sur 2 appuis simples, de longueur L , de hauteur h et de largeur b , sollicitée en flexion dans son plan sous l'action d'une force F centrée. La force, la longueur et la largeur sont fixées. La hauteur h est variable. L'aire de la section vaut $S = b \cdot h$. Le matériau constitutif de la poutre a une masse volumique ρ . Le problème a pour objectif de chercher le matériau qui minimisera la masse de la poutre pour une flèche n'excédant pas d_m .

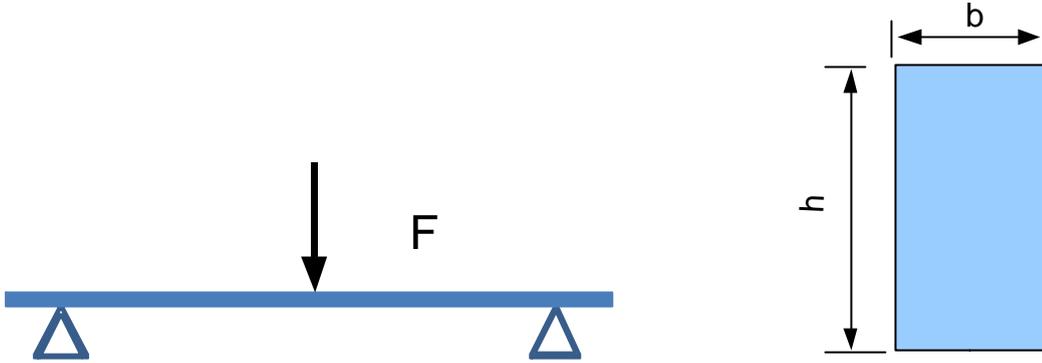
A1) Exprimer S en fonction de la masse de la poutre, m , sa longueur, L , et la masse volumique, ρ , du matériau.

Réponse : $S = m / (\rho L)$

A2) A partir de la condition $d < d_m$ montrer que l'expression de la masse m peut s'écrire sous la forme de la fonction objectif suivante :

$$m > \frac{f(F, L, b, \mathbf{d}_m)}{\frac{\sqrt[3]{E}}{\mathbf{r}}}$$

Réponse :



h variable, b fixé

objectif : m le plus faible

contraintes : L, b, F, δm spécifiées

$$\mathbf{d}_m \geq \frac{12Fl^3}{kEb^3} = \frac{12Fb^2}{k} \frac{L^6}{ES^3L^3} = \frac{12Fb^2}{k} \frac{L^6}{E \left(\frac{m}{\mathbf{r}} \right)^3} \text{ avec } k=48 \text{ [flèche} = FL^3/(48EI) \text{ avec } I = bh^3/12]$$

$$m = \frac{12Fb^2}{k} \frac{L^6}{\mathbf{d}_m} \frac{1}{\frac{\sqrt[3]{E}}{\mathbf{r}}}$$

$$m \geq \frac{12Fb^2}{k} \frac{L^6}{\mathbf{d}_m} \frac{1}{\frac{\sqrt[3]{E}}{\mathbf{r}}} = K \cdot \frac{1}{\frac{\sqrt[3]{E}}{\mathbf{r}}}$$

A3) Traduire l'objectif en une condition sur les propriétés du matériau à sélectionner.

Réponse :

$$s_f = \frac{3 Fl}{2 bh^2} = \frac{3F}{2} \frac{bL^2}{b^2 h^2 L^2} = \frac{3F}{2} \frac{bL^2}{m^2}$$

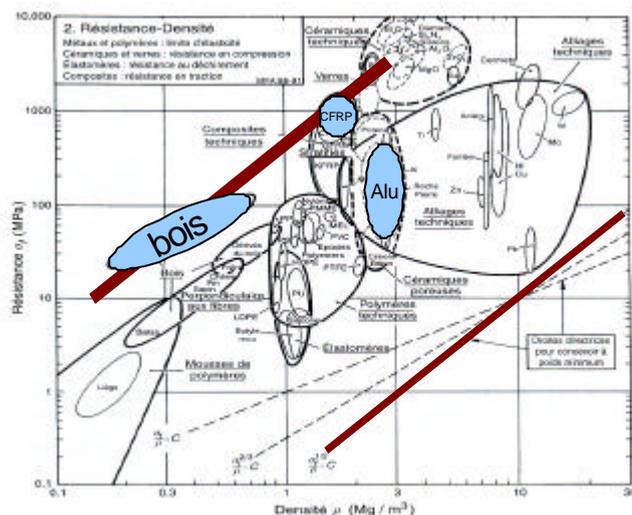
$$m^2 \geq \frac{3F}{2} \frac{bL^2}{s_f}$$

$$m \geq \left(\frac{3F}{2} bL^2 \right)^{0.5} \frac{1}{\sqrt{s_f}}$$

A6) Traduire l'objectif en une condition sur les propriétés du matériau à sélectionner.

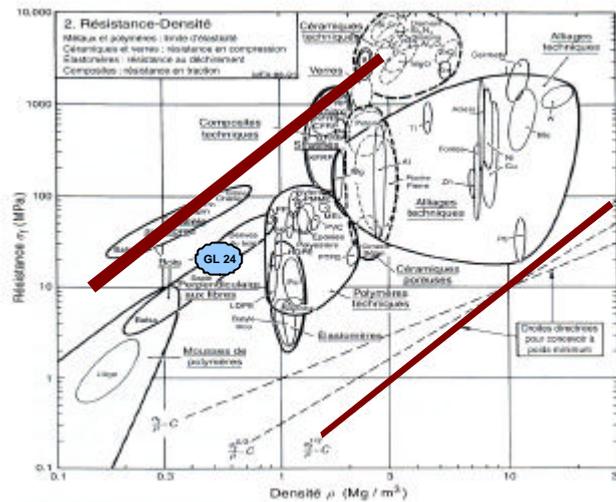
Réponse : De la même manière que précédemment, il faut maximiser la quantité $\frac{\sqrt{s_f}}{r}$

A7) Montrer à l'aide de l'abaque joint (fig. 2) que le bois est aussi performant que les composites de verre (notés GFRP) et plus performant que les alliages d'aluminium.



A8) Placer le point relatif au bois lamellé collé de classe GL 24 sur la fig. 2, et expliquer d'éventuelles différences avec les données de l'abaque.

Réponse : on voit sur l'abaque que le GL 24 (résistance en flexion de 24 MPa, densité de 0,5) se situe en dessous des courbes d'Ashby. Cela vient du fait qu' Ashby a introduit les résistances moyennes du bois sans défaut. La valeur de 24 MPa du GL24 est une résistance caractéristique (fractile de 5%) et non une résistance moyenne. De plus les défauts du bois diminuent également leurs résistances moyennes.



Evaluation environnementale simplifiée de la solution proposée

Le maître d'œuvre décide de retenir le bois comme matériau principal du tablier mais souhaite connecter une dalle en béton armé sur les poutres en bois lamellé collé. Il s'interroge alors sur l'impact environnemental de la solution en limitant son analyse à l'impact sur l'environnement de la phase de production des matériaux et de la phase de fin de vie de la structure, et en limitant les indicateurs aux émissions de gaz à effet de serre (GES) et à l'énergie consommée. Les émissions de GES sont comptées ici en masse équivalente de CO₂. L'objectif de l'étude est d'évaluer les impacts pour plusieurs scénarios de fin de vie.

A9) Donner les étapes de la vie de la structure dont il faudrait tenir compte pour réaliser une analyse de cycle de vie complète.

Réponses :

Les étapes du cycle de vie sont :

Production

Transport

Mise en œuvre

Vie en œuvre

Fin de vie

Les phases de transport interviennent à plusieurs étapes (entre matières premières et production, en fin de vie, par exemple). Ces étapes de transport sont comptabilisées (indirectement ou directement) en fonction des frontières de l'étude.

A10) Les émissions de GES pendant la phase de production du bois lamellé collé sont de $-0,48\text{t/m}^3$. La phase de production comprend le matériau, les opérations de sciage de l'arbre et toutes les étapes intermédiaires jusqu'à celle de l'encollage des lamelles et la réalisation des poutres. Expliquer la raison pour laquelle cette valeur est négative. Retrouve t'on approximativement cette valeur en considérant qu'une part représentant 49% du bois anhydre est constituée de carbone ? Données : on considère que la masse volumique d'un résineux à un taux d'humidité de 12% est de 450 kg/m^3 .

La valeur négative des GES dans la phase de production provient de carbone piégé par le bois pendant la croissance de l'arbre.

Pour une masse volumique de 450 kg/m^3 pour une humidité de 12%, la masse volumique anhydre

est alors :
$$r_a = \frac{r_h}{1 + w} = \frac{r_h}{1,12} = 402\text{ kg/m}^3$$

Masse de carbone par m^3 : $0,49 \cdot 402 = 197\text{ kg}$

Masse de CO_2 piégé par la croissance de l'arbre : $44/12 \cdot 197 = 722\text{ kg/m}^3$

Cette valeur est supérieure à celle considérée pour la phase de production du lamellé collé, car dans cette dernière, des émissions de CO_2 proviennent de l'exploitation de la forêt, des transports et des opérations de scieries, ainsi que des opérations pour la réalisation des poutres.

A11) Dans la phase de production du bois lamellé collé, le bilan de l'énergie totale est la somme de l'énergie non renouvelable et de celle renouvelable. L'énergie non renouvelable dépensée pour la production de bois lamellé collé est évaluée, dans la littérature, à 5500 MJ/m^3 , l'énergie totale à 19000 MJ/m^3 . La différence entre ces 2 valeurs étant l'énergie renouvelable. Expliquer les origines de l'énergie renouvelable prise en compte dans cette analyse.

Réponse : l'énergie renouvelable est celle que l'on pourrait obtenir en brûlant le bois dans une chaudière au lieu de l'utiliser dans une structure plus les parts renouvelables de l'énergie électrique et de chauffage utilisé dans la transformation du bois (copeaux et sciures sont réutilisés).

A12) Dans la phase de fin de vie, le scénario 1 consiste à enfouir le bois dans une décharge spécialisée, le scénario 2 à utiliser le bois comme source d'énergie calorifique. Pour le scénario 1, les études montrent que, seule, une partie du bois se dégrade, ce qui conduit à une émission de CO_2 (masse équivalente) de $0,2\text{ t/m}^3$ de bois lamellé collé. Dans le scénario 2, on décide de tenir compte de l'économie d'énergie fossile réalisée en brûlant le bois dans une chaudière à la place du gaz naturel, ainsi que de la différence de gaz carbonique émise. Pour chacun de ces scénarios, déterminer le bilan des émissions de CO_2 et d'énergie totale pour les phases de production et de fin de vie d'un mètre cube de bois lamellé collé. Analyser les résultats.

Données numériques

Pouvoir calorifique du bois : 7452 MJ/m³

Emissions de CO₂ pour la combustion du gaz naturel : 61 g/MJ

Emissions de CO₂ pour la combustion du bois : 100 g/MJ

Réponse :

En phase de fin de vie du bois pour le scénario 1 la masse de GES émise est la différence entre les émissions du bois et celles du gaz naturel, et ce pour la combustion d'un mètre cube de bois.

Soit $7452 \times (0,010 - 0,061) = 290,6$ kg de CO₂.

Pour l'énergie, en fin de vie du scénario 2 il faut compter celle récupérée par la combustion du bois.

Les tableaux ci-dessous résument les bilans.

Bois	émissions de CO2 (kgeq CO2/m3)		
	phase production	phase fin de vie	total
scénario 1	-480	200	-280
scénario 2	-480	290,6	-189,4

Bois	énergie (MJ/m3)		
	phase production	phase fin de vie	total
scénario 1	19000	0	19000
scénario 2	19000	-7452	11548

A13) Le maître d'œuvre envisage de faire le bilan des émissions de GES du tablier de pont mixte qu'il projette. Il s'agit d'un tablier de 25 m de portée, constitué de 14 poutres en bois lamellé collé de hauteur 1,20 m et de largeur 24 cm, sur lesquelles est connectée une dalle de béton en béton fibré ultra performant (BFUP) de 7 cm d'épaisseur et de 10 m de largeur. La production de BFUP entraîne des émissions de GES de 1t/m³, une dépense énergétique de 7500 MJ/m³. La phase de fin de vie (recyclage du BFUP) conduit à une émission de GES de 0,07 t/m³ et à une dépense énergétique de 825 MJ/m³. Calculer le bilan d'émission de GES et d'énergie du tablier de pont pour les 2 scénarios envisagés pour le bois. Commenter les résultats.

Réponse :

Les données sont fournies dans les tableaux ci-dessous. On observe que les deux scénarios conduisent à un bilan favorable pour l'un des 2 impacts calculés, mais pas les 2 en même temps. Si l'on privilégie la consommation d'énergie, il faut utiliser en fin de vie la structure en bois dans la filière bois énergie, si l'on privilégie l'impact climatique, il vaut mieux retenir le scénario d'enfouissement. Cette question de choix de scénario en fin de vie est rencontrée couramment dans les ACV.

BFUP

émissions de CO2 (kgeq CO2/m3)		
phase production	phase fin de vie	total
1000	70	1070

énergie (MJ/m3)		
phase production	phase fin de vie	total
7500	825	8325

		np	b	h	L	V (m3)
volume de bois		14	0,24	1,2	25	100,8
Vbfup			10	0,07	25	17,5
CO2	sc 1	prod bois (t)	prod bfup (t)	fin de vie bois (t)	fin de vie bfup (t)	total (teq CO2)
	sc2	-48,384	17,500	20,160	1,225	-9,5
Energie	sc 1	prod bois (GJ)	prod bfup(GJ)	fin de vie bois(GJ)	fin de vie bfup(GJ)	total (GJ)
	sc2	1915,200	131,250	0	14,438	2061
		1915,200	131,250	-751,162	14,438	1310

A14) proposer un troisième scénario de fin de vie pour le bois lamellé collé en en précisant les avantages ou les inconvénients.

Réponse : un troisième scénario consisterait à recycler le bois dans une filière de panneaux de particules. On considère alors que qu'il n'y a pas de production de GES liée à la matière elle-même, les dépenses de transport pouvant être attribuées à la filière de transformation. Sur le plan du bilan énergétique, l'énergie potentiellement récupérable reviendra également à la filière de

transformation. Ce scénario est donc efficace sur le plan CO₂, mais pas sur le plan énergétique. Une quatrième solution consiste à récupérer les poutres du pont pour les replacer dans une autre structure, avec éventuellement la possibilité de les débiter en éléments de plus petite taille.

Partie B - Effets climatiques sur les matériaux de chaussées bitumineuses

Dans l'objectif d'évaluer la pérennité des infrastructures de transport routier, il est important d'analyser l'impact des variations de température ambiante sur le comportement des structures de chaussées.

Analyse d'une pathologie relevée *in-situ*

Lors de la canicule de 2003 une enquête a permis d'effectuer un bilan de l'impact, en France et en Europe, du pic de chaleur sur l'état de dégradation du réseau routier. Les observations et analyses ont conclu que ce seul événement isolé n'avait pas nettement aggravé l'état des chaussées routières. Néanmoins, une exception s'est dégagée. Un type très particulier de pathologie a été observée sur le réseau secondaire correspondant à de la fissuration longitudinale, pouvant être en dehors des bandes de roulement (cf. figure 3).

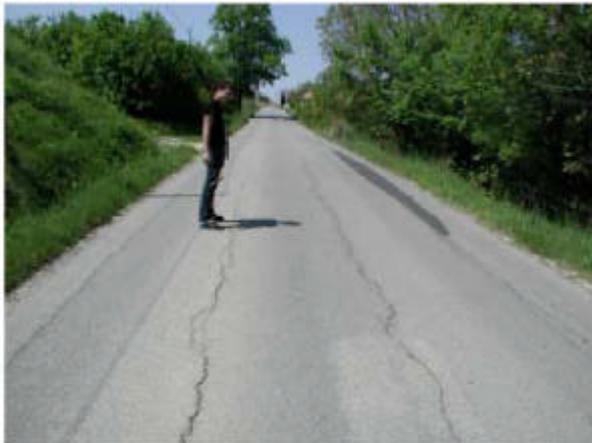


Figure 3. Exemple de dégradations observées sur des chaussées à faible trafic (Source BRGM, 2005)

Ce type de pathologie a été recensé pour des structures routières dont la couche bitumineuse est de faible épaisseur (5 à 6 cm) mise en œuvre sur une couche de grave non traitée (GNT). La tenue structurelle de ce type de chaussée est fortement dépendante du comportement du sol support et en particulier de sa portance qui peut être fortement affectée par les variations de sa teneur en eau.

B1) Expliquer quel mécanisme peut conduire au type de fissuration décrite figure 3. Quel matériau est en cause, donner des indices sur sa nature minéralogique ?

Réponse : La fissuration longitudinale observée n'est pas située dans les bandes de roulement ce qui permet d'exclure l'effet direct du trafic. De plus elle est fortement ouverte ce qui soutient l'idée d'une fissuration du sol support. La dessiccation des sols argileux présents dans la plateforme a entraîné une fissuration par retrait de ces matériaux qui s'est propagée jusqu'à la surface de la

chaussée **faiblement épaisse**. Dans le cas de sécheresse, comme en 2003, la dessiccation s'opère depuis les fossés (indispensable au bon drainage des couches de grave non-traitées par temps de pluie) ce qui explique la double fissuration sur les deux « rives ».

B2) L'effet de ce type de comportement peut-il affecter d'autres types de construction ?

Réponse : ce phénomène bien connu des assurances et du BRGM affecte également les constructions d'habitation en maçonnerie pouvant entraîner des fissurations de mur par retrait différentiel du sol support entraînant la fondation.

B3) Quel type d'essai en laboratoire permettrait de prévenir ce type de désordre ?

Réponse : un essai de retrait libre par assèchement d'un échantillon permettrait par mesure des variations dimensionnelles de l'échantillon testé (cylindrique par exemple) d'évaluer la sensibilité des matériaux à engendrer ce type de désordre. Ce phénomène est directement corrélé à la présence de particules argileuses. Leur présence ou non permet une première indication qualitative, si le sol en question n'est pas excavé ou traité avant construction.

Evolution des propriétés mécaniques des matériaux bitumineux avec la température

Pour les chaussées bitumineuses, l'étude de l'impact d'épisodes climatiques extrêmes sur leur pérennité est importante compte tenu de la forte dépendance du comportement de leurs matériaux avec la température. Le liant bitumineux qui assure la cohésion du squelette granulaire est fortement sensible à la température. Il est qualifié de thermo-susceptible. La suite des questions intéresse l'influence de la température sur le comportement mécanique des matériaux bitumineux.

Le module complexe d'un Enrobé bitumineux 0/14 mm pour couche d'assise au liant 35/50 (norme européenne EN 13108-1) de type grave bitume a été mesuré à différentes températures et différentes fréquences conformément à la norme européenne 12697-26. Les valeurs obtenues sur des éprouvettes trapézoïdales sont regroupées dans le tableau 1 ci-dessous.

Température (°C)	Fréquence (Hz)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	Phi (°)
-10	40	29043	1048	29062	2.1
-10	30	28887	1082	28907	2.2
-10	25	28750	1105	28772	2.2
-10	10	28089	1241	28117	2.5
-10	3	27099	1434	27137	3.0
-10	1	26055	1595	26103	3.5
0	40	25622	1720	25680	3.9
0	30	25305	1752	25366	4.0
0	25	25085	1795	25149	4.1
0	10	24002	1966	24083	4.7
0	3	22442	2200	22550	5.6
0	1	20865	2363	20998	6.5
10	40	20252	2613	20420	7.4
10	30	19788	2644	19964	7.6
10	25	19474	2702	19661	7.9
10	10	17834	2862	18063	9.1
10	3	15608	3050	15904	11.1
10	1	13455	3105	13809	13.0
15	40	16965	3034	17234	10.2
15	30	16446	3060	16729	10.6
15	25	16068	3121	16369	11.0
15	10	14210	3223	14572	12.8
15	3	11728	3304	12186	15.8
15	1	9447	3190	9972	18.7
20	40	13681	3348	14085	13.8
20	30	13063	3340	13484	14.4
20	25	12650	3382	13095	15.0
20	10	10676	3383	11200	17.6
20	3	8115	3237	8738	21.8
20	1	5961	2890	6626	25.9
30	40	7460	3363	8184	24.3
30	30	6843	3254	7579	25.5
30	25	6430	3215	7190	26.6
30	10	4668	2818	5455	31.2
30	3	2810	2157	3545	37.7
30	1	1635	1498	2218	42.7

Tableau 1. Mesures de module complexe

On y retrouve pour chaque condition de fréquence et de température la partie réelle, la partie imaginaire, la norme et l'argument, respectivement dénommés E1, E2, |E*| et Phi du module complexe E* du matériau.

B4) Dans l'appellation du matériau (EN 13108-1), que signifient les termes suivants : enrobés bitumineux, 0-14 mm, couche d'assise, 35/50 ? Dans l'ancienne norme française (Tableau 2), les matériaux de type Grave Bitume (GB) étaient différenciés en plusieurs classes distinctes selon le niveau de leur performance. Entre autre la valeur de module à $|E^*(15^{\circ}C, 10 Hz)|$ doit respecter

certains seuils. Dans quelle classe se trouverait l'enrobé bitumineux étudié vis-à-vis du critère du module ?

type de mélange	Rapport r/R - Tenue à l'eau	Profondeur d'ornièrre (60°C-100 mm) * 10.000 cycles (%) ** 30.000 cycles (%)	Module de rigidité (15°C-10Hz) en MPa	Déformation admissible En fatigue (à 1 million de cycles)
G.B classe 2	≥ 0,65	≤ 10*	≥ 9 000	≥ 80.10 ⁻⁶
GB classe 3	≥ 0,7	≤ 10*	≥ 9 000	≥ 90.10 ⁻⁶
GB classe 4	≥ 0,7	≤ 10**	≥ 11 000	≥ 100.10 ⁻⁶

Tableau 2. Classification des matériaux grave bitume en fonction de leur performance

Réponse : Dans la dénomination

« Enrobé bitumineux » signifie qu'il s'agit d'un enrobé à chaud (mélange à chaud # 160°C) de granulats et de liant bitumineux

« 0-14 » signifie que les dimensions des granulats qui le compose s'étale entre 0 et 14 mm pour les plus gros.

« Pour couche d'assise » signifie que le matériau est destiné aux couches structurales de chaussée (base ou fondation) à la différence de la couche de liaison ou de surface.

« 35/50 » signifie que le liant bitumineux est de classe 35/50 c'est-à-dire (de pénétrabilité ente 35 et 50 100^{ème} de mm sous aiguille normalisé à 25°C –norme EN 12591-)

Le module à 15°C 10Hz est de 14210 MPa (voir ci-dessous) ce qui place le matériau dans la classe 4 du tableau (ATTENTION une erreur s'est glissée avec un décalage d'indice dans les trois classes !! normalement le matériau serait de classe 3)

Température (°C)	Fréquence (Hz)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	Phi (°)
15	25	16068	3121	16369	11.0
15	10	14210	3223	14572	12.8
15	3	11728	3304	12186	15.8

B5) En quoi consiste un essai de module complexe ? Afin de garantir que l'essai s'effectue dans le domaine linéaire de comportement du matériau, à quelle déformation maximale sollicite-t-on le matériau durant ces essais ?

Réponse : Un essai de module complexe consiste à tester un échantillon de matériau sous une sollicitation sinusoïdale. Ainsi les contraintes et déformations sont représentées par des nombres complexes respectivement s^* et e^* liés à la force et au déplacement sinusoïdaux. Le module complexe correspond alors au quotient de la contrainte complexe sur la déformation complexe

$$s^* = S e^{(i\omega t + f)} \text{ et } e^* = e e^{(i\omega t)} \text{ ainsi } E^* = \frac{s^*}{e^*} = \frac{S}{e} e^{if}$$

Afin de garantir la linéarité du comportement, la déformation de l'enrobé dans l'échantillon est limitée à $50 \cdot 10^{-6}$ (ie 50 $\mu\text{m/m}$)

B6) En utilisant les données expérimentales du tableau 1, quel impact (en %) aurait une variation de $\pm 2^\circ\text{C}$ autour de 10°C à la fréquence de 10 Hz, sur le module du matériau ?

Réponse : Par interpolation linéaire autour de la température de 10°C à 10 Hz, on trouve une estimation 6.7 % d'augmentation pour une diminution de 2°C et 8.2% de perte pour une augmentation de 2°C

Interpolation linéaire de E entre 0 et 10 Pente absolue
-602

Temp	E*	Delta E	delta E en %
0	24083	6020	33.3274732
1	23481	5418	29.9947259
2	22879	4816	26.6619785
3	22277	4214	23.3292312
4	21675	3612	19.9964839
5	21073	3010	16.6637366
6	20471	2408	13.3309893
7	19869	1806	9.99824196
8	19267	1204	6.66549464
9	18665	602	3.33274732
10	18063	0	0

Interpolation linéaire de E entre 10 et 20 deg Pente absolue
-686

Temp	E*	delta E	delta E %
10	18063	0	0
11	17376	-686	-3.94922397
12	16690	-1372	-8.22320056
13	16004	-2059	-12.863705
14	15318	-2745	-17.9199985
15	14632	-3431	-23.4505843
16	13945	-4117	-29.5254806
17	13259	-4804	-36.2292017
18	12573	-5490	-43.664713
19	11887	-6176	-51.9587574
20	11200	-6862	-61.2691397

B7) A quoi correspond l'équivalence temps température pour un matériau viscoélastique thermo-susceptible ? En supposant le principe d'équivalence temps/température, à quelle variation de température correspond le triplement de la fréquence de sollicitation à partir de (10°C, 10 Hz) ? Même question si, à 10°C, la fréquence est réduite au tiers de sa valeur passant de 10 Hz à 3 Hz.

Réponse : « Equivalence temps température » : Lorsqu'elle est vérifiée, le matériau a le même module pour différent couple (fréquence, température). Expérimentalement, l'effet d'un accroissement de température est alors équivalent à une diminution de fréquence.

Trouver la variation de température correspondant à une variation de fréquence revient à trouver à quelle température le module a pour valeur la valeur initiale.

Application :

Partant du couple (10°C,10Hz), on recherche la valeur de module à (10°C,30Hz) correspondant à un triplement de la fréquence.

$E(10^\circ\text{C},10\text{Hz}) = 18063 \text{ MPa}$ et $E(10^\circ\text{C},30\text{Hz}) = 19964 \text{ MPa}$ soit une variation de module de +1901 MPa.

Autour de 10°C on a calculé précédemment $dE/d\theta \# -602 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$, on en déduit la variation delta theta correspondant à delta f de 10 à 30 Hz

$$d\theta = 1901 / -602 \# -3.2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Cela signifie que dans ces conditions, le module est autant affecté par des chargements 3 fois plus rapides que par une diminution de température voisine de 3°C.

Idem pour une division de la fréquence par trois

$E(10^\circ\text{C},10\text{Hz}) = 18063 \text{ MPa}$ et $E(10^\circ\text{C},3\text{Hz}) = 15904 \text{ MPa}$ une variation de module de - 2159 MPa. Autour de 10°C on a calculé précédemment $dE/d\theta \# -686 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$, on en déduit la variation delta theta correspondant à delta f de 10 à 3 Hz

$$d\theta = -2159 / -686 \# +3.1 \text{ }^\circ\text{C}$$

B8) Vous êtes contacté par un bureau d'étude chargé de vérifier par un calcul qu'une structure bitumineuse va recevoir une charge exceptionnelle et très lourde pendant l'été. La température de la chaussée, pourrait alors atteindre une température de 30°C. Sortant du cadre habituel du calcul, basé sur la valeur classique obtenue pour 15°C et 10 Hz, comment pouvez vous renseigner votre interlocuteur sur la valeur de module à considérer ? Selon les données disponibles, quelle valeur informative lui communiqueriez-vous pour un matériau grave bitume ?

Réponse : Le dimensionnement d'une structure dans des contextes climatiques conduisant à des températures élevées du corps de chaussée (de manière continue) amène à considérer l'adoucissement thermique du matériau qui engendre des augmentations des sollicitations (déformations) dans les chaussées. Dans le cas d'une température de 30°C, le module complexe du

matériau étudié sera de 5455 MPa à 10 Hz. Cette valeur intégrée dans un calcul de chaussée pourra permettre d'estimer les déformations dans les couches d'assise sous une charge de référence.

Une approche complète consisterait alors, à comparer cette valeur calculée à une déformation admissible (essai de fatigue) elle-même évaluée à une température plus élevée que la température standard en France de 10°C. C'est l'objet de la partie suivante.

Evolution du comportement en fatigue en fonction de la température

Le matériau est soumis à des essais de fatigue sur éprouvettes console trapézoïdale, effectués à une fréquence de 25 Hz et à plusieurs températures situées entre -10°C et 30°C. L'influence de la température d'essai sur la performance en fatigue $e_6(q)$, est présentée figure 4.

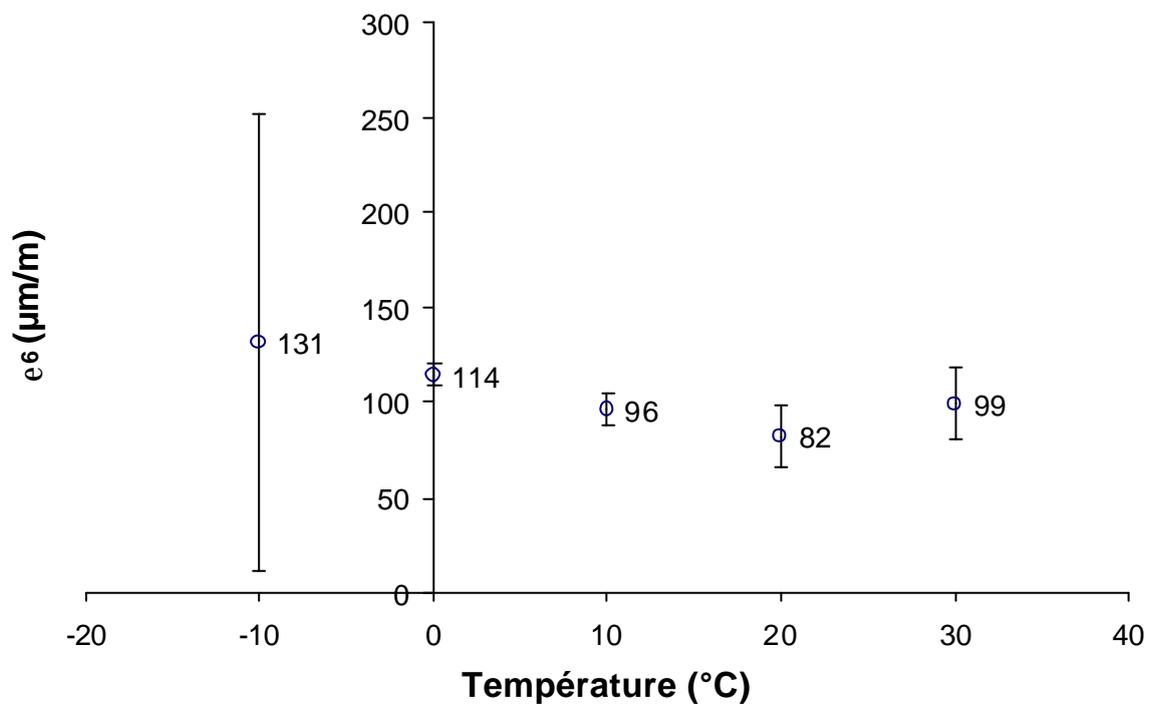


Figure 4. Influence de la température sur la performance en fatigue (25 Hz) d'un matériau Grave Bitume

B9) Pour une température donnée, à quoi correspond la performance e_6 ? Quelle est sa définition ?

Réponse : e_6 correspond statistiquement au niveau de déformation (maximale dans le corps d'éprouvette) à appliquer à une éprouvette de laboratoire menant à un durée de vie de 10^6 cycles.

B10) Pour les calculs de dimensionnement de chaussée et à défaut d'essais de fatigue à différentes températures, la relation de passage de e_6 entre une température de référence q_0 et une température q est classiquement approchée sous la forme suivante :

$$e_6(q) E(q)^n = cst = e_6(q_0) E(q_0)^n \quad \text{avec } n = 0,5$$

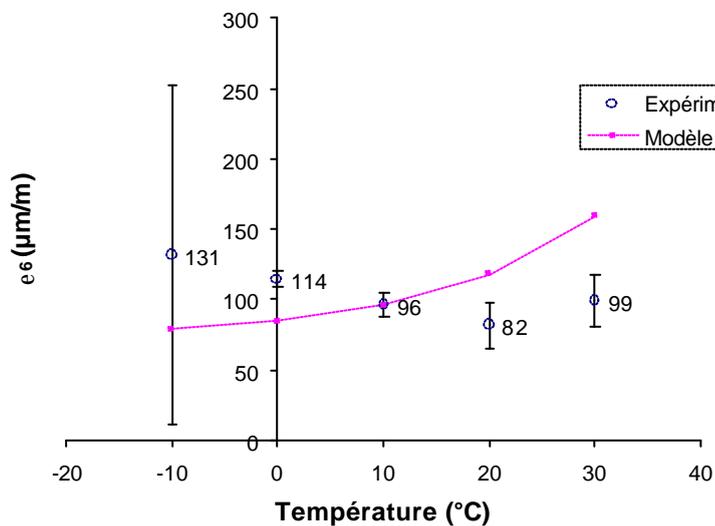
Partant de la température de référence de 10°C, à quelle variation conduit cette loi pour la fréquence de 25 Hz ? Est-elle en accord qualitatif avec les observations effectuées sur ce matériau (Figure 4) ?

Réponse : L'application de la formule conduit à une estimation de e_6 selon la formule suivant

$$e_6(q) = e_6(q_0 = 10^\circ C) \left(\frac{E(q_0 = 10^\circ C)}{E(q)} \right)^n$$

Pour $n=0.5$ la relation conduit à une évolution monotone croissante qui n'est pas qualitativement en accord avec la couche en cloche renversée observée expérimentalement.

Theta [°C]	-10	0	10	20	30
E(theta,25Hz) [MPa]	28772	25149	19661	13095	7190
Eps_6 [µm/m]	131	114	96	82	99
Eps_6 theo	79.3576884	84.8816228	96	117.630863	158.748485



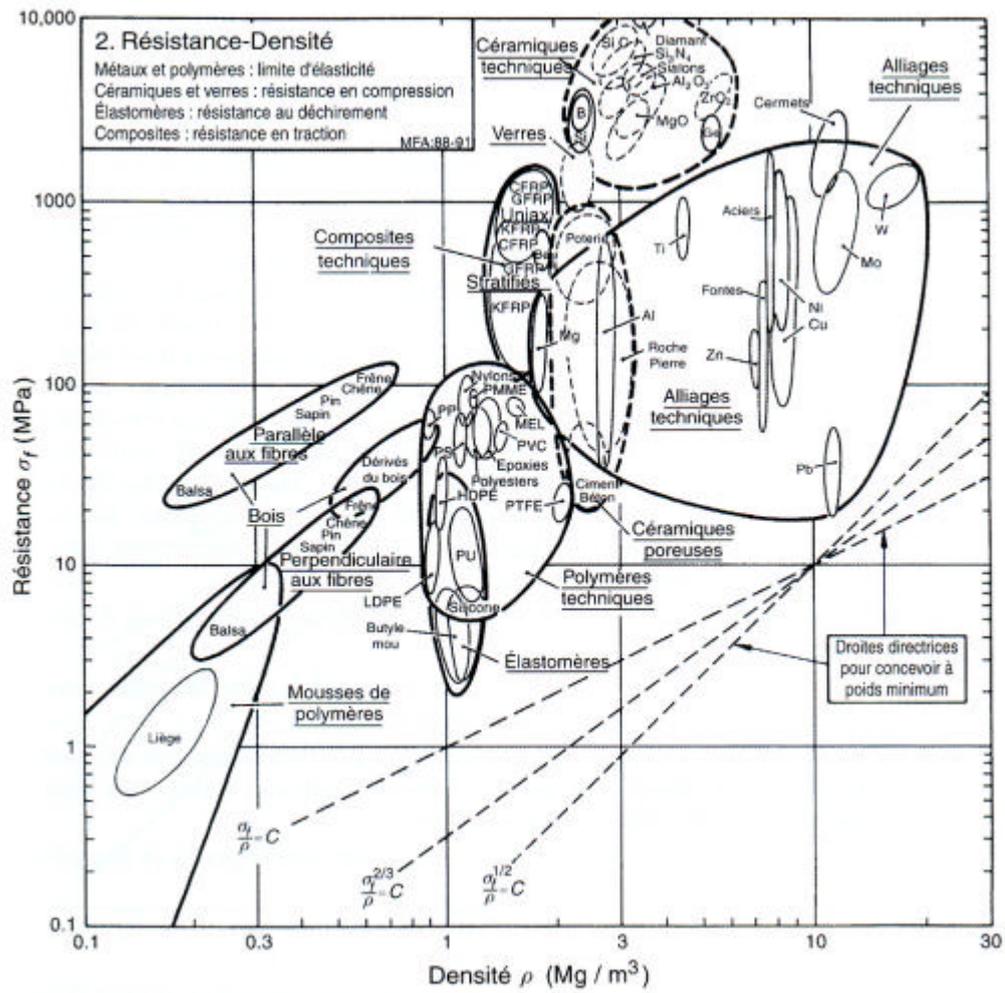


Figure 2. Résistance et densité d'après Ashby (à joindre aux copies)

Rapport sur l'épreuve de modélisation des matériaux et des ouvrages sujet matériaux et patrimoine 2010

La moyenne de l'épreuve est de 8,5. Les candidats ont traités en majorité la partie A, la moyenne de cette partie est de 11 tandis que celle de la partie B est de 6.

Sur la partie A

Les premières questions portant sur la sélection du matériau par la méthode d'Ashby ont été dans l'ensemble abordées. Certains candidats ont rédigés plusieurs pages de calcul pour démontrer la formule de la flèche, ce qui a constitué une perte de temps, car, dans l'esprit du sujet, elle devait être connue. Quelques candidats ont intégré le poids propre dans le problème, mais cette hypothèse ne permet pas de trouver de solution. La difficulté semble avoir été de transformer les relations à démontrer en objectif sur le choix du matériau. Ainsi, plusieurs réponses ont exprimé l'objectif de rigidité en « recherchant la meilleure rigidité pour une masse donnée », ce qui revient à maximiser le rapport E/ρ et non $\sqrt{E/\rho}$. L'utilisation correcte des abaques a été faite pour environ la moitié des candidats.

Les questions sur le bilan environnemental du pont ont été abordées largement. Cependant, les réponses n'ont pas été présentées de manière claire dans l'ensemble, la présentation sous forme de tableau étant ici la meilleure solution. On note des erreurs sur le calcul des volumes de matériau. Dans le calcul du gaz carbonique absorbé par un arbre, seuls quelques candidats ont pensé à calculer la masse de CO₂ à partir de la masse de carbone absorbée (confusion entre C et CO₂). La question sur d'autres méthodes de fin de vie du bois a été bien traitée.

Sur la partie B

Les candidats ont moins abordé la seconde partie du sujet ce qui explique en grande partie les écarts de moyenne. Il s'agissait d'aborder sous différents angles l'effet du climat (sécheresse, température) sur certaines pathologies et comportement de matériaux bitumineux pour les chaussées.

La première série de question sur l'effet de la sécheresse a été abordée avec plus ou moins de succès. Le mécanisme de retrait par dessiccation du sol support et non de la GNT a été identifié dans environ 30% des réponses effectuées. A une exception près, l'essai de dessiccation n'a jamais été mentionné même par simple énoncé de son principe.

Les connaissances sur les matériaux bitumineux de chaussées sont faibles. Dans la dénomination (EB 14 assise 35/50) il ne faut pas confondre 35/50 qui est la classe du liant avec la granularité donné par le premier chiffre. La définition du module complexe sous chargement sinusoïdal doit faire apparaître le module (norme) ainsi que son angle de phase propre au comportement viscoélastique. Ce dernier n'a été évoqué que dans de très rares copies. Il était ensuite proposé d'aborder les concepts de dépendance en température, fréquence et équivalence temps température à partir du résultat d'un essai de laboratoire. Très peu de candidats ont abordé les calculs qui se traitaient par de simples interpolations linéaires des données expérimentales.

La définition de la e_0 n'est pas connue. La comparaison même qualitative de l'évolution de e_0 avec la température avec le modèle n'a été abordée que par très peu de candidats.

Hormis les aspects technologiques qui rencontrent de meilleures réponses, les candidats doivent s'attacher à analyser une situation inconnue de manière rationnelle et pragmatique.

Eléments de correction de la partie Mécanique des Fluides

Exercice 1 : Etude d'une installation hydraulique

a) Sachant qu'un habitant consomme 200 l/jour, que le château d'eau alimente 1700 habitants et que le volume de stockage représente 150% du volume de pointe journalier, le volume de stockage est de : $V = 1,5 \times 0,2 \times 1700 = 510 \text{ m}^3$.

b) Débit moyen : On souhaite pouvoir remplir le réservoir en 4 heures. Le débit moyen est donc $Q = \frac{510}{4} = 127,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ soit également $Q = 35,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

c) Les pertes de charge :
– Pertes de charges régulières :

$$\Delta H_r = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \text{ [mCE]}$$

Vitesse : $V = \frac{4Q}{\pi D^2}$ avec $D = 250 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ soit $V = 0,721 \text{ m/s}$.

Nombre de Reynolds : $Re = \frac{VD}{\nu}$ soit $Re = 1,8 \cdot 10^5$.

Rugosité relative : $\frac{\epsilon}{D} = 2 \cdot 10^{-3}$. Le diagramme de Moody permet d'en déduire $\lambda = 0,024$. Pour une longueur de conduite de 2032 m on en déduit les pertes de charges régulières $\Delta H_r = 5,16 \text{ mCE}$.

– Pertes de charge singulières :

$$\Delta H_s = \sum \xi \frac{V^2}{2g} \text{ [mCE]}$$

Les pertes de charge singulières sont créées par la sortie du réservoir ($\xi = 0,5$), le coude en pied de château d'eau ($\xi = 0,5$) et la courbe à 180° ($\xi = 1$). D'où $\sum \xi = 2$ et par conséquent $\Delta H_s = 5,3 \cdot 10^{-2} \text{ mCE}$.

– Pertes de charge totales :

$$\Delta H_{AB} = \Delta H_r + \Delta H_s$$

Soit $\Delta H = 5,21 \text{ mCE}$.

d) Caractéristiques de la pompe :

- Hauteur manométrique : H_M : L'application du théorème de Bernoulli entre les points A et B mène à : $H_B = H_A - \Delta H_{AB} + H_M$ en mCE avec $H_A = \frac{p_A}{\rho g} + z_A + \frac{V_A^2}{2g}$ et $H_B = \frac{p_B}{\rho g} + z_B + \frac{V_B^2}{2g}$. Comme $p_A = p_B = p_{\text{atm}}$, $z_A = 2,5 \text{ m}$, $z_B = 29 \text{ m}$, $V_A = 0$ et $V_B = 0,721 \text{ m/s}$, on peut déterminer $H_M = z_B - z_A + \Delta H_{AB} + \frac{V_B^2}{2g}$ soit $H_M = 31,74 \text{ mCE}$.
- Puissance hydraulique : $P = Q \times \rho g H_M$ soit $P \approx 11 \text{ kW}$.

Exercice 2 : Etude de l'écoulement autour du fût du château d'eau

a) L'écoulement résulte de la superposition d'un écoulement uniforme de vitesse $\xi = V_0$ avec V_0 réel positif, d'un doublet parallèle à l'axe \vec{Ox} situé à l'origine et de moment

$K = -2\pi V_0 R^2$ et d'un tourbillon ponctuel placé à l'origine de circulation Γ . Le potentiel complexe $f(z)$ de l'écoulement s'obtient par addition des potentiels complexes de chacun des écoulements. Potentiel complexe des écoulements élémentaires :

- Ecoulement plan uniforme et parallèle à l'axe \vec{Ox} est $f_1(z) = V_0 z$;
 - Doublet parallèle à l'axe \vec{Ox} placé à l'origine et de moment $K = -2\pi V_0 R^2$: $f_2(z) = -\frac{K}{2\pi z} = \frac{V_0 R^2}{z}$;
 - Tourbillon placé à l'origine et de circulation Γ : $f_3(z) = -\frac{i\Gamma}{2\pi} \ln z$.
- Le potentiel complexe de l'écoulement s'écrit alors $f(z) = f_1(z) + f_2(z) + f_3(z)$ soit :

$$f(z) = V_0 \left(z + \frac{R^2}{z} \right) - i \frac{\Gamma}{2\pi} \ln z$$

En coordonnées polaires, r, θ , ce potentiel peut s'écrire :

$$f(z) = V_0 \left(r e^{i\theta} + \frac{R^2}{r} e^{-i\theta} \right) - i \frac{\Gamma}{2\pi} \ln (r e^{i\theta})$$

- b) On en déduit le potentiel des vitesses Φ et la fonction de courant Ψ respectivement partie réelle et partie imaginaire du potentiel complexe de l'écoulement ($f(z) = \Phi + i\Psi$) :

$$\Phi = V_0 \left(r + \frac{R^2}{r} \right) \cos \theta + \frac{\Gamma}{2\pi} \theta$$

$$\Psi = V_0 \left(r - \frac{R^2}{r} \right) \sin \theta - \frac{\Gamma}{2\pi} \ln r$$

Sur le cercle, $r = R$, d'où $\Psi = -\frac{\Gamma}{2\pi} \ln R = \text{cte}$. Le cercle de rayon R est donc bien ligne de courant.

La vitesse \vec{U} s'exprime à partir du potentiel des vitesses par :

$$\vec{U} = \overrightarrow{\text{grad}} \Phi$$

Les composantes U_r et U_θ se calculent alors :

$$U_r = \frac{\partial \Phi}{\partial r} \text{ et } U_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta}$$

d'où

$$U_r = V_0 \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \cos \theta \text{ et } U_\theta = -V_0 \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \sin \theta + \frac{\Gamma}{2\pi r}$$

- c) Sur le cercle, $r = R$. Les composantes de la vitesse deviennent : $U_r = 0$ et $U_\theta = -2V_0 \sin \theta + \frac{\Gamma}{2\pi R}$.

Le module de la vitesse v en un point du cercle est tel que :

$$v^2 = \left| \vec{U} \right|^2 = \frac{\Gamma^2}{4\pi^2 R^2} + 4V_0^2 \sin^2 \theta - \frac{2V_0}{\pi R} \Gamma \sin \theta$$

- d) La pression autour du cercle se calcule à partir du théorème de Bernoulli appliqué le long d'une ligne de courant. Les forces de pesanteur étant négligées il vient :

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = p_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2$$

d'où

$$p = p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 \left(1 - \frac{\Gamma^2}{4\pi^2 V_0^2 R^2} - 4 \sin^2 \theta + \frac{2\Gamma}{\pi V_0 R} \sin \theta \right)$$

- e) La force exercée par le fluide se calcule par intégration le long du cercle de $d\vec{F} = -p\vec{n}dS$, avec $dS = R d\theta$ et \vec{n} normale unitaire extérieure en tout point du cercle. Après projection, il vient :

$$F_x = \int_0^{2\pi} -p \cos \theta R d\theta$$

$$F_y = \int_0^{2\pi} -p \sin \theta R d\theta$$

La première composante s'exprime par :

$$F_x = -p_0 R \int_0^{2\pi} \cos \theta d\theta - \frac{1}{2} \rho V_0^2 R \left\{ \int_0^{2\pi} \cos \theta d\theta - \frac{\Gamma^2}{4\pi^2 V_0^2 R^2} \int_0^{2\pi} \cos \theta d\theta - 4 \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta \cos \theta d\theta + \frac{2\Gamma}{\pi V_0 R} \int_0^{2\pi} \sin \theta \cos \theta d\theta \right\}$$

Chacune des intégrales étant nulle, il vient $F_x = 0$.

La deuxième composante s'exprime par :

$$F_y = -p_0 R \int_0^{2\pi} \sin \theta d\theta - \frac{1}{2} \rho V_0^2 R \left\{ \int_0^{2\pi} \sin \theta d\theta - \frac{\Gamma^2}{4\pi^2 V_0^2 R^2} \int_0^{2\pi} \sin \theta d\theta - 4 \int_0^{2\pi} \sin^3 \theta d\theta + \frac{2\Gamma}{\pi V_0 R} \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta d\theta \right\}$$

Seule la dernière intégrale est non nulle et égale à π d'où le résultat :

$$F_y = -\rho \Gamma V_0$$

Modélisation mécanique :

On se propose d'étudier le comportement du château d'eau représenté sur la figure 1 sous une action sismique.

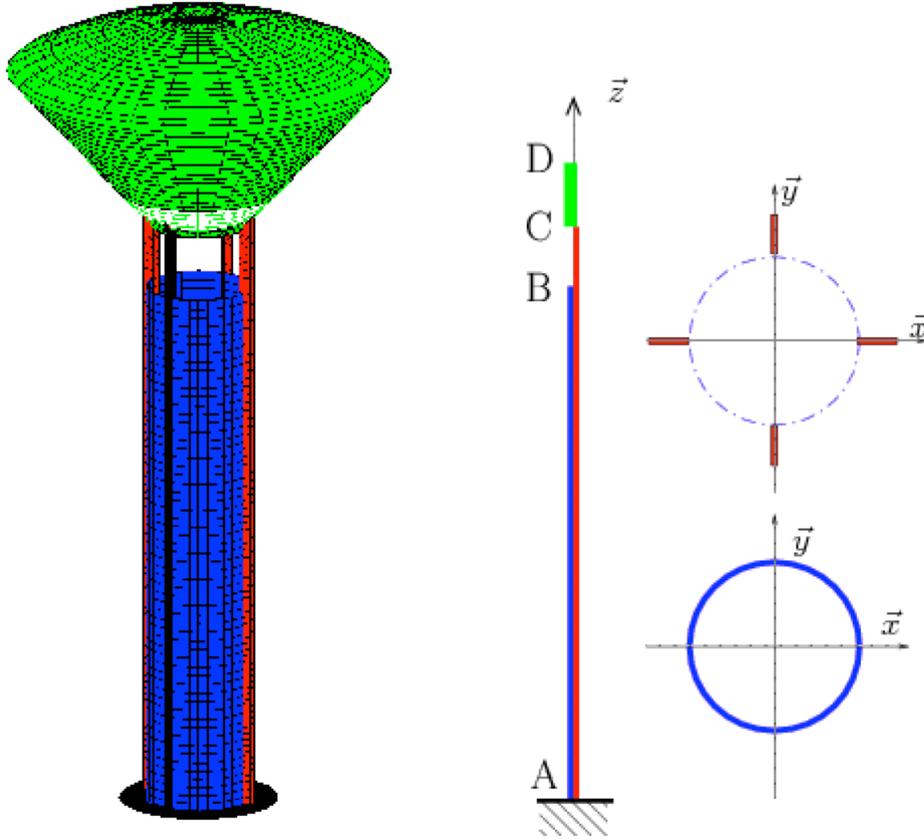


Figure 1: Château d'eau et sa modélisation

Le château est composé d'un fût AB cylindrique de rayon extérieur $R_e=3m$ et d'épaisseur $e=0,3m$, de nervures AC de longueur $h=1m$ d'épaisseur $b=0,5m$ situées à l'extérieur du fût et d'un réservoir que l'on supposera de raideur infinie dont le centre de gravité est matérialisé par le point D. L'ouvrage est réalisé en béton armé dont le module d'élasticité est $E=30GPa$, la limite élastique en compression est $f_c=25MPa$ et la masse volumique est $\rho_b=2500kg/m^3$. Les cotes des point A, B, C et D sont respectivement $z_a=0, z_b=26,5m, z_c=31m, z_d=38,5m$. La masse du réservoir plein est $M=1500t$.

Calcul des charges statiques:

La structure ABCD est sollicitée par son poids propre (accélération de la gravité $\vec{g}=-g\vec{z}$ et $g=9,81m/s^2$) et par le poids du réservoir de masse M appliqué au point D. On se propose d'utiliser le modèle poutre indiqué sur la figure 1.

Compression:

- a. Tracer le diagramme de l'effort normal sur ABCD.

Le poids volumique du fût est

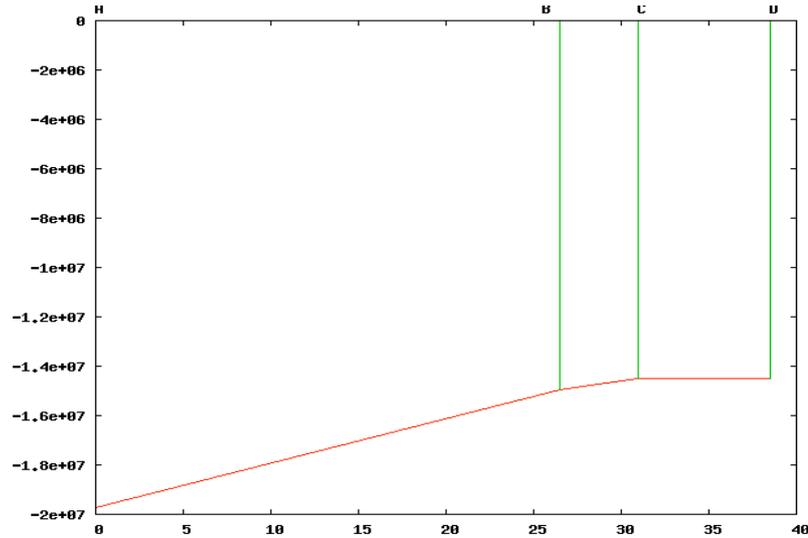
$p_f = \rho_b g A_f$ avec $A_f = \pi (R_e^2 - (R_e - e)^2)$ soit $p_f \approx 131,75 \text{ kN/m}$, celui des nervures :

$p_n = \rho_b g A_n$ avec $A_n = 4hb$ soit $p_n \approx 49,05 \text{ kN/m}$. Nous avons donc

$N_D = N_C = -Mg \approx -14,72 \text{ MN}$, $N_B = -Mg - p_n(z_c - z_b) \approx -14,94 \text{ MN}$

$N_A = -Mg - p_n(z_c - z_a) - p_f(z_b - z_a) \approx -19,73 \text{ MN}$

Le diagramme de l'effort normal est donc :



- b. Vérifier le dimensionnement des nervures et du fût.

L'aire de la section entre les points A et B est $A_f + A_n$, la contrainte maximale dans cette

partie est donc $\sigma_{AB_M} = \frac{N_A}{A_f + A_n} \approx -2,67 \text{ MPa}$.

L'aire de la section entre les points B et C est A_n , la contrainte maximale dans cette

partie est donc $\sigma_{BC_M} = \frac{N_B}{A_n} \approx -7,46 \text{ MPa}$. Ces valeurs indiquent que la contrainte est admissible dans ce cas de sollicitation.

Flambement des nervures:

Les nervures sont susceptibles de flamber entre B et C. Vérifier en faisant les hypothèses de liaisons qui vous semblent les plus raisonnables et en les justifiant que les nervures restent stables.

Deux modes de flambement sont envisageables :

- Chaque nervure peut flamber indépendamment : dans ce cas les hypothèses idéales correspondent au cas bi-encasté, mais dans le cas du béton armé on choisit habituellement dans $L_f \approx 0,7L$. Dans ce cas la charge critique de flambement est $F_c = \frac{\pi^2 EI}{L_f^2}$ et

$I = \frac{hb^3}{12}$ est la plus petite inertie de flexion de la nervure. Nous obtenons $F_c \approx 310 \text{ MN}$

qui est bien supérieure à la sollicitation $\frac{N_b}{4}$.

- Le flambement peut être lié à un mouvement d'ensemble (voir modélisation numérique)

On rappelle que la longueur de flambement L_f pour une poutre de longueur L dépend des liaisons:

- $L_f = L$ pour deux appuis simples ou un encastrement et une glissière d'axe perpendiculaire à la ligne moyenne de la poutre .
- $L_f = L/2$ pour deux encastrements.
- $L_f \approx 0,7 L$ pour un appui simple et un encastrement.
- $L_f = 2L$ pour un encastrement et une extrémité libre.

Vibrations libres de flexion :

Calcul des moments d'inerties.

- a. Calculer l'inertie de flexion I_{AB_x} de la poutre AB (composée uniquement du fût cylindrique) par rapport à l'axe $G_{\bar{x}}$.

$$I_{AB_x} = \pi \frac{R_e^4 - (R_e - e)^4}{4} \approx 21,88 \text{ m}^4$$

- b. Calculer l'inertie de flexion I_{AC_x} de la poutre AC (composée uniquement des 4 nervures) par rapport à l'axe $G_{\bar{x}}$.

$$I_{AC_x} = 2 \left(\frac{bh^3}{12} + bh \left(R_e + \frac{h}{2} \right)^2 \right) + 2 \frac{hb^3}{12} \approx 12,35 \text{ m}^4$$

Raideur à la flexion.

On considère une charge horizontale $\vec{F}_y = F_y \vec{y}$ appliquée au point D.

- a. Calculer le déplacement δ_y du point D correspondant, ainsi que la raideur $K_y = \frac{F_y}{\delta_y}$.

Le moment fléchissant dans la poutre composée du fût et des nervures s'écrit :
 $M_{f_x}(z) = -F_y(z_d - z)$

Le déplacement du point D est alors : $\delta_y = \int_0^{z_d} \frac{M_{f_x}(z) \overline{M}_{f_x}(z)}{E I_x(z)} dz$ avec
 $\overline{M}_{f_x}(z) = -(z_d - z)$ et $I_x(z) = I_{AB_x} + I_{AC_x}$ pour $0 < z < z_b$, $I_x(z) = I_{AC_x}$ pour $z_b < z < z_c$,
 $I_x(z) = \infty$ pour $z_c < z < z_d$

On a donc : $\delta_y = \frac{\int_0^{z_b} M_{f_x}(z) \overline{M}_{f_x}(z)}{E(I_{AB_x} + I_{AC_x})} dz + \frac{\int_{z_b}^{z_c} M_{f_x}(z) \overline{M}_{f_x}(z)}{E I_{AC_x}} dz \approx 1,914 \cdot 10^{-8} F_y$ ce qui donne
pour la raideur : $K_y \approx 52,26 \text{ MN/m}$

b. Que se passe-t-il pour une charge horizontale d'orientation quelconque ?

Les inerties du fût et des nervures sont égales pour des axes \vec{x} et \vec{y} un chargement dans la direction \vec{x} aura donc un effet similaire à celui dans la direction \vec{y} on a donc

$$\delta_x = \frac{F_x}{K_x} \text{ et } K_x = K_y . \text{ Pour un chargement dans la direction } F\vec{u} = F(\cos\theta\vec{x} + \sin\theta\vec{y})$$

on aura par superposition $\vec{\delta} = \frac{F\cos\theta}{K_x}\vec{x} + \frac{F\sin\theta}{K_x}\vec{y} = \frac{F}{K_x}\vec{u}$. La raideur en flexion de château d'eau ne dépend donc pas de la direction de la charge.

Vibrations libres.

On adopte le modèle suivant (Figure 2) pour calculer les vibrations libres du château d'eau en flexion. Un solide de centre de gravité D et de masse $M=1500t$ est en liaison glissière d'axe \vec{x} avec le sol. Le solide est également lié au sol par un ressort de raideur $K_x=50MN/m$ et un amortisseur de constante d'amortissement c.

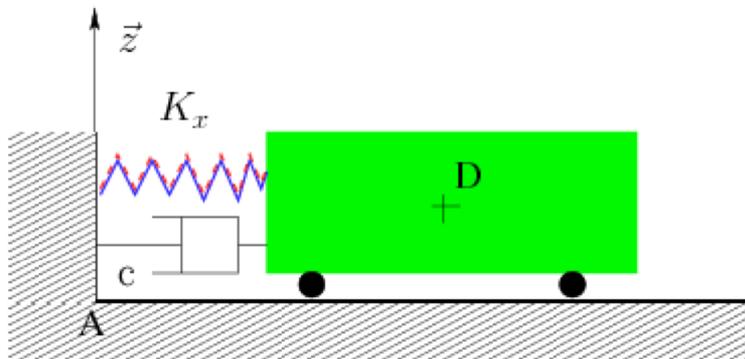


Figure 2: Modèle vibrations libres

Le repère $(A, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ est supposé galiléen.

a. Indiquez les hypothèses prises pour justifier ce modèle et, éventuellement, critiquez les.

La masse du fût et des nervures ($\approx 510t$) est négligée devant celle du réservoir plein (1500t) ce qui peu paraître un peu osé.

Dans le mouvement de flexion, le réservoir subit une rotation qui est négligée également ici.

La masse liquide est supposée rigide.

b. On appelle u le déplacement du point D par rapport à sa position d'équilibre, écrire l'équation d'équilibre dynamique du système.

$$-Ku - C\dot{u} = M\ddot{u} \text{ Soit en divisant par } M \text{ et en posant } \omega_0^2 = \frac{K}{M} \text{ on obtient :}$$

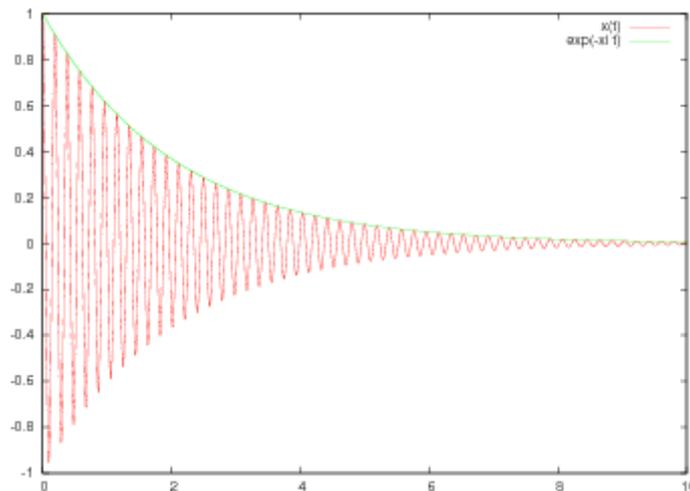
$$\ddot{u} + 2\xi\omega_0\dot{u} + \omega_0^2u = 0 \text{ avec } \xi = \frac{C}{2M\omega_0}$$

c. Calculer la pulsation propre ω_0 du système.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}} \approx 5,77 \text{ Hz}$$

- d. Discuter de la nature de la solution en fonction de l'amortissement réduit $\xi = \frac{C}{2M\omega_0}$.
Tracer l'allure de la solution pour $\xi = 5\%$.

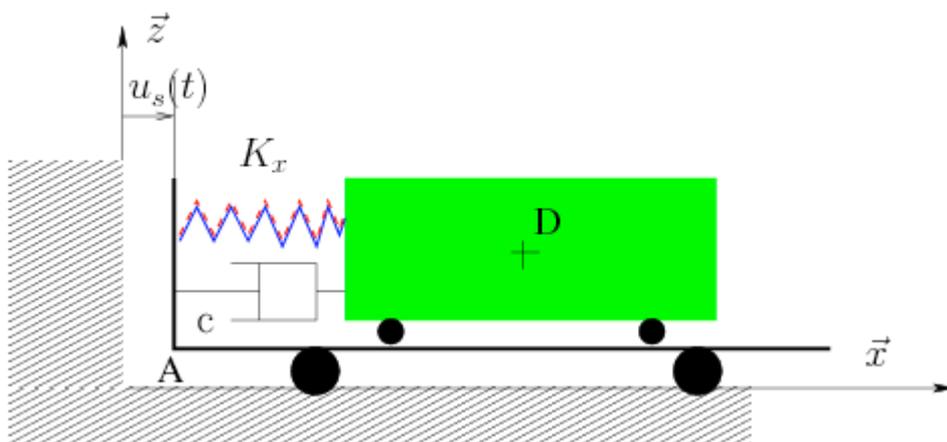
Le discriminant du polynôme caractéristique de l'équation différentielle d'équilibre conditionne la nature de la solution. $r^2 + 2\xi\omega_0 r + \omega_0^2 = 0$ soit $\Delta = 4\xi^2\omega_0^2 - 4\omega_0^2 = 4\omega_0^2(\xi^2 - 1)$. Ici, la solution du polynôme caractéristique est donc complexe et la solution de l'équation différentielle est de la forme $e^{-\xi\omega_0 t} [A \cos(\Omega t) + B \sin(\Omega t)]$ avec $\Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$. L'amortissement est sous-critique.



Vibrations forcées:

On suppose que sol a maintenant un mouvement horizontal d'axe \vec{x} $u_s = a \sin(\omega_0 t)$, ω_0 est la pulsation propre du système et a l'amplitude du mouvement. On supposera pour la suite que la pulsation propre du système est $\omega_0 = 6\text{Hz}$.

- a. Faire un schéma pour modéliser le problème posé.



- a. Calculer l'amplitude de l'accélération du sol déterminée à l'aide du spectre de dimensionnement donné sur la figure 3 pour la pulsation propre du système étudié. En déduire l'amplitude a du mouvement du sol.

La période propre du système est $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} \approx 1,088 \text{ s}$ en reportant sur le spectre, on obtient une amplitude de l'accélération approximativement $0,9 \text{ ms}^{-2} = a \omega_0^2$. On en déduit

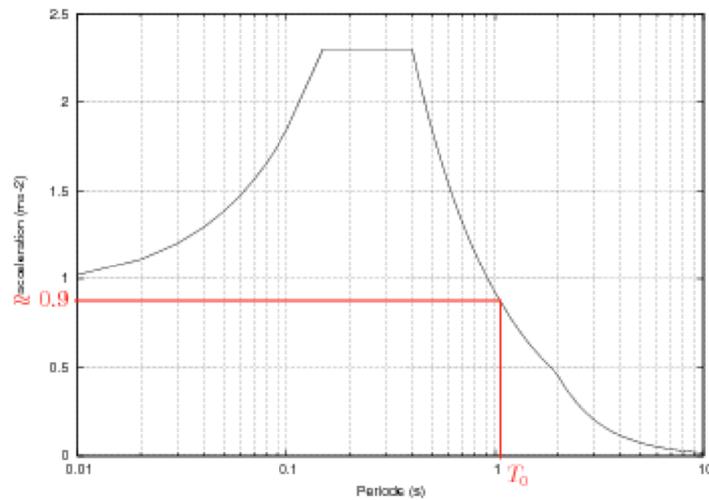


Figure 3: Spectre de dimensionnement

c. Écrire l'équation du mouvement du système étudié sans la résoudre.

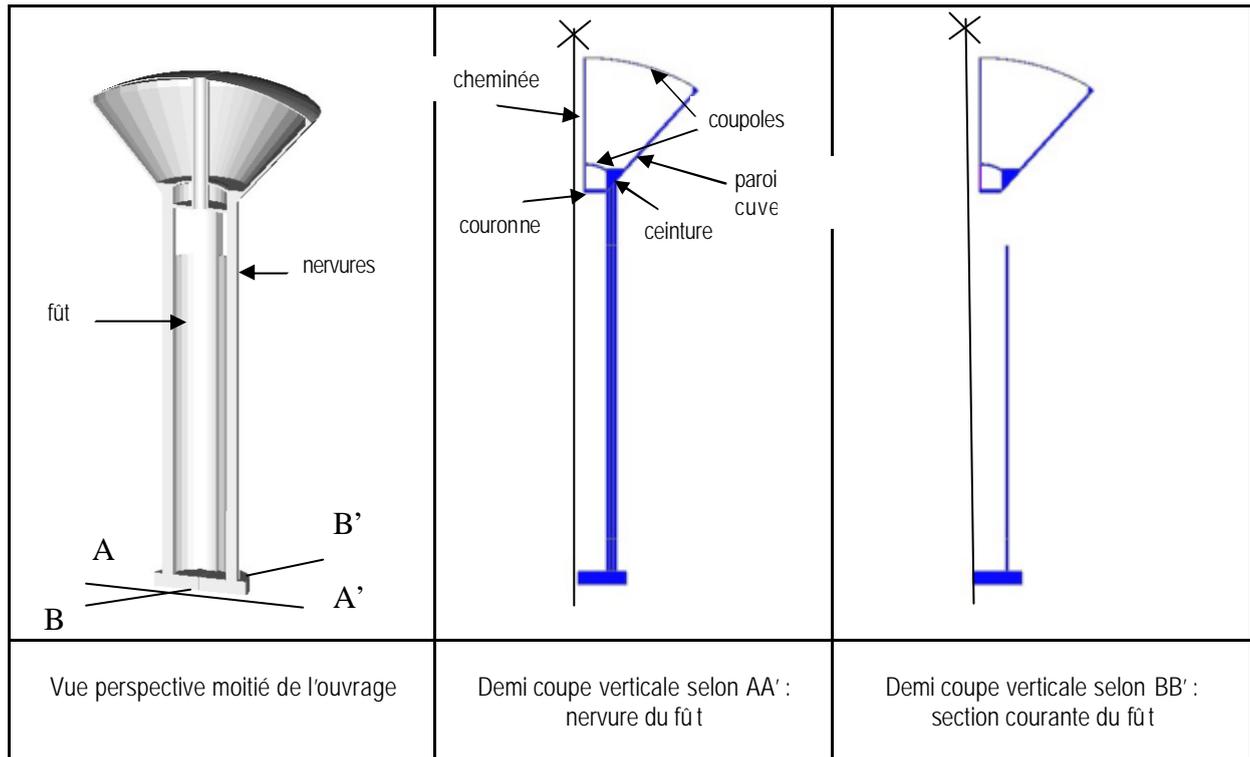
$u_s(t)$ est le déplacement du sol par rapport au repère galiléen, $x(t)$ est le déplacement du centre de gravité de la structure par rapport au repère galiléen. Le déplacement de la masse par rapport au sol est donc $x(t) - u_s(t)$. L'expression des efforts exercée sur la masse est ma même que pour le problème de vibrations libres :

$$-K(x - u) - C(\dot{x} - \dot{u}) = M \ddot{x}$$

Partie Modélisation Numérique

On se propose de modéliser numériquement, et plus précisément par la méthode des éléments finis, le comportement en service de la structure décrite précédemment. Le château d'eau en béton armé est composé, du bas vers le haut de :

- une base circulaire de 4,3m de rayon et 1,2m d'épaisseur
- un fût cylindrique d'épaisseur 0,30 m de 26,5 m de hauteur, de rayon moyen 2,85 m
- de 4 nervures verticales rigidifiant ce fût de hauteur 31,0 m, réparties uniformément autour du fût
- d'une cuve tronconique composée elle-même d'une couronne circulaire constituant la base de la cuve, d'une ceinture inférieure reposant sur les nervures, d'une coupole inférieure reliant la ceinture à la cheminée, d'une cheminée (partie interne de la cuve), d'une paroi latérale de cuve et d'une coupole supérieure



1. Modélisation sous poids propre en service

On se propose de modéliser le comportement global du château d'eau sous son propre poids et en service (cuve remplie d'eau) en considérant la partie inférieure de la base comme rigide.

1.1 Domaine, maillage

Il est demandé de définir un domaine d'étude et une discrétisation de ce domaine en précisant un type d'éléments pour chaque partie de l'ouvrage, sachant que les armatures acier ne sont pas prises en compte dans cette modélisation. Proposer 2 types d'éléments pour certaines de ces parties, en indiquant les avantages et inconvénients (mise en œuvre, précision, informations fournies par le calcul élément finis) de ces différents types d'éléments.

Domaine :

- modèle 3D sachant qu'il n'y a pas de symétrie de révolution
- fondation considérée comme rigide, on prend donc en compte tout ce qu'il y a au dessus de cette base.
- Compte tenu des symétries géométriques et de charge, on considère 1/4 (ou 1/8) de la structure

Discrétisation, on pourra prendre :

- pour le fût, la cheminée, les coupoles, la paroi de la cuve, la couronne
éléments coque ou éléments volumiques.
- pour les nervures, la ceinture
éléments poutre ou éléments volumiques

reste le problème de la connexion des éléments volumiques avec les autres éléments (dépend des codes)

Eléments coque, poutre :

Avantages moins de ddl ? moins espace mémoire, calcul plus rapide, discrétisation plus aisée
Informations utiles et directement exploitables pour le calcul des armatures

Inconvénients hypothèses simplificatrices (cinématique de déformation) ? moins précis

Eléments volumique

Avantages moins hypothèses simplificatrices ? plus précis

Inconvénients pb. de maillage pour éléments fins, maillage dense, temps de calcul long, espace mémoire conséquent, traitement pour torseur nécessaire pour le calcul des armatures

1.2 Propriétés de matériaux

En supposant que vous ne disposez pas des propriétés mécaniques du béton utilisé sur cet ouvrage, proposez et justifiez une valeur conventionnelle du module d'Young et du coefficient de Poisson pour ce type de chargement.

$$E = \frac{11000}{3} \cdot \sqrt[3]{f_{cj}} \text{ en MPa. } \quad E \text{ pour comportement à long terme (poids propre) , } 3 \cdot E \text{ pour court terme (vent)}$$

$$\nu = 0,2 - 0,3$$

1.3 Conditions aux limites

Préciser les conditions aux limites du domaine pris en compte. Les justifier.

Les nœuds du château d'eau en contact avec la base auront un déplacement nul dans les 3 dimensions de l'espace, pour simuler l'encastrement et empêcher tout mouvement de solide.

Compte tenu des symétries, sur les plans verticaux passant par AA' et BB' les déplacements perpendiculaires seront nuls.

1.4 Chargement

Indiquer comment sont appliqués les chargements mentionnés plus haut : directions, valeurs

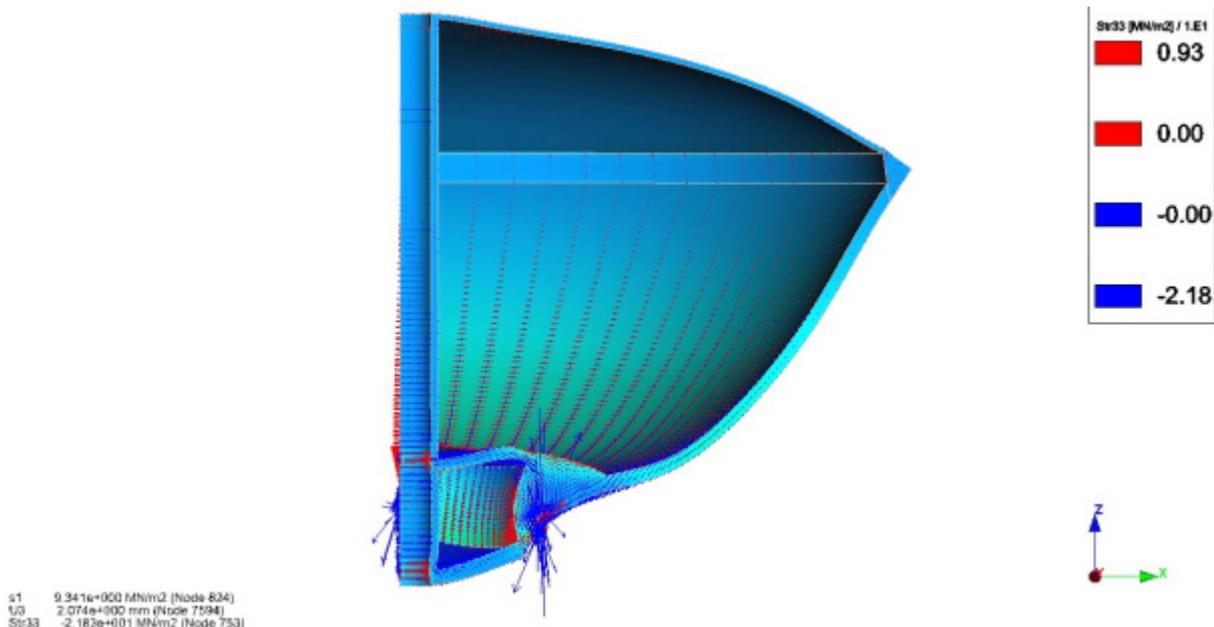
La charge consiste une pression sur la paroi, perpendiculaire à la paroi et proportionnelle à la hauteur d'eau (pression hydrostatique $P = g \cdot z$)

1.5 Résultats

1.5.1 Déformée

Représenter sur la demi coupe AA', de manière graphique et qualitative, la déformée de l'ouvrage.

Ci-dessous la déformée calculée avec Cesar-LCPC



Observations :

- fût et des nervures peu de déformée (compression principalement)
- Ceinture (poutre courbe sur 2 appuis (nervures) avec chargement uniforme)

poinçonnement au droit des nervures, flexion suivant un axe « r » (si on considère le repère cylindrique, r, θ , z) + rotation suivant axe θ due à la pression de l'eau s'exerçant sur la paroi de la cuve.

- Déformation de flexion de la paroi de la cuve liée à la pression de l'eau, plus prononcée en fond de cuve à cause de la distribution de la pression hydrostatique, déplacement radial faible aux extrémités dû aux ceintures haute et basse.
- Coupole basse : plaque circulaire, charge uniforme, partiellement encastrée sur la périphérie extérieure
- Couronne :
Plaque circulaire chargée selon une circonférence intérieure et partiellement encastrée en périphérie extérieure

En supposant les éléments volumiques, quels sont ceux, linéaires ou quadratiques, qui donneront des résultats plus réalistes ?

les éléments quadratiques

Lesquels donneront le plus de souplesse à la structure

les éléments quadratiques

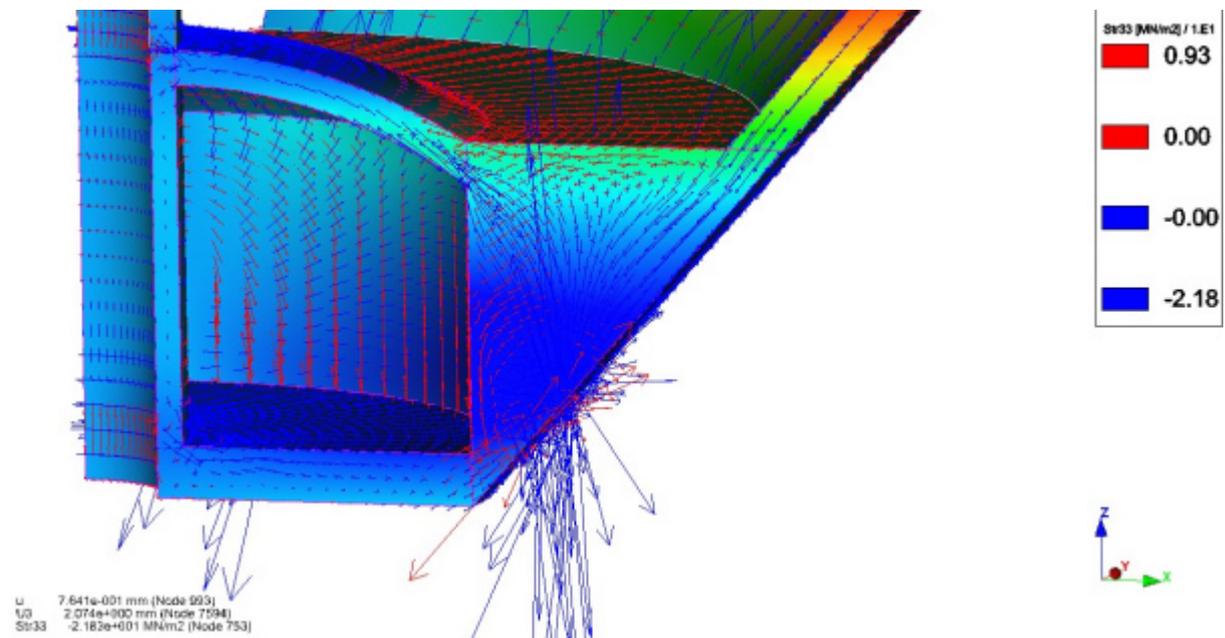
1.5.2 Contraintes

- Afin de définir les sections d'acier nécessaires dans la partie tronconique de la cuve, nous devons déterminer les efforts normaux et les moments en certains points. Comment procéder à partir des résultats fournis par chaque type d'éléments utilisé dans le maillage.

Pour les éléments volumiques Intégration des contraintes et moments sur les sections

Pour les éléments poutres et coques en général fournis par le logiciel

- Commenter les signes et les directions des contraintes principales dans la couronne inférieure au droit des nervures (voir figure ci-dessous).



- au niveau de la nervure Poinçonnement: Contraintes principales majeures verticales positives (compression)

- en partie haute de la ceinture

Zone en traction (moment lié à la pression hydrostatique), idem sur la partie interne de cette ceinture,

- globalement dans la ceinture

Traction orthoradiale (suivant θ).

- Les nervures comportent un risque de flambement (voir calcul analytique). Quelles sont les 2 particularités d'un calcul en éléments finis qu'il conviendra de prendre en compte pour simuler ce phénomène.

Calcul équivalent analytique (recherche de valeur et vecteur propre (charge critique d'Euler)) ou prise en compte des grands déplacements (rotations) avec selon les cas prise en compte des forces suiveuses.

2. Modélisation sous l'action du vent

Définir dans le cas présent le domaine d'étude, en considérant par ailleurs que l'on souhaite s'assurer de la stabilité des fondations.

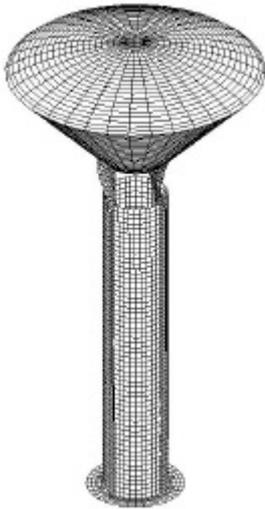
- Prise en compte de la structure complète (plus de symétrie des charges)
- Modélisation du massif de terrain avec limite en déplacement nul suffisamment loin de la structure

3. Modélisation du comportement dynamique

Sans réaliser un calcul dynamique temporel, 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.

Faire une étude spectrale de la structure et s'assurer que les modes propres sont différents des périodes de sollicitation.

Le premier mode calculé est un mode de torsion de fréquence sensiblement égale à 1Hz : voir figure ci-dessous.



Indiquer quelles sont la sollicitation et la particularité de l'ouvrage, susceptibles de provoquer le déclenchement de ce mode. Quel dispositif mettre en œuvre pour éviter ce phénomène ?

Vent (horizontal) agissant sur les nervures et provoquant un couple de torsion

Contreventement

Rapport sur l'épreuve de modélisation des matériaux et des ouvrages

Partie : modélisation des ouvrages

Partie 1. Mécanique des fluides

Cette partie comportait deux exercices indépendants, le premier abordant des questions d'hydraulique, le second concernant l'étude d'un écoulement pour un fluide parfait. Si le premier exercice a été abordé par la majorité des candidats, très peu ont abordé le second alors que les premières questions étaient très accessibles.

Concernant le premier exercice, on notera que près de 20% des candidats n'ont pas ou mal traité les premières questions, alors qu'elles étaient d'une très grande simplicité. On ne peut que recommander une nouvelle fois aux candidats de lire attentivement l'ensemble des parties du sujet dont la progressivité doit permettre à tous de traiter la ou les premières questions. Enfin, on regrettera que trop peu de candidats ne maîtrisent le théorème de Bernoulli !

Partie 2. Modélisation mécanique

La modélisation mécanique du château d'eau comprenait des éléments de dimensionnement sous chargements statiques et dynamiques. Des résultats intermédiaires donnés dans le sujet permettaient d'aborder chaque partie indépendamment. De nombreux candidats ont traité la partie statique sans aborder la dynamique.

Dans la partie statique, les candidats qui ont calculé la raideur à la flexion, l'ont généralement fait au prix d'hypothèses simplificatrices sans pour autant les justifier.

Les candidats qui ont abordé la dynamique ont généralement bien réussi cette partie.

Certaines questions demandaient de la réflexion plutôt que de la technique comme par exemple le calcul de la raideur sous chargement dévié. Ces questions ont été malheureusement très peu traitées par les candidats.

Partie 3. Partie modélisation numérique

Comme pour les éditions précédentes, cette partie traitait de la modélisation numérique de l'ouvrage faisant l'objet des 2 premières parties de l'épreuve. Comme l'an passé, les questions portaient à la fois sur des considérations générales de la méthode des éléments finis et sur des particularités de l'ouvrage traité (château d'eau).

Cette partie a été abordée par 24 candidats sur les 53 ayant rendu une copie lors de l'épreuve de Modélisation des Matériaux et des Ouvrages. Ceci constitue un pourcentage plus fort (+25%) que celui de l'an passé, malgré la complexité du sujet (ouvrage 3D). On peut donc penser que les recommandations de l'an passé sur l'épreuve écrite ont été lues et prises en compte.

Sur ces 24 candidats, 8 ont montré qu'ils maîtrisaient à la fois les principes de modélisation et les méthodes numériques. Ils ont apporté des réponses satisfaisantes sur les différents niveaux de sophistication dans la modélisation du château d'eau. Ces candidats se sont nettement démarqués des autres dans la notation de l'épreuve de Modélisation des Ouvrages.

Comme l'an passé, on encourage vivement les candidats à étudier cette matière. Il est rappelé que le coefficient de cette partie est identique à celui de chacune des 2 premières parties.

Géotechnique et environnement

Éléments de correction

1) Quaternaire, il y a environ 1,5 à 2 millions d'années. Dernière période glaciaire = Würm, grossièrement entre 10000 et 100000 ans.

Vallée glaciaire = profil en U (érosion glaciaire, transport de gros éléments)

Vallée fluviale = profil en V (érosion et enfoncement du cours d'eau dans sa vallée, transport de sédiments fins)

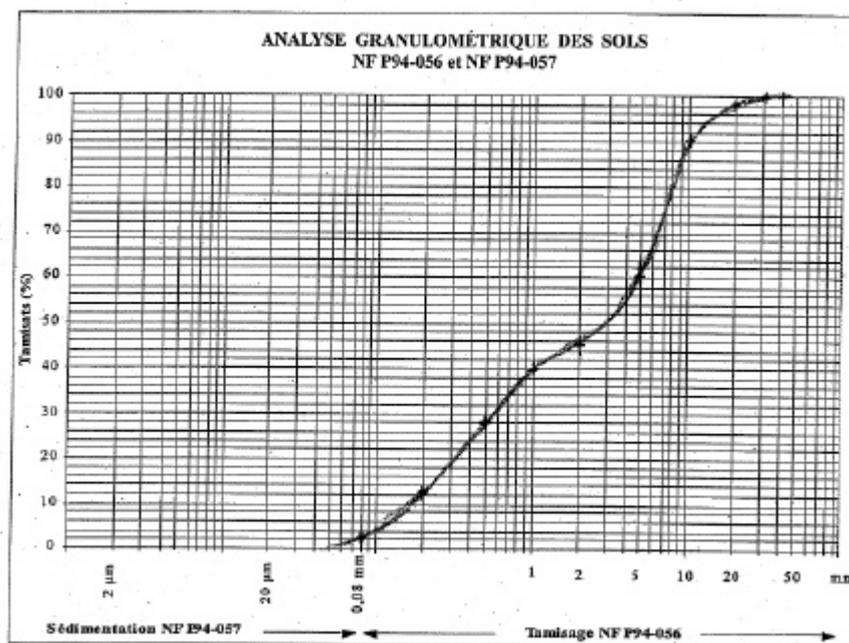
2) Les sols grossiers sont rencontrés en profondeur, les sols plus fins en surface. Possibilité éventuellement de présence de blocs au milieu des sols plus fins. Risque de problèmes de refus prématuré (faux refus) ou de déchirement voire dégrafage de palplanches au battage.

Nature et caractéristiques des matériaux

3) Pesée tare + sol humide, mise à l'étuve 24 h, pesée tare + sol sec. On en déduit la masse de l'eau contenue dans le sol, la masse du sol sec et sa teneur en eau $w = \text{masse eau} / \text{masse sol sec}$.

Indice des vides : $e = 0,58$; degré de saturation $S_r = 42 \%$.

4) La courbe granulométrique est la suivante



On en déduit $d_{10} = 0,15 \text{ mm}$ – $d_{30} = 0,55 \text{ mm}$ – $d_{60} = 5 \text{ mm}$. Le coefficient d'uniformité vaut $CU = 33,3$ et le coefficient de courbure $CC = 0,4$.

Pour ce qui est de la classification du sol : $d_{50} = 3 \text{ mm} > 80 \mu\text{m}$ donc sol grenu. En majorité supérieur à 2 mm donc graves. $< 80 \mu\text{m}$ entre 0 et 5 % donc grave propre. Du fait des valeurs de CU et CC , grave propre mal graduée Gm/GP.

5) D'après Hazen (par exemple) $k = C \cdot (d_{10})^2 = 10^{-4} \text{ m/s}$.

6) Les qualités de compactage sont :

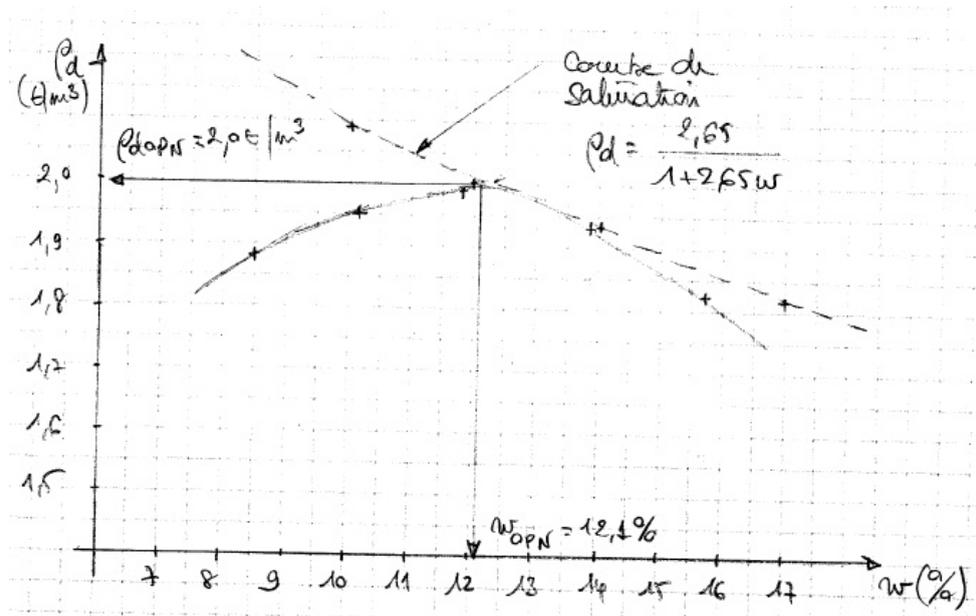
- q4 (pour les remblais) : compacité moyenne sur la couche supérieure à 95 % OPN et compacité en fond de couche (moyenne sur les 8 cm inférieurs de la couche) supérieure à 92 % OPN ;
- q3 (pour les couches de forme) : compacité moyenne sur la couche supérieure à 98,5 % OPN et compacité en fond de couche supérieure à 96 % OPN ;
- q2 (pour les couches de fondation de chaussée) ;
- q1 pour une couche de base de chaussée.

Le pénétrodensitographe PDG1000 est un pénétromètre dynamique qui permet d'évaluer la qualité de compactage d'un remblai. On réalise un essai au cours duquel on mesure l'enfoncement du train de tige par coups. On en déduit par l'application d'une formule de battage type formule des Hollandais la résistance de pointe en fonction de la profondeur. Cette résistance de pointe est ensuite comparée à des droites de référence correspondant au type de matériau et à la classe de compactage visée (droites de références établies par des planches d'essais réalisées sur les différentes classes GTR des matériaux au Centre d'Expérimentation Routière de Rouen).

WOPN = 12,1 % et $\rho_{dOPN} = 2 \text{ t/m}^3$.

Pour un sol compacté q4, la densité moyenne est de 95 % de ρ_{dOPN} soit $1,9 \text{ t.m}^3$.

L'équation de la courbe de saturation est $\rho_d = (S_r \cdot \rho_s) / (S_r + w \cdot \rho_s / \rho_w)$ ce qui, avec $\rho_s = 2,65 \text{ t/m}^3$, $\rho_w = 1 \text{ t/m}^3$ et $S_r = 1$, donne $\rho_d = 2,65 / (1 + 2,65w)$.



7) Les caractéristiques de cisaillement du sol sont $c = 5 \text{ kPa}$ et $\phi = 32^\circ$.

8) On représente les différents points d'essai en coordonnées $(s' ; t')$. Les points 1, 2 et 4 montrent un comportement comparable et conduisent à $c' = 0$ et $f' = 29^\circ$. le point 3 correspond à un essai qui a certainement connu des problèmes dans son déroulement (hétérogénéité de l'éprouvette, problème de saturation...).

9) On déduit de la courbe d'essai $\Delta VLM = V_s + 2 \cdot \Delta V_o = 530 + 2 \times 120 = 770 \text{ cm}^3$ supérieure au volume obtenu lors du dernier palier de l'essai. Il faut procéder comme le recommande la norme pressiométrique soit par la méthode hyperbolique soit par la méthode de la courbe inverse.

Un ordre de grandeur de p_l est 1000 kPa.

Le module pressiométrique est donné par :

$$EM = 2 \cdot (1 + 0,33) \cdot (530 + (120 + 220)/2) \times (550 - 150) / (220 - 120) = 7,5 \text{ MPa.}$$

10) La contrainte admissible par le sol au niveau de fondation est donnée par $q_{adm} = k_p \cdot i \cdot \delta \beta \cdot (p_l^* - p_o)$. Dans le cas présent, en prenant $k_p = 1$ et $\delta \beta = 1$ (charge verticale centrée), il vient $q_{adm} = 924 \text{ kPa}$.

Le projet, conception et vérification

Profil linéaire normal

11) Le phasage proposé peut être le suivant :

- mise en place d'une première paire de palplanches par moyens adaptés (battage, vibrofonçage, vérinage...);
- mise en place de deux niveaux de guides ;
- mise en place des palplanches par paires ;
- une fois le rideau réalisé, remblaiement à l'arrière de celui-ci jusqu'à la cote 40 et terrassement en pied de celui-ci côté rivière à la cote 34,5 pour mise en place des couches de forme et de chaussée.

12) Coefficient actif (de poussée) : $k_a = \tan^2(\pi/4 - f/2)$; Coefficient passif (de butée) : $k_p = \tan^2(\pi/4 + f/2)$

La configuration la plus défavorable pour l'écran est obtenue en négligeant les charges routières sur la voie en pied de l'écran (action stabilisante).

13) On écrit l'équilibre des forces et l'équilibre des moments par rapport au point d'accroche du tirant sur le rideau de palplanches. Si on note f la fiche du rideau de palplanches et T la tension dans le tirant, il vient $f = 5,4 \text{ m}$ et $T = 125,2 \text{ kN/ml}$.

14) Pour un tirant tous les 4m, la composante horizontale de la tension dans un tirant est de 500 kN. La tension dans le tirant est alors donnée par $T = 500 / \cos 15 = 520 \text{ kN}$.

Si on note T_l la traction limite dans le tirant, on doit avoir $T = T_l = \pi \cdot D_s \cdot L_s \cdot q_s$ avec $L_s = 5 \text{ m}$ et $D_s = \alpha D = 1,2 \times 0,12 = 0,144 \text{ m}$. Il vient $q_s = 520 / (3,14 \times 5 \times 0,144) = 230 \text{ kPa}$ à comparer avec les 237,5 kPa donnés par l'essai de clou.

Profil particulier au droit de la culée existante

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

Etat initial (avant projet)

15) Le torseur résultant à la base de la semelle (sans pondération des actions) est :

Effort horizontal : $H = 28,2 + 25,2 + 30 = 83,4 \text{ kN par ml}$

Effort vertical : $V = 37,5 + 45 + 130 + 71,3 + 37,8 + 17 + 80 = 418,6 \text{ kN par ml}$

Moment stabilisateur : $M_{stab} = 56,3 + 54 + 156 + 160,3 + 85,1 + 20,4 + 96 = 628,1 \text{ kN.m par ml}$

Moment moteur : $M_{mot} = 28,2 + 37,8 + 129 = 195 \text{ kN.m par ml}$

16) La stabilité du mur de front de la culée au renversement et au glissement sur la base est assurée.

17) On obtient un diagramme de contraintes trapézoïdal sous la semelle de fondation et il vient $\sigma_{3/4} = 0,75.\sigma_{max} + 0,25.\sigma_{min} = 205 \text{ kPa}$.

A comparer avec la capacité portante du sol de fondation $q_{max} = 250 \text{ kPa}$ déduite de la relation de Terzaghi. La stabilité de la culée au poinçonnement du sol de fondation est assurée.

Etat final (projet)

18) Le fait de terrasser devant le mur en culée de l'ouvrage demande de scier le patin avant de la semelle de la culée. Ceci remet en cause la stabilité de cette culée (stabilité au poinçonnement du sol de fondation zone B, stabilité au renversement ou au glissement du sol sur la base zone A). La stabilité de la zone B lors du terrassement sous la culée est également à considérer.

Techniques envisageables sur la zone A

On peut jouer sur la zone A en réduisant la poussée des terres sur la culée : allègement de remblai, réalisation de massifs autostables par exemple par mise en place de renforcement géotextile. Est ce bien réaliste compte tenu du fonctionnement du projet (garder la circulation sur la chaussée en phase travaux) ?

On peut envisager, toujours sur la zone A, de mettre en place des tirants d'ancrage permettant de rééquilibrer la poussée.

Techniques envisageables sur la zone B

Pour améliorer la zone B vis-à-vis d'une insuffisance de portance des sols de fondation, on peut choisir d'augmenter les caractéristiques mécaniques des sols (par exemple par injection d'un produit adapté en fonction de la perméabilité des terrains) ou de reporter les charges sur une couche de meilleures caractéristiques (reprise par micropieux par exemple).

Un soutènement sera réalisé en protection de talus de déblai (réalisation d'un mur cloué, car absence d'eau).

19) Stabilité de la culée de l'ouvrage

Détermination des efforts : descentes de charge, poussée des terres et des surcharges, tirants (composantes verticale et horizontale), éventuels micropieux (composantes verticale et horizontale).

Equilibre des efforts horizontaux

Descentes de charges sur semelle et compatibilité avec la portance du sol de fondation éventuellement amélioré par injection, ou avec la portance des éléments de fondation profonde.

Talus sous la fondation de la semelle

Stabilité de mur cloué

20) Le suivi topographique pourrait concerner :

- le tassement de la culée ;
- le basculement de la culée vers la rivière ;
- le basculement de la culée dans le plan du mur de front ;

ou les rotations associées.

Alerte par exemple sur tassement différentiel de la culée (règle du 1/1000 de la portée) à traduire en rotation dans toutes les directions).

FIGURES

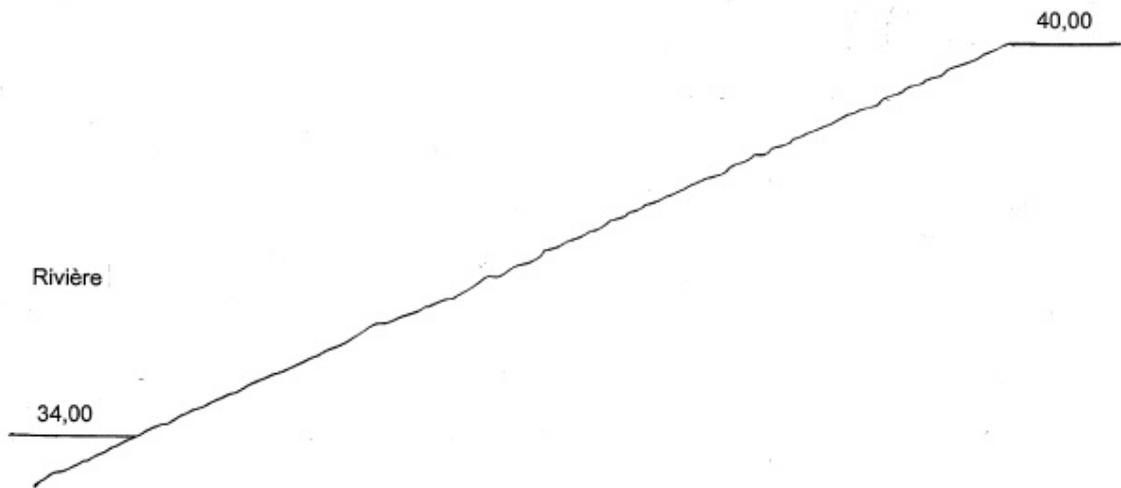


Figure 1 - Profil type de la berge

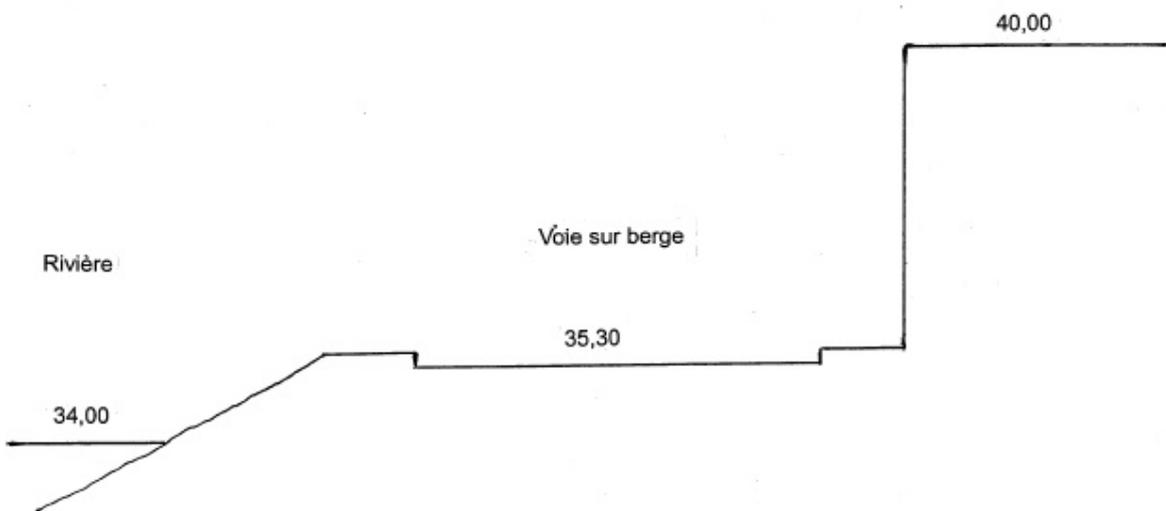


Figure 2 - Profil type de la berge après réalisation de la voie sur berge

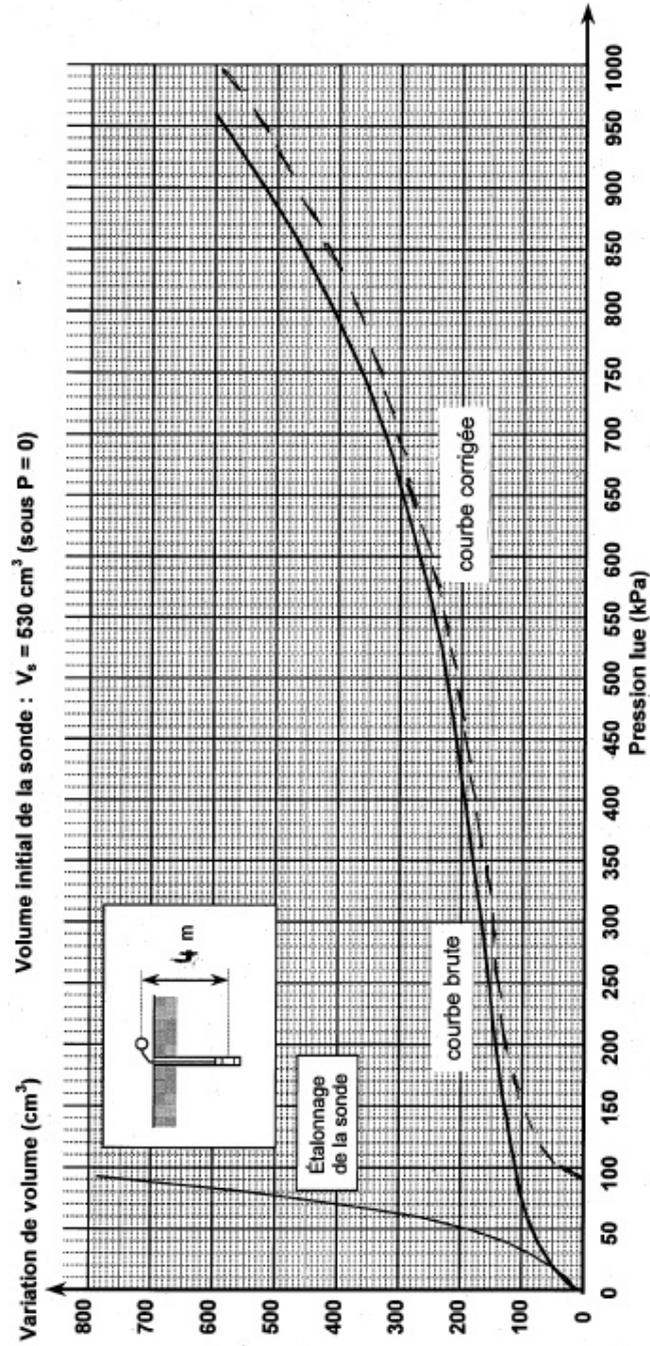


Figure 3 – Essai pressiométrique à 4 m de profondeur.

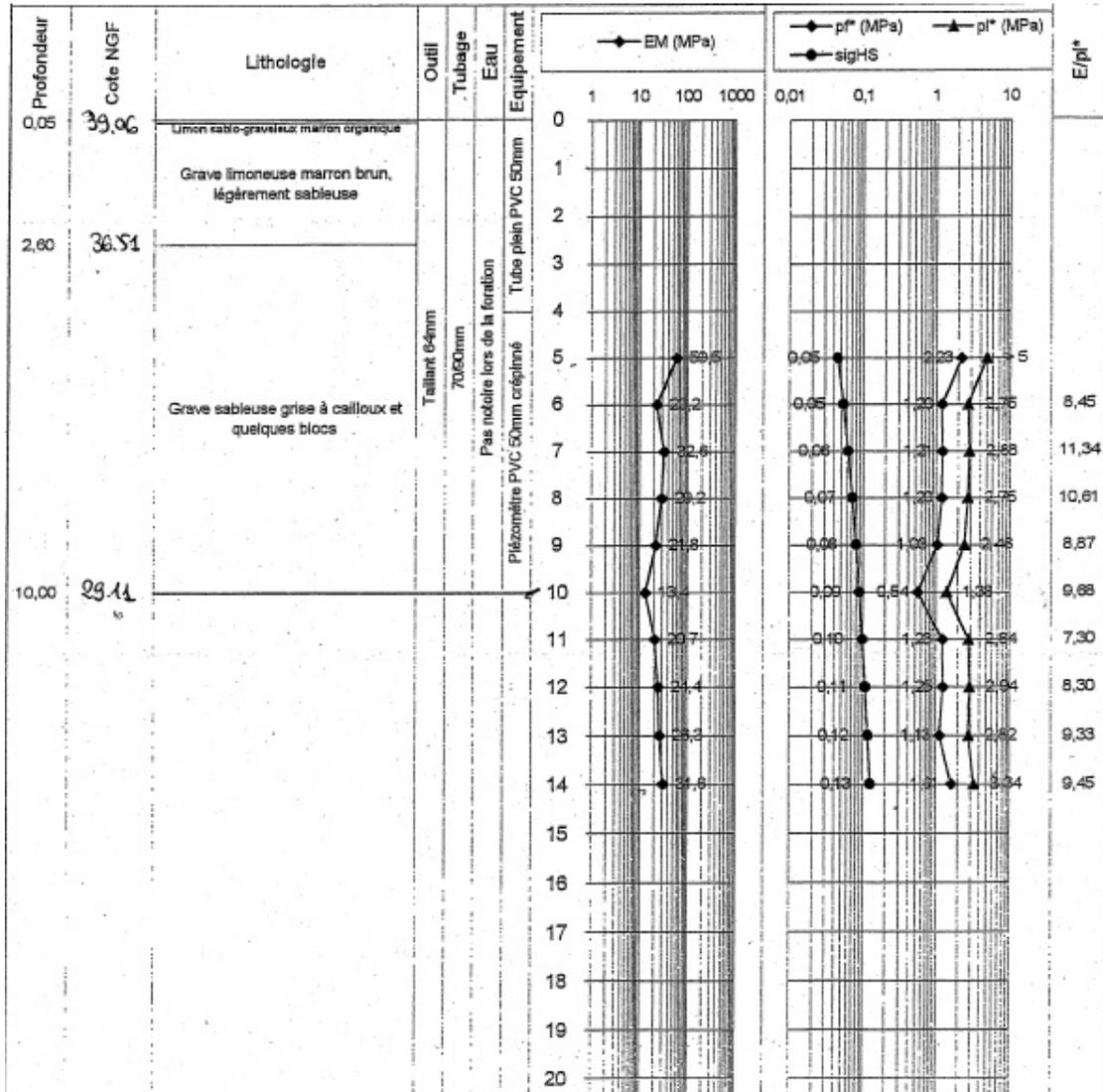


Figure 4 – Forage pressiométrique

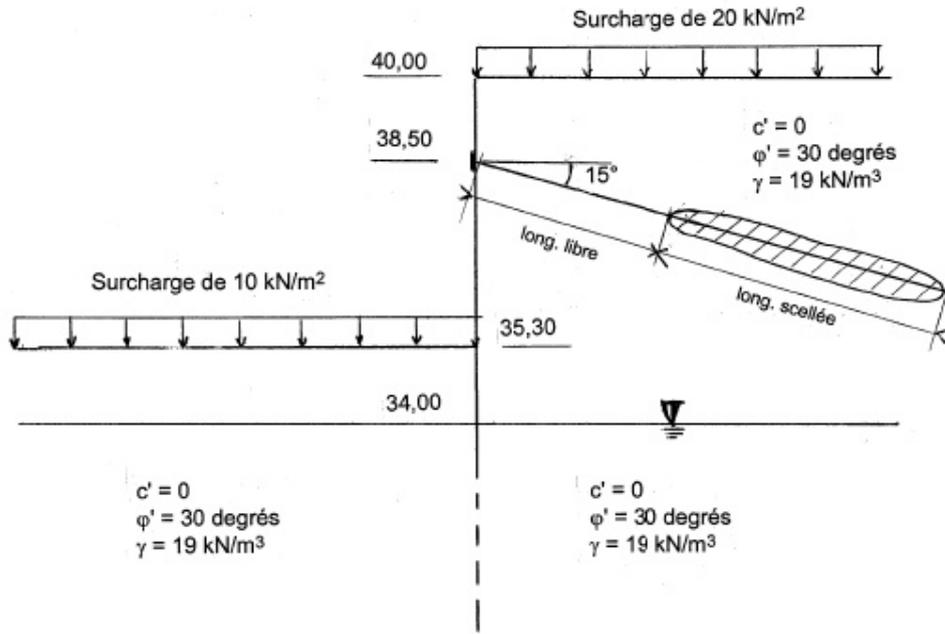


Figure 5 – Profil de calcul d'un écran de soutènement pour la voie sur berge.

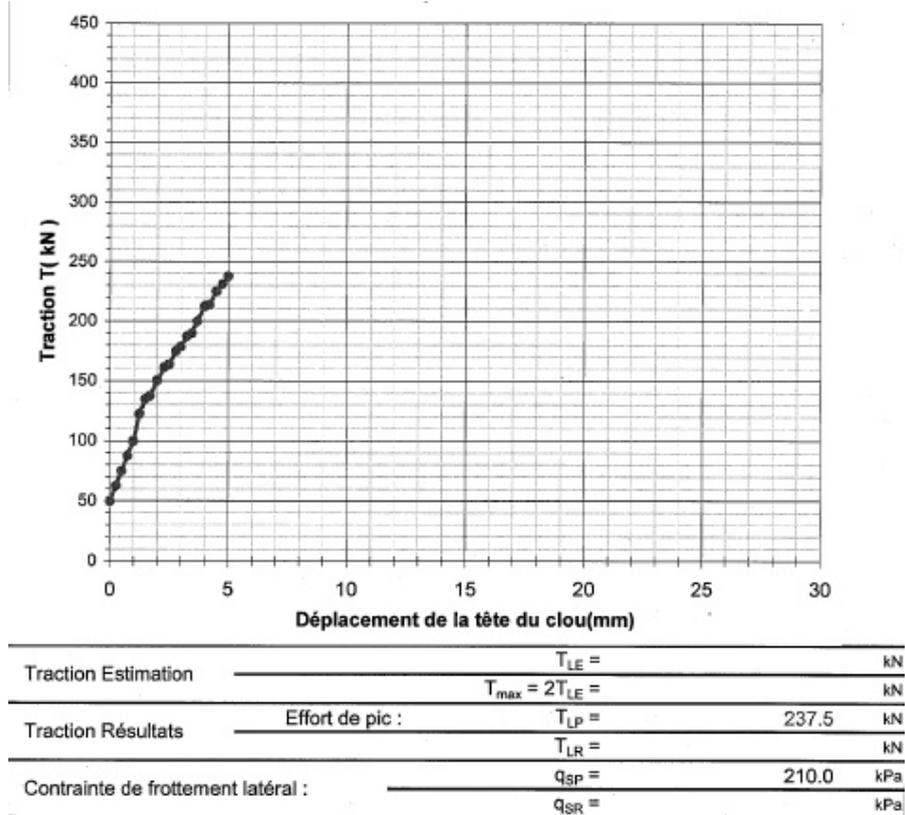


Figure 6 – Essai de tirant.

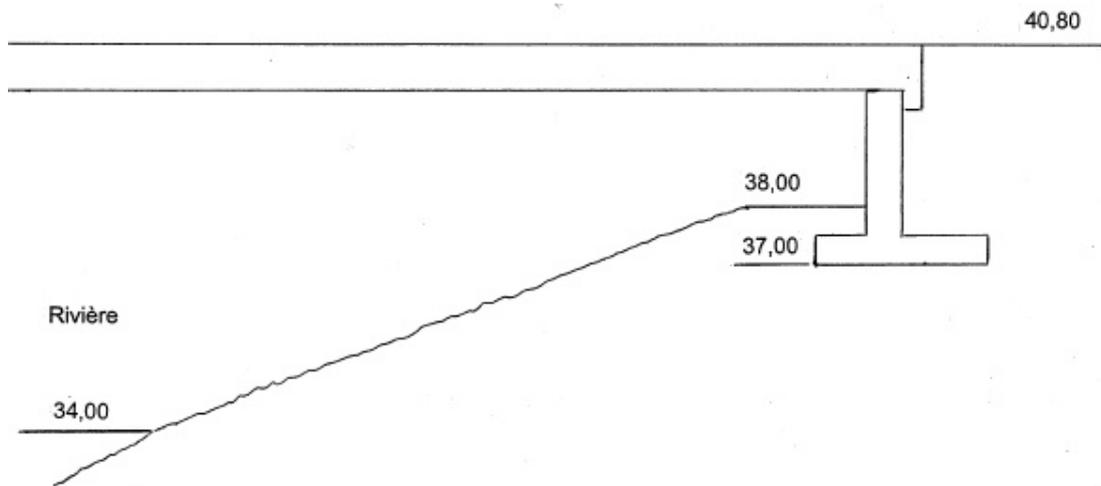


Figure 7 – Profil au droit de la culée de l'ouvrage : état initial.

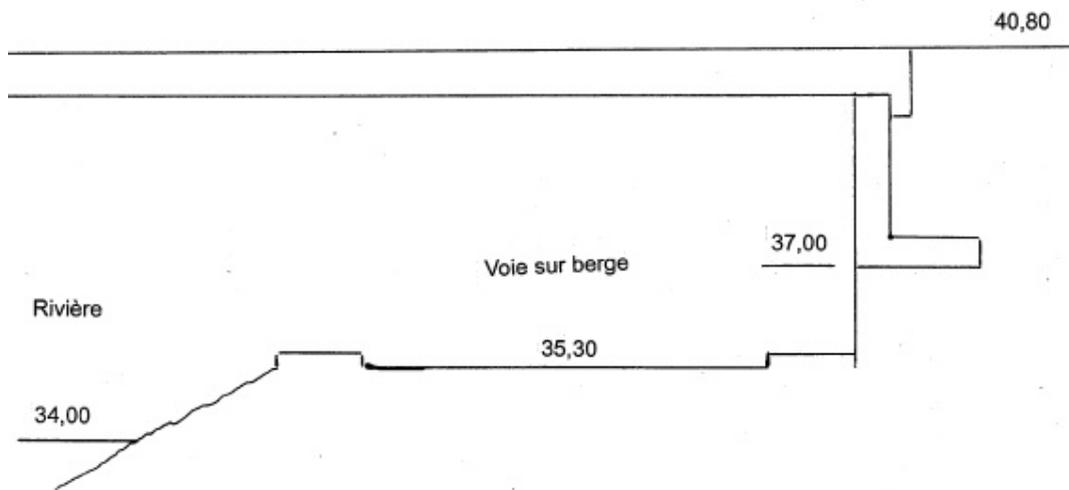


Figure 8 – Profil au droit de la culée de l'ouvrage : état final.

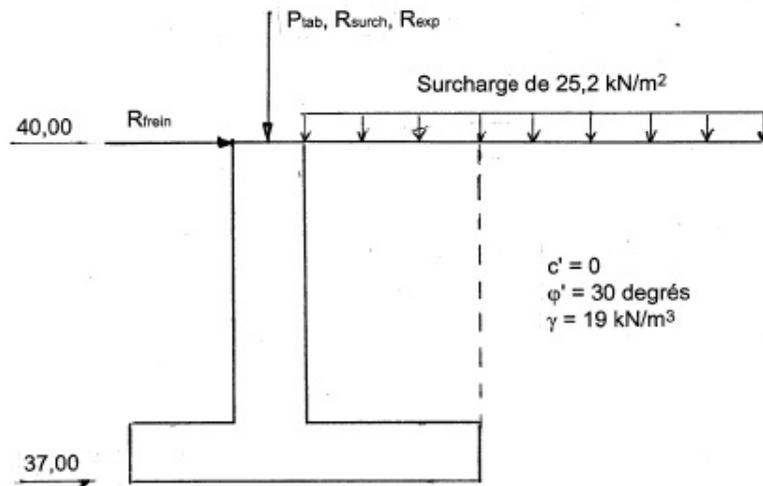


Figure 9 – Profil simplifié pour les calculs sur le mur de front de la culée.

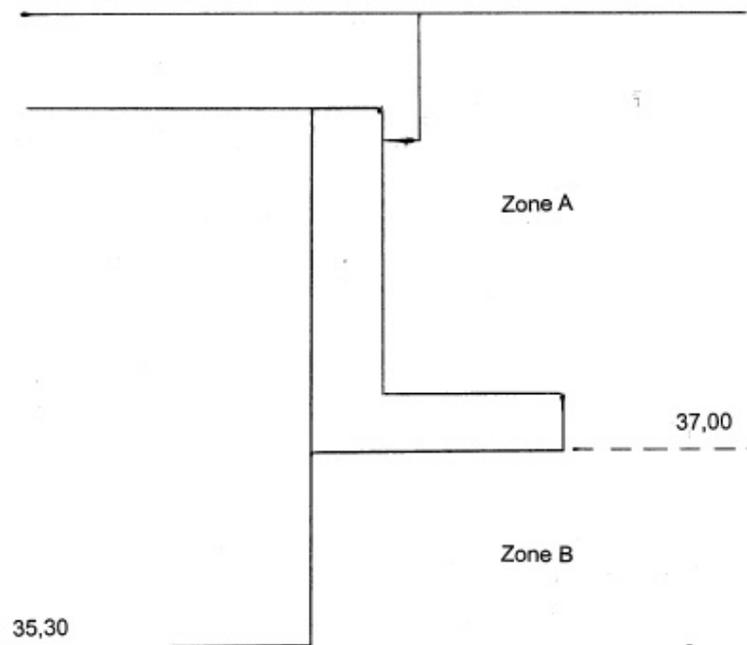
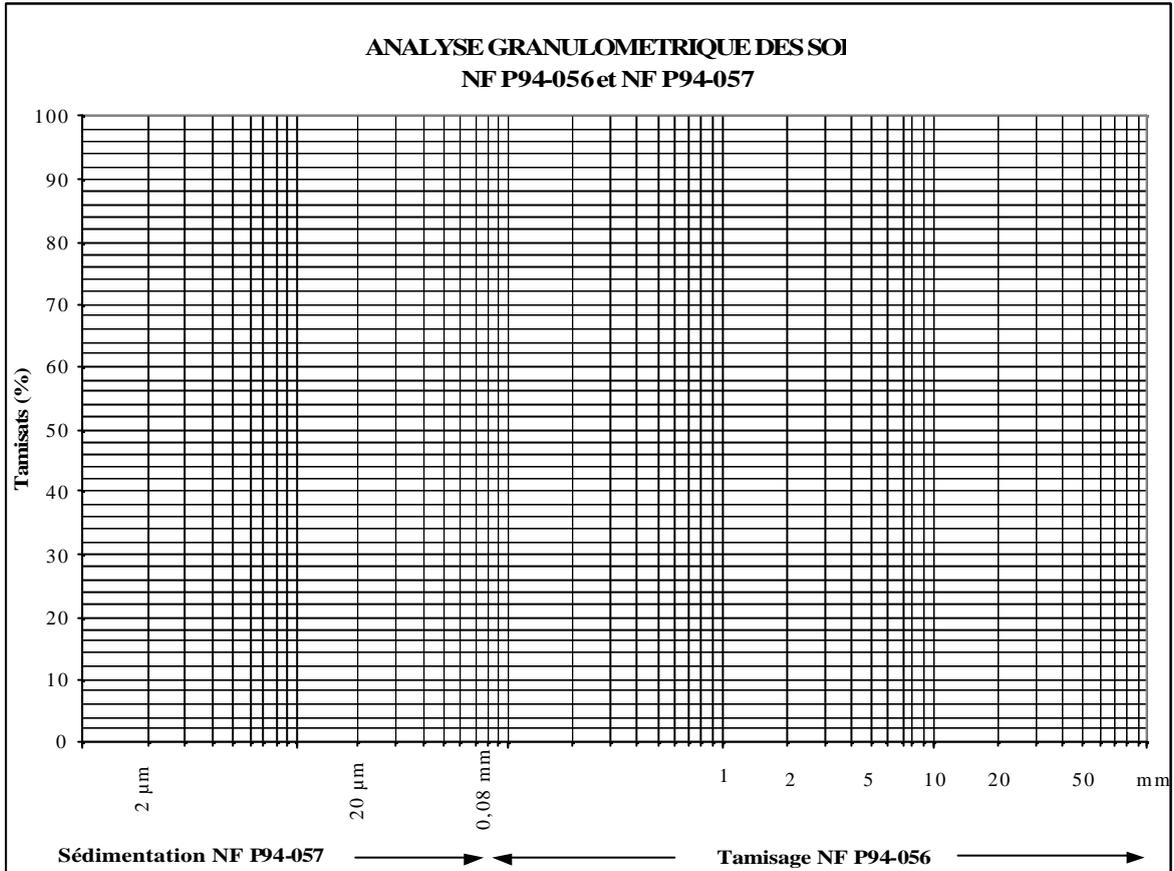


Figure 10 – Profil au droit de la culée après réalisation de la voie sur berge.

ANNEXES



Classification USCS/LCPC des sols

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

Calcul de la pression limite nette équivalente

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

2.1. - Fondations superficielles

2.1.1. - Terrain homogène

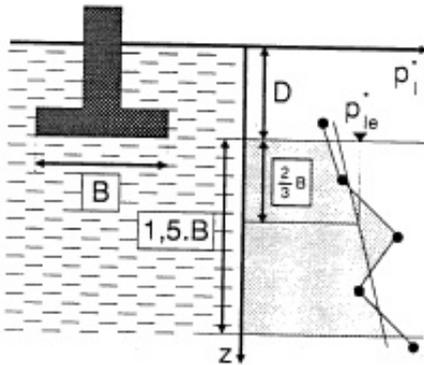
Le terrain est constitué sous la fondation, jusqu'à une profondeur d'au moins $1,5 \cdot B$, d'un même sol, ou de sols de même type et de caractéristiques comparables.

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

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

La pression limite équivalente est prise égale à :

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



2.1.2. - Terrain non homogène

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

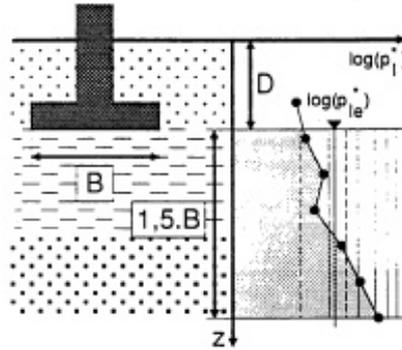
Pour le calcul de p_{ie}^* , après avoir éventuellement éliminé les valeurs singulières (dues, par exemple, à la présence de blocs ou concrétions), on procède à une moyenne géométrique sur la tranche de sol $[D; D + 1,5 \cdot B]$:

$$p_{ie}^* = \sqrt[p_{i1}^* \cdot p_{i2}^* \cdots p_{in}^*]$$

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

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

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



Sujet Géotechnique et Environnement

Rapport du jury

Avec ce sujet, 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 réalisation d'une voie sur berge et de stabilisation d'une culée d'ouvrage, la composition traitait des aspects relatifs :

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

Le sujet était rédigé de façon à ce que les différentes parties puissent être traitées de manière relativement indépendante.

Le nombre de candidats ayant composé est de 50. Les candidats ont été notés sur 10 points.

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, et en particulier aux schémas, tant sur le fond (clarté des développements et des schémas) que sur la forme.

L'attention des candidats est également toujours attirée sur l'avantage qu'ils trouveront à procéder à une lecture attentive du sujet :

- des questions sont « faciles », voire évidentes, et il est toujours étonnant d'observer qu'elles ne sont pas traitées par le plus grand nombre,
- des questions sont accompagnées d'éléments permettant leur résolution, ici encore souvent négligés par les candidats.

La partie 1 comportait 2 questions ayant trait à la géologie du site.

Cette partie du problème a été abordée par une majorité des candidats, mais les questions n'ont souvent été traitées souvent que de façon fragmentaire :

- les différences entre vallée glaciaire et vallée fluviale n'ont pas toujours été présentées de manière précise,
- les risques au niveau du chantier de la présence éventuelle de matériaux glaciaires érodés ont été mal cernés, et les propositions de reconnaissances complémentaires de ces hétérogénéités potentielles ont souvent été incomplètes.

La partie 2 comportait 8 questions liées à la nature et aux caractéristiques des matériaux.

- les notions d'indice des vides et de degrés de saturation, ainsi que l'analyse granulométrique des sols et leur classification sont bien maîtrisées par la majorité des candidats,
- la relation entre perméabilité des sols et granulométrie a été traitée de manière hétérogène, malgré la proposition en formulaire des relations les plus courantes dans ce domaine. Certaines

réflexions intéressantes ont été menées, mais on peut regretter que la moitié des candidats n'ait pas proposé un ordre de grandeur sur la base des relations indiquées,

- la notion de qualité de compactage et l'existence du PDG1000 sont ignorées de la grande majorité des candidats. Le tracé de la courbe Proctor et son exploitation ont par contre été mieux maîtrisées, même si trop peu de candidats sont allés jusqu'à la courbe de saturation,
- le principe des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande, à l'appareil triaxial ou de l'essai pressiométrique sont généralement connus des candidats. Le passage à l'interprétation de ces essais a eu un succès plus réduit.

Partie 3 : le projet, conception et vérification

La partie 3 comportait 10 questions ayant trait au projet linéaire (questions 11 à 14) ou se centrant sur les modifications de la culée de l'ouvrage (questions 15 à 20).

Cette partie du problème a été peu traitée à l'exception de la question 11 :

- la question 11 consistait à proposer des schémas constructifs en section courante. Il s'agissait donc de proposer un phasage réaliste de réalisation d'un rideau de palplanches avec un niveau de tirant. Des schémas clairs et commentés précisant le déroulement des étapes constructives étaient des éléments de compréhension appréciables,
- les questions 12 à 14 concernaient le calcul de ce rideau. Elles ont été partiellement abordées par un petit nombre de candidats,
- les questions 15 à 17 concernaient la stabilité du mur de front de la culée de l'ouvrage dans son état actuel. Peu de candidats ont abordé ces différentes questions,
- les questions 18 à 20 traitaient la culée dans son état final après découpage du patin côté rivière de la semelle de fondation de l'appui actuel, et le suivi de ses éventuelles déformations pendant le chantier. Ces trois questions indépendantes entre elles et de tout ce qui précédait ont eu un succès confidentiel auprès des candidats. La question 20 traitant de l'instrumentation de la culée n'a pas connu de réponse satisfaisante, les candidats qui l'ont abordée se sont limités à des généralités.

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 donc composé sur l'ensemble des deux premières parties de l'épreuve ;
- ont traité de façon opportune certaines questions de la seconde partie de l'épreuve, notamment celles concernant les phasages constructifs.

Les correcteurs regrettent :

- que les questions liées aux phasages constructifs ou à l'instrumentation de la culée de l'ouvrage n'aient pas été davantage traitées. Ces questions ne nécessitent pas de compétences de calcul particulières et demandent simplement du bon sens.
- que les calculs simples demandés (poussée et butée sur un rideau de palplanches ancrées, stabilité d'un mur de soutènement) n'aient pas été traitées pas plus de candidats.

Épreuve « Qualité des ambiances »

Session 2010

Partie « Acoustique »

Acoustique du bâtiment et environnementale

Traitement acoustique des bâtiments

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

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

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

- (a) **Rappeler** la formule de Sabine, permettant de calculer le temps de réverbération d'une salle (noté TR), en fonction du volume V , de la surface S et du coefficient d'absorption α_0 de la salle.

Eléments de réponse

$$TR = 0.16 \frac{V}{A} = 0.16 \frac{V}{\alpha_0 S}$$

Remarque : on trouve également d'autres formules équivalentes, avec une précision plus importante sur le facteur « 0.16 », en prenant 0.163 ou 0.161 (en fonction du choix de la valeur de référence de la célérité du son).

- (b) **Introduire** la notion d'aire absorption équivalente de la salle (notée A).

Eléments de réponse

Dans la relation précédente, nous avons introduit le terme A qui désigne l'aire d'absorption équivalente (en m^2), produit de la surface de la salle par le coefficient d'absorption moyen de la salle.

$$A = \alpha_0 S$$

A noter qu'il est également possible de considérer, quand la situation se présente, l'absorption α_i propre à chaque élément de surface S_i de la salle :

$$A = \sum_i a_i S_i$$

(c) **Rappeler** les hypothèses de validité de la formule de Sabine.

Eléments de réponse

La formule de Sabine repose essentiellement sur l'hypothèse de champ diffus, qui traduit le fait que :

- Le champ sonore est homogène dans la salle (TR et densité d'énergie);
- le flux d'énergie (i.e. l'intensité sonore) est nulle en tout point de la salle.

Pour compléter (mais pas nécessaire), il est important de préciser que cette hypothèse de champ diffus est applicable essentiellement quand :

- l'absorption acoustique est « relativement » homogène et faible sur la surface de la salle ;
- les dimensions de la salle sont « relativement » homogènes (salle quasi-cubique) ;
- les dimensions de la salle sont « relativement » grandes devant la longueur d'onde ;
- les parois de la salle sont « relativement » diffuses ;
- on néglige le champ direct.

(d) Par nature, le traitement acoustique nécessaire à la salle en question vient modifier l'aire d'absorption équivalente, que l'on notera A_{opt} , de manière à obtenir le temps de réverbération optimal TR_{opt} . En introduisant la différence d'aire d'absorption équivalente $\Delta A = A_{opt} - A$, **montrer** que la valeur idéale a_M du coefficient d'absorption du dispositif de traitement acoustique a pour expression :

$$a_M = a_0 + \frac{\Delta A}{S_M} \quad (1)$$

Eléments de réponse

$$TR = 0.16 \frac{V}{A} = 0.16 \frac{V}{a_0 S}$$

Reprenant la définition de l'aire d'absorption équivalente, on a :

$$\Delta A = A_{opt} - A = (a_0 S_0 + a_M S_M) - (a_0 S_0 + a_0 S_M) = a_M S_M - a_0 S_M$$

ce qui donne finalement :

$$a_M S_M = a_0 S_M + \Delta A$$

soit :

$$a_M = a_0 + \frac{\Delta A}{S_M}$$

- (e) Application numérique : **compléter** le tableau N°1 en considérant que la surface S_M vaut 75 m^2 .

Eléments de réponse

Fréquence	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
ν	2,50	1,17	0,77	2,67	1,43	1,25
A	16,00	34,19	51,95	14,98	27,97	32,00
a_0	0,05	0,11	0,17	0,05	0,09	0,11
TR_{opt}	1,20	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00
A_{opt}	33,33	36,36	40,00	40,00	40,00	40,00
ΔA	17,33	2,18	-11,94	25,02	12,03	8,00
a_M	0,28	0,14	0,01	0,38	0,25	0,21

- Tableau obtenu en prenant le facteur « 0.16 » dans la formule de Sabine ; les valeurs peuvent changer légèrement si un facteur 0.163 ou 0.161 a été pris dans la formule de Sabine
- Attention à l'arrondi des nombres
- Conserver deux chiffres après la virgule
- Ce tableau montre nettement qu'il faudra traiter les bandes de fréquences 125 Hz, 1000 Hz et 2000 Hz en priorité, pour atteindre les objectifs en matière d'absorption acoustique

- (f) **Présenter** et **discuter** différents dispositifs qui permettraient d'obtenir le traitement acoustique souhaité. La discussion pourra porter sur les points suivants : type de dispositifs, phénomènes mis en jeu, efficacité en fréquence, encombrement du dispositif dans la salle, contraintes de sécurité, coût d'installation...

Eléments de réponse

Type de dispositifs et phénomènes mis en jeu :

- **Diaphragmes** : les diaphragmes agissent suivant le *principe* « masse-ressort » (oscillateur amorti), et sont constitués en pratique de plaques réfléchissantes de grandes dimensions pouvant vibrer en flexion et disposer contre un mur rigide avec une lame d'air entre le mur et la plaque. Ce dispositif agit normalement autour d'un *mode fondamental* (fréquence fondamentale ou fréquence propre). Il est également possible de disposer un matériau absorbant dans la lame d'air (en général contre le mur, de type laine de verre ou laine de roche par exemple), ce qui a pour effet d'augmenter l'énergie acoustique dissipée par le matériau (i.e. augmentation de l'absorption acoustique du système). L'efficacité d'un tel dispositif est plutôt localisée aux « basses fréquences », mais peut être augmentée à des fréquences plus élevées en ajoutant un enduit (flocage par exemple) sur la plaque ;
- **Résonateurs de Helmholtz** : le principe de ce dispositif est utilisé par trois types de matériaux : les résonateurs isolés, les résonateurs alvéolés et les plaques perforées.
 - i. **Résonateurs isolés** : le résonateur isolé est en général constitué d'un volume (le

résonateur) débouchant dans le domaine de propagation à travers un col caractérisé par une longueur et une section. Suivant la présence ou non d'un *matériau dissipatif dans le volume du résonateur* (en général au fond du résonateur), le dispositif aura pour effet soit d'atténuer (avec matériau dissipatif), soit de renforcer (sans le matériau dissipatif) certaines composantes spectrales. L'efficacité d'un résonateur est localisée autour de la fréquence propre du résonateur (i.e. le *résonateur est « accordé » à une fréquence donnée*) ;

ii. **Résonateurs alvéolés** : ce dispositif obéit aux mêmes principes que le résonateur isolé, si ce n'est qu'il s'agit d'une juxtaposition de résonateurs dont le col possède la même section que la cavité. C'est le cas par exemple de matériaux constitués de parpaings creux à cavité apparente ou de nids d'abeille.

iii. **Plaques perforées** : une plaque perforée rigide (avec une certaine épaisseur), montée comme un diaphragme à une certaine distance d'un mur rigide, se comporte comme un ensemble de résonateurs de Helmholtz, à condition toutefois que tous les trous situés en face d'une même cavité (la cavité étant constituée par la plaque et les tasseaux de fixation de la plaque sur le mur rigide) soient attaqués en phase.

- **Matériaux poreux à texture rigide** : ces matériaux (pierres poreuses, panneaux perforés, copeaux ou fibres agglomérés, plâtre fibreux) sont caractérisés par une *dissipation purement acoustique par frottement fluide*. Pour définir les propriétés acoustiques de ce type de matériau, les pores peuvent être assimilés à des capillaires. Pour un matériau de type pierre poreuse, l'efficacité en fréquence du matériau est alors définie par la fréquence de coupure d'un capillaire, qui permet ensuite de déterminer le rayon du capillaire et le nombre de trous par élément de surface. Pour un matériau de type panneau rigide microperforé, la fréquence propre et la largeur de bande passante souhaitée sont fonction de la distance entre la plaque et le mur rigide.

- **Matériaux poreux à paroi déformable** : la différence entre ce type de matériau et les matériaux poreux à texture rigide, réside dans la *déformation des parois*, ce qui joue un rôle essentiel dans les *phénomènes de dissipation*, soit du fait de la modification de l'écoulement dans le matériau soit du fait de la dissipation structurelle. Parmi les matériaux de ce type les plus courants, on citera les laines minérales, les matériaux fibreux, les mousses, les cartons poreux... En général l'absorption acoustique de ce type de matériaux est maximale pour les fréquences plus élevées.

Choix des matériaux / fréquence à traiter : le choix d'un dispositif parmi ceux présentés plus haut dépend avant tout de la bande de fréquence à traiter. Pour « amortir » les bandes de fréquences les plus basses (125 Hz dans notre exemple), il conviendra de choisir des diaphragmes ou des résonateurs de Helmholtz. Pour « amortir » des bandes de fréquences plus élevées (1000 Hz et 2000 Hz dans notre exemple), les plaques perforées éventuellement associées à des matériaux poreux sont souvent la meilleure solution.

Place disponible : En fonction de la place disponible et des contraintes d'utilisation du local, il faudra choisir le matériau le plus adapté. Le problème se pose en général pour le traitement en basse fréquence, qui demande des systèmes de taille plus importante : à fréquence d'accord identique (c'est le cas à 125 Hz dans notre exemple), on préférera par exemple un diaphragme à un résonateur de Helmholtz.

Autres contraintes liées au type d'activité :

- Entretien, résistance et pérennité dans le temps des matériaux ;
- résistance à la chaleur à proximité de sources de chaleur ;
- dégagement de fumée en cas d'incendie ;

- coût de l'installation
- ...

Problème n°2 : Le résonateur de Helmholtz

- (a) Le résonateur est un des systèmes de base du traitement acoustique d'une salle. **Rappeler et discuter** les différentes fonctions d'un résonateur dans le cadre d'un traitement acoustique d'une salle (le candidat ne se limitera pas à la simple fonction de « résonance »).

Éléments de réponse

Pour plus de détails, le candidat pourra se reporter à la réponse de la question (f) du problème n°1. Pour résumer, suivant la présence ou non d'un matériau dissipatif dans le volume du résonateur, le dispositif aura pour effet soit d'atténuer (avec matériau dissipatif), soit de renforcer/amplifier (sans le matériau dissipatif) certaines composantes spectrales.

- (b) Détermination de la fréquence propre d'un résonateur : le résonateur est assimilé à une cavité fermée de volume V , communiquant avec l'extérieur *via* un tube étroit de longueur L et de section A (figure 1). L'air est assimilé à un gaz parfait, de masse volumique ρ . Les effets dissipatifs dans la cavité sont négligés.
- i. Soumise à une excitation extérieure (une source sonore), la totalité du volume d'air (colonne d'air) dans le tube est supposée se déplacer d'un déplacement élémentaire x dans la cavité. **En déduire** la variation de volume dV dans la cavité.

Éléments de réponse

Très simplement, la variation de volume est égale au produit de la section du tube (ou col) par le déplacement élémentaire :

$$dV = A x$$

- ii. En appliquant la loi de Laplace pour un gaz parfait (rappel $PV^\gamma = \text{constante}$, γ étant le rapport des capacités thermiques), **montrer** que la variation de pression dP dans la cavité s'écrit :

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

Éléments de réponse

Il suffit de dériver la loi de Laplace :

$$d(PV^\gamma) = dP \times V^\gamma + P \times d(V^\gamma) = dP \times V^\gamma + P \times \gamma V^{\gamma-1} dV = 0$$

Ce qui donne :

$$dP \times V = -\gamma P dV$$

Soit, compte-tenu du résultat de la question (i) :

$$dP = -\frac{\gamma P dV}{V} = -\frac{\gamma P}{V} Ax$$

- iii. **Exprimer** la force de rappel dF sur la colonne d'air, engendrée par la variation de

pression dP .

Eléments de réponse

La force de rappel est égale au produit de la variation de pression par la section du tube, soit (le signe négatif provenant bien du fait qu'il s'agit de la force de rappel) :

$$dF = dP \times A = -\frac{g P}{V} A^2 x$$

- iv. En appliquant la relation fondamentale de la dynamique, **écrire** l'équation du mouvement de la colonne d'air.

Eléments de réponse

La relation fondamentale de la dynamique, appliquée à la colonne d'air, impose que la somme des forces (la force de rappel) est égale à la force d'inertie. La force d'inertie est égale à la masse multipliée par l'accélération, la masse étant le produit de la masse volumique par le volume d'air dans le tube, soit la section A par la longueur L du tube. D'où :

$$dF = rAL \frac{d^2 x}{dt^2}$$

Soit :

$$rAL \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{g PA^2}{V} x = 0$$

- v. **Exprimer** la forme de solution de cette équation et **en déduire** la fréquence propre f_0 du résonateur, en fonction de la célérité du son dans l'air (rappel $c^2 = \gamma p / \rho$), de la section A et de la longueur L du tube, et du volume V de la cavité.

Eléments de réponse

En introduisant l'expression de la célérité du son dans l'équation précédente, il vient immédiatement :

$$rAL \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{r c^2 A^2}{V} x = L \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{c^2 A}{V} x = 0$$

En introduisant la pulsation propre et la fréquence propre suivantes :

$$w_0 = 2\pi f_0 = c \sqrt{\frac{A}{VL}}$$

On obtient alors l'équation d'un oscillateur harmonique à un degré de liberté :

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + w_0^2 x = 0$$

dont la solution est de la forme est en :

$$x(t) = C \cos(w_0 t + j)$$

l'amplitude et le déphasage étant fonction des conditions initiales. On peut également proposer une

formule de solution « exponentielle ».

La fréquence de propre du résonateur est alors :

$$f_0 = \frac{c}{2p} \sqrt{\frac{A}{VL}}$$

vi. Application numérique : **calculer** la fréquence de résonance pour une cavité de volume $V = 500 \text{ cm}^3$ avec un tube de longueur $L = 15 \text{ cm}$ de rayon 2 cm .

Éléments de réponse

Application numérique : $f_0 = \frac{340 \times 100}{2p} \sqrt{\frac{p \times 2^2}{500 \times 15}} = 221.5 \text{ Hz}$

AGRÉGATION DE GÉNIE CIVIL

Épreuve « Qualité des ambiances »

Session 2009

Partie « Acoustique »

Acoustique du bâtiment et environnementale

Fréquence	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
TR	2,50	1,17	0,77	2,67	1,43	1,25
A						
a_0						
TR_{opt}	1,20	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00
A_{opt}						
ΔA						
a_M						

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

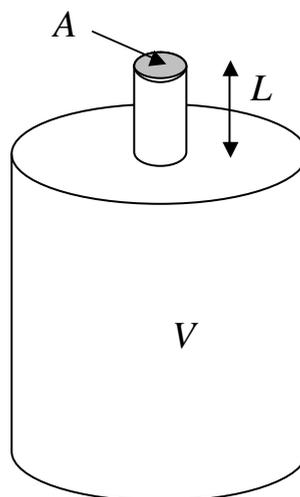


Figure 1 – Géométrie d'un résonateur d'Helmholtz.

AGRÉGATION DE GÉNIE CIVIL

Épreuve « Qualité des ambiances »

Session 2010

Partie « Thermique »

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

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

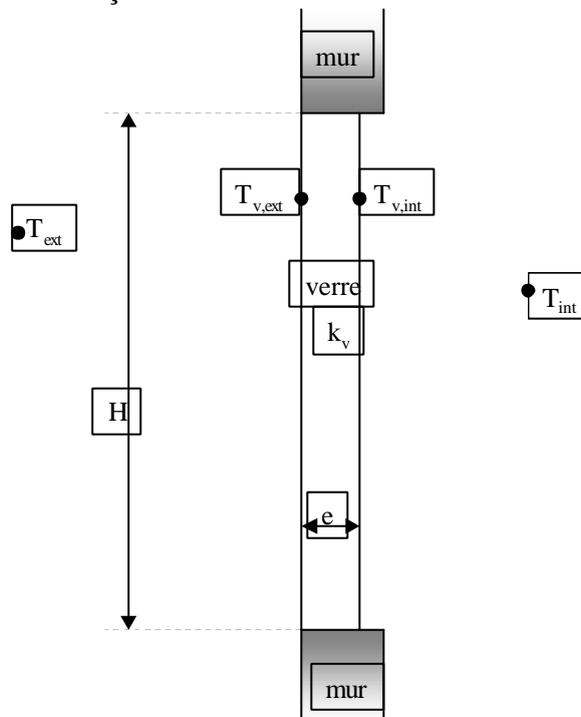
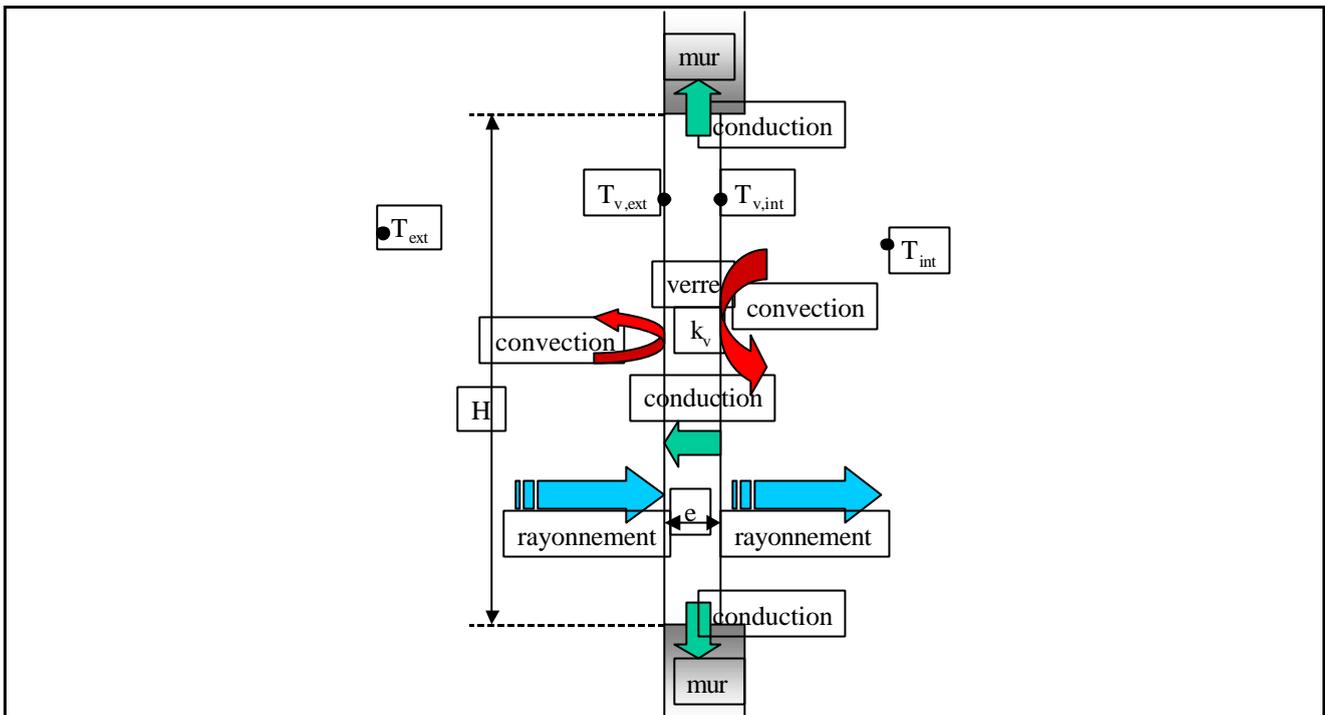


Figure 2 : installation simple vitrage

- 1- Expliquer, à l'aide d'un schéma, les différents phénomènes de transfert de chaleur qui sont mis en jeu dans ce problème. Pour chaque phénomène, préciser entre quel composant et quel autre il a lieu.

Eléments de réponse



Conduction → dans l'épaisseur du verre et entre le verre et le mur (mais négligé dans la suite)
 Convection → entre l'air et le verre (convection naturelle à l'intérieur et forcée à l'extérieur)
 Rayonnement → entre les parois intérieures et le verre et entre l'environnement radiatif extérieur et le verre, et (mais neutre pour notre bilan sur le verre) rayonnement entre les parois intérieures et l'environnement radiatif extérieur (si verre transparent à ce rayonnement, ce qui n'est pas le cas ici, comme nous le démontrerons dans la suite)

2- On négligera dans toute la suite les effets de bord dus au mur. Déterminer à partir des données ci-après les valeurs des coefficients d'échange convectifs $h_{e,int}$ et $h_{e,ext}$ de chaque côté du vitrage. Afin de simplifier les calculs, on pourra supposer a priori que le vitrage a une température uniforme de 0°C et on justifiera de cette hypothèse dans les questions ultérieures.

Eléments de réponse

- Convection naturelle entre l'air intérieur et le verre

Caractéristiques de l'air prises à 280 K (pour plus de précision prendre ces caractéristiques à la température moyenne du film 283 K par interpolation de la table, mais cette précision n'est pas nécessaire par rapport aux simplifications faites par ailleurs) :

$Pr=0.69$

$$Ra = \frac{\frac{1}{T_{moy}} \cdot |T_{paroi} - T_{\infty}| \cdot g \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} = \frac{\frac{1}{283} \cdot |20| \cdot 9.81 \cdot 1^3}{13.91 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0.0255}{1.265 \cdot 1008}} = 2.5 \cdot 10^9$$

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(0.492 / Pr \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 = 162.4$$

$$\rightarrow h_{c,int} = 4.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

- Convection forcée entre l'air extérieur et le verre

Caractéristiques de l'air prises à 270°C (pour plus de précision prendre ces caractéristiques à la température moyenne du film 268 K par interpolation de la table, mais cette précision n'est pas nécessaire par rapport aux simplifications faites par ailleurs)

$$Pr = 0.69$$

$$Re = \frac{\rho \cdot V_{\infty} \cdot L}{\mu} = \frac{1.311 \cdot 5 \cdot 1}{17.12 \cdot 10^{-6}} = 382\,885 \text{ (turbulent, } Re > 2100)$$

$$Nu = 0.036 \cdot (Re)^{0.8} (Pr)^{1/3} = 931.2$$

$$\rightarrow h_{c,ext} = 23.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

- 3- On donne ci-après des caractéristiques du verre considéré (données). En supposant que l'ensemble des murs de la pièce (en dehors du vitrage étudié) est à $T_{int} = 20^{\circ}\text{C}$ et se comporte comme un corps noir, et que l'environnement extérieur du bâtiment se comporte également comme à corps noir à $T_{ext} = -10^{\circ}\text{C}$, démontrer que le vitrage pourra, dans le reste du problème, être considéré également comme un corps noir.

Éléments de réponse

Rayonnement émis par les murs intérieurs : Loi de Wien $\lambda_{max,int} = 9.9 \mu\text{m} \rightarrow$ domaine utile : $4.9 \leq \lambda_u \leq 49 \mu\text{m}$

Rayonnement émis par l'environnement radiatif : $\lambda_{max,ext} = 11 \mu\text{m} \rightarrow$ domaine utile : $5.5 \leq \lambda_u \leq 55 \mu\text{m}$

Température du verre comprise entre celle intérieure et celle extérieure, donc domaine utile d'émission tel que $\lambda \geq 4.5 \mu\text{m}$

$\epsilon_{verre} = 1 = \alpha_{verre}$ pour $\lambda \geq 4.5 \mu\text{m}$, on peut donc le considérer comme un corps noir sur ses deux faces.

- 4- Donner l'expression du flux radiatif $\Phi_{r,int}$ échangé entre le vitrage et les murs de la pièce. Exprimer ce flux sous la forme

$$\Phi_{r,int} = L \cdot H \cdot h_{r,int} \cdot (T_{v,int} - T_{int})$$

et donner l'expression exacte de h_r .

Éléments de réponse

$$\Phi_{r,int} = L \cdot H \cdot \epsilon_{verre} \cdot \sigma_0 \cdot (T_{v,int}^4 - T_{int}^4) = L \cdot H \cdot \sigma_0 \cdot (T_{v,int}^4 - T_{int}^4)$$

$$\text{d'où } \Phi_{r,int} = L \cdot H \cdot \sigma_0 \cdot (T_{v,int}^2 + T_{int}^2) \cdot (T_{v,int} + T_{int}) \cdot (T_{v,int} - T_{int}) \text{ et } h_{r,int} = \sigma_0 \cdot (T_{v,int}^2 + T_{int}^2) \cdot (T_{v,int} + T_{int})$$

- 5- Compte tenu des écarts modérés de température mis en jeu dans ce problème, on peut poser

$T_{\text{moy,int}} = T_{\text{int}} - \delta = T_{\text{v,int}} + \delta$ avec $\delta = \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{v,int}}}{2}$ négligeable devant $T_{\text{moy,int}}$ au second ordre.

Exprimer alors $h_{\text{r,int}}$ en fonction de σ_0 et $T_{\text{moy,int}}$ et calculer sa valeur numérique. Calculer de même la valeur de $h_{\text{r,ext}}$ de l'autre côté du vitrage.

Eléments de réponse

$$T_{\text{moy,int}} = T_{\text{int}} - \delta = T_{\text{v,int}} + \delta$$

$$\text{d'où } h_{\text{r,int}} = \sigma_0 \cdot \left[(T_{\text{moy,int}} - \delta)^2 + (T_{\text{moy,int}} + \delta)^2 \right] \cdot \left[(T_{\text{moy,int}} - \delta) + (T_{\text{moy,int}} + \delta) \right]$$

$$h_{\text{r,int}} = \sigma_0 \cdot (T_{\text{moy,int}}^2 + \delta^2 - 2\delta T_{\text{moy,int}} + T_{\text{moy,int}}^2 + \delta^2 + 2\delta T_{\text{moy,int}}) \cdot 2T_{\text{moy,int}}$$

$$\text{en négligeant } \delta \text{ devant } T_{\text{moy,int}} \text{ au second ordre : } h_{\text{r,int}} = 4\sigma_0 \cdot T_{\text{moy,int}}^3$$

$$h_{\text{r,int}} = 4 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (283)^3 = 5.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \text{ et } h_{\text{r,ext}} = 4 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (268)^3 = 4.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

- 6- Exprimer le flux Φ_{int} , flux total sur la paroi intérieure du vitrage et Φ_{ext} , flux total sur la paroi extérieure du vitrage, en fonction de $h_{\text{r,int}}$, $h_{\text{r,ext}}$, $h_{\text{c,ext}}$, $h_{\text{c,int}}$ et des données géométriques et de températures.

Eléments de réponse

$$\Phi_{\text{int}} = (h_{\text{r,int}} + h_{\text{c,int}}) \text{HL}(T_{\text{int}} - T_{\text{v,int}})$$

$$\Phi_{\text{ext}} = (h_{\text{r,ext}} + h_{\text{c,ext}}) \text{HL}(T_{\text{v,ext}} - T_{\text{ext}})$$

- 7- Dans la suite, on supposera que $h_{\text{c,int}} = 3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ et $h_{\text{c,ext}} = 23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Montrer que la résistance thermique à l'intérieur du verre est négligeable devant les deux résistances thermiques de part et d'autre. Justifier alors l'hypothèse d'uniformité de température du vitrage.

Eléments de réponse

$$R_{\text{cond,verre}} = \frac{e}{k_{\text{verre}}} = 0.006 \text{ m}^2 \text{K}/\text{W}$$

$$R_{\text{int}} = \frac{1}{h_{\text{r,int}} + h_{\text{c,int}}} = 0.119 \text{ m}^2 \text{K}/\text{W}$$

$$R_{\text{ext}} = \frac{1}{h_{\text{r,ext}} + h_{\text{c,ext}}} = 0.036 \text{ m}^2 \text{K}/\text{W}$$

La résistance thermique à l'intérieur du verre est négligeable devant les deux résistances thermiques de part et d'autre, on peut donc considérer la température comme uniforme dans l'épaisseur du verre ($T_{\text{v,int}} \sim T_{\text{v,ext}}$).

- 8- En déduire l'expression littérale et la valeur numérique du flux Φ_1 traversant le vitrage. Calculer la valeur de la température de la vitre et justifier de l'hypothèse faite en 2-.

Éléments de réponse

$$\Phi_1 = LH \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{R_{\text{int}} + R_{\text{ext}}} = 186 \text{ W}$$

on a aussi : $\Phi_1 = \frac{T_{\text{int}} - T_{v,\text{int}}}{R_{\text{int}}}$ d'où $T_{v,\text{int}} = -2.2^\circ\text{C}$ ou $\Phi_1 = \frac{T_{v,\text{ext}} - T_{\text{ext}}}{R_{\text{ext}}}$ d'où $T_{v,\text{ext}} = -3.3^\circ\text{C}$. La

température du verre est bien proche de 0°C . La précision de l'hypothèse prise en 2- est suffisante pour obtenir des valeurs réalistes des coefficients de transferts convectifs. On peut trouver une variation de température de l'ordre de 1°C dans le verre, qui est faible par rapport aux variations dans les couches d'air.

On peut par ailleurs souligner la sensation importante de paroi froide possible avec cette température de vitrage, et les problèmes corrélés (condensation, etc !).

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

- 9- En utilisant les résultats obtenus précédemment, exprimer le nouveau flux Φ_2 traversant le double vitrage, en expliquant les hypothèses que vous poserez.

Éléments de réponse

Mêmes hypothèses que précédemment concernant les effets de bord et pour les températures radiatives et comportements radiatifs des corps environnants.

Dans un premier temps, on peut considérer que les coefficients convectifs et radiatifs sont identiques à ceux calculés précédemment. Vu la précision de cette hypothèse, il convient également de négliger la résistance thermique du verre. Il reste à évaluer la résistance thermique due à la couche d'air immobile.

2 phénomènes : conduction et rayonnement

$$\text{d'où } \Phi_2 = LH \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{R_{\text{int}} + R_{\text{ext}} + \frac{1}{\frac{\lambda_{\text{air}}}{d} + h_{r,\text{entrevitre}}}}$$

- 10- Calculer la valeur numérique de ce flux et commenter.

Éléments de réponse

$$\Phi_2 = LH \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{R_{\text{int}} + R_{\text{ext}} + \frac{1}{\frac{\lambda_{\text{air}}}{d} + h_{r,\text{entrevitre}}}} = 1 \cdot \frac{30}{0.119 + 0.036 + \frac{1}{\frac{0.0249}{0.012} + 4.6}} = 98 \text{ W}$$

On peut alors recalculer les températures $T_{v1,\text{ext}}$ et $T_{v2,\text{int}}$, puis redérouler la démarche de l'exercice pour calculer plus précisément les coefficients convectifs et radiatifs, ainsi que les températures, puis les flux...

Par itération (rapide, on peut même s'arrêter à la 1^{ère} itération!) on montre que le flux est de l'ordre de 100 W.

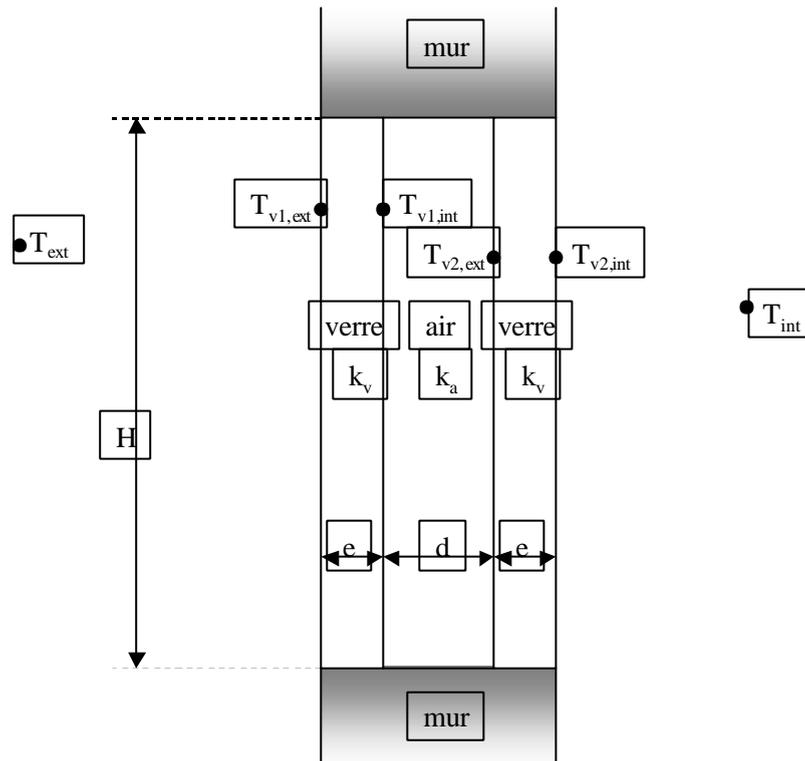


Figure 3 : installation double vitrage

Données

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

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

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

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

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

- Propriétés thermophysiques de l'air à 1 atm :

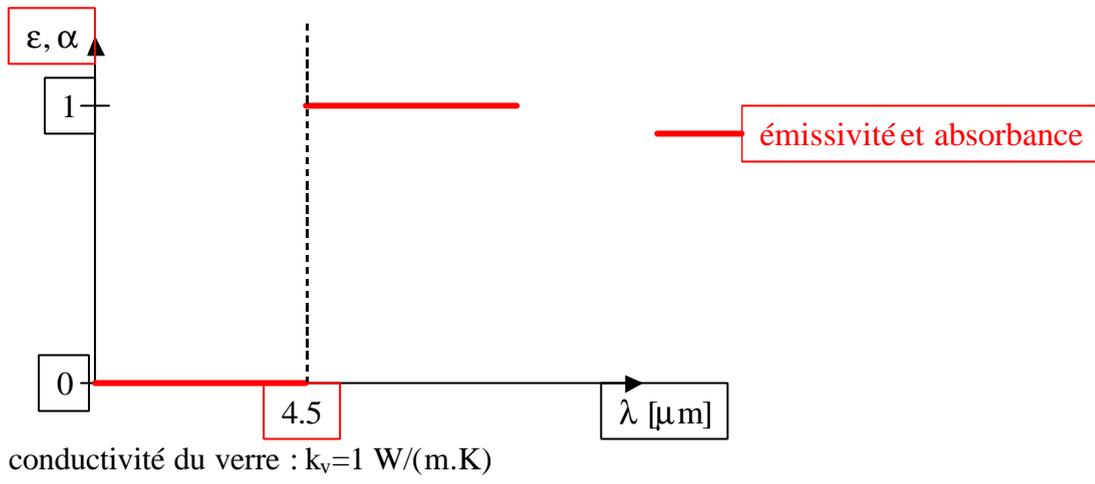
T K	k W/m K	ρ kg/m ³	c_p J/kg K	$\mu \times 10^6$ kg/m s	$\nu \times 10^6$ m ² /s	Pr
150	0.0158	2.355	1017	10.64	4.52	0.69
200	0.0197	1.767	1009	13.59	7.69	0.69
250	0.0235	1.413	1009	16.14	11.42	0.69
260	0.0242	1.360	1009	16.63	12.23	0.69
270	0.0249	1.311	1009	17.12	13.06	0.69
280	0.0255	1.265	1008	17.60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

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

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

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

- Caractéristiques du verre :



Rapport sur l'épreuve de qualité des ambiances

Partie « Thermique »

Environ 75% des candidats ont abordé la partie 'thermique' du sujet, avec plus ou moins de réussite, beaucoup de candidats n'ayant pas dépassé la première question. Ce sujet se voulait très classique, et très basique ; les réponses n'ont souvent pas été à la hauteur des attentes des correcteurs. Il est notamment dramatique que tous les candidats à l'agrégation ne sachent pas identifier les phénomènes physiques de base dans la 1^{ère} question.

Dans la 2^{ème} question, les calculs ont pu être sources d'erreur, mais les valeurs numériques n'étaient pas indispensables pour la suite du problème. Les correcteurs encouragent les candidats à lire l'ensemble du sujet avant de commencer à composer, ils pourraient ainsi se rendre compte que même s'ils restent bloqués sur une question, la suite du sujet ne leur est pas forcément interdite...

Les correcteurs ont apprécié les candidats qui étaient capables de mettre en évidence une erreur manifeste d'ordre de grandeur, plutôt que de laisser une aberration non commentée. Ainsi, certains candidats n'ont pas su lire correctement le tableau de valeurs : si on indique $\mu \cdot 10^6 = 17.12 \text{ kg/(m.s)}$, cela signifie aussi que $\mu = 17.12 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(m.s)}$...

Des erreurs fréquentes ont été de confondre les associations des phénomènes en série ou en parallèle. En cas de doute, il n'est pas interdit aux candidats de faire un schéma, plutôt que de se précipiter dans les équations et de mal les écrire...

Partie « Acoustique »

Le sujet d'acoustique a été abordé par 80% des candidats. Dans le détail,

- le problème 1, « très trivial » a été abordé par la quasi-totalité des candidats avec plus ou moins de réussite, alors que le sujet était extrêmement simple : la seule difficulté était de connaître la relation de Sabine pour les champs réverbérés. On notera que peu de candidats ont été tentés par la dernière question (1f) qui demandait un minimum de connaissance pratique et de discussion.
- le problème 2, plus « théorique » a été écarté par 50% des candidats, bien que la difficulté soit très minime et que l'essentiel des réponses était aiguillé dans l'énoncé. Là encore, à la question qui demandait de présenter « l'intérêt pratique » d'un résonateur de Helmholtz, peu de candidats ont répondu.

Epreuve portant sur l'ingénierie de projet
Option A : Matériaux, Ouvrages et Aménagements

B1- Etude technique du voile périphérique et de ses fondations

1. Sollicitations en pied de voile

? *calcul comme bassin?*

Le charbon n'est pas forcément stocké de façon uniforme et donc le mur n'est pas sollicité sur toute sa périphérie de façon identique.

Commentaires du jury

tous les candidats ont répondu à cette question, avec souvent des réponses extrêmement compliquées et fausses. Très peu ont finalement donné l'explication simple attendue

? *Sollicitations élémentaires*

PP béton : G1

à partir du plan P4, coupe CC sur voile :

$$N = (15 \times 0,5 + \frac{1}{2} \times 15 \times 1) \times 25 = 375 \text{ kN/m}$$

pour le moment, calcul en pied de voile, à 25 cm du nu extérieur :

$$M = (15 \times 0,5 \times 25) \times -1 + (\frac{1}{2} \times 15 \times 1 \times 25) \times (-0,667 + 0,25) = -266 \text{ kN.m/m}$$

l'effort tranchant est égal à zéro.

Charbon, poussée statique : G3

l'angle de frottement retenu est ici $f = 35^\circ$; le talutage ne peut être supérieur donc $\beta = 35^\circ$.

Avec Rankine, $K_a = 0,819$

Avec Coulomb, $K_a = 0,671$ avec $d = 0$ et $K_a = 0,731$ avec $d = 2/3.f$

On fera donc simplement un calcul de poussée de Rankine avec action de poussée horizontale sur le voile, c'est à dire :

$$N = 0$$

$$T = \frac{1}{2} \cdot k_a \cdot h^2 = 921 \text{ kN/m} \text{ avec } h = 15 \text{ m, la hauteur du mur}$$

$$M = T \times 5 \text{ m} = 4667 \text{ kN.m/m} \text{ la répartition étant triangulaire donc résultante au tiers de la hauteur.}$$

Combinaisons d'action :

A partir des données et hypothèses de la partie A,
pour l'ELS quasi permanent, on retient $G1 + G2 + G3$
pour la combinaison rare, $G_i + W + 0,6.T$

pour l'ELU fondamental, $G1+G2+1,35.G3 + 1,5 W$

Ce qui donne pour la première partie du doc réponse R1 :

	N (kN)	M(kN.m)	T (kN)
PP béton : G1	375	-266	
PP dôme : G2	25	120	8
Charbon : poussée	0	4667	921
ELS QP	400	4521	929
Vent : W	23	113	8
Thermique : T	0	75	5
ELS Rare	423	4679	940
ELU fondamental	435	6324	1263

Commentaires du jury

La plupart des candidats ont traité cette question. Beaucoup de candidats ont du mal à exposer clairement le principe de leur descente de charge, souvent par manque de croquis de principe. La poussée du charbon a été correctement traitée dans un peu moins de la moitié des copies seulement. Il faut absolument préciser les hypothèses effectuées, et mettre en valeur les résultats intermédiaires.

Etude au séisme :

- Poussée dynamique du charbon*
en utilisant l'annexe D2, méthode de Monobé Okabé
la force de poussée la plus grande est obtenue en majorant le poids vertical par $K_v.W$.
Dans ce cas, on obtient :
 $K_v = 0,075$
 $K_h = 0,03$
rotation pour poids apparent vertical, $\alpha = 4,16^\circ$
poids apparent $\gamma_{app} = 10,33 \text{ kN/m}^3$
 $K_{a,d} = 0,612$ avec $\alpha = 4,16^\circ$, $\beta = 30 + \alpha = 34,16^\circ$, $\delta = 35^\circ$, $\epsilon = 0$
la force totale de poussée est donc $E_d = 732 \text{ kN}$ pour un mur de 15 m, et le moment à l'encastrement est alors de $E_d * 7,5\text{m}$, le diagramme de poussée dynamique étant considéré rectangle, soit $M = 5490 \text{ kN.m}$
- pp structure * a_N*
On prend de façon simple un effort horizontal statique égal au poids propre de la structure pondéré par l'accélération de 0,15 g correspondant au séisme.
Cela conduit à un effort horizontal de 60 kN et un moment de 408 kN.m

Au bilan, on complète le doc R1 :

	N (kN)	M(kN.m)	T (kN)
PP béton : G1	375	-266	
PP dôme : G2	25	120	8
Séisme : poussée dynamique charbon	0	5490	732
Séisme : pp*a _N	0	408	60
ELU accidentel	423	5752	800

Commentaires du jury

Cette partie a été assez bien réussie par les quelques candidats, un sur cinq environ, qui l'ont traité. Le sujet guidait largement les calculs à effectuer.

1. Dimensionnement du ferrailage longitudinal en pied de voile

Commentaires du jury

Cette question a été très peu traitée. Le calcul pouvait se faire en flexion simple, l'effort normal ayant peu d'incidence. Par contre, beaucoup de candidats aboutissent à des résultats

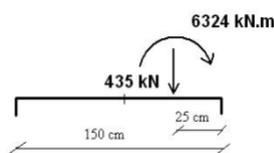
absurdes, suite à des erreurs sur les sollicitations, et ne font pas de commentaire sur la « validité » de leur solution. Il n'est pas normal de proposer un ferrailage en HA10 au vu des dimensions du voile! Les qqes dessins de ferrillages sont très defaillants, avec des pbs de conception (continuité, ancrage des barres). A défaut de calcul, le jury a beaucoup apprécié les rares copies comportant un croquis de principe de ferrailage correct.
Le calcul à l'ELS n'a pas été abordé par les candidats.

? Pourquoi l'ELU accidentel n'est pas dimensionnant.

Les sollicitations obtenues sont d'une part plus faibles qu'en fondamental, et d'autre part le calcul en situation accidentelle permet une réduction des coefficients partiels sur les matériaux, donc des résistances de calcul plus élevées.

? Calcul à l'ELU.

La sollicitation a été évaluée en pied de voile, à 25 cm du nu extérieur :



Ramenée au barycentre de la section droite : $N = 435 \text{ kN}$, $MG = 6542 \text{ kN.m}$

soit une excentricité initiale $e_0 = 15,04 \text{ m}$

On prendra, à défaut de précisions dans le texte du sujet :

un défaut d'inclinaison standard de $1/400$ soit $e_i = 3,75 \text{ cm}$ arrondi à 4.

une imperfection de $1/30$ de la hauteur utile soit 5 cm

donc une excentricité de calcul $e_t = 15,13 \text{ m}$, et finalement la sollicitation de calcul suivante :

$N_{sd} = 435 \text{ kN}$ $M_{sd} = 6582 \text{ kN.m}$

en prenant une hauteur utile sécuritaire $d = 1,40 \text{ m}$ (5 cm d'enrobage), le moment ramené au niveau des aciers tendus vaut 6864 kN.m .

Béton C30/40, $f_{cd} = 20 \text{ MPa}$

aciers HA 500, $f_{yd} = 435 \text{ MPa}$

section rectangulaire : $b = 1 \text{ m}$ $h = 1,5 \text{ m}$ $d = 1,4 \text{ m}$

moment réduit $\mu = 0,175$ $a = 0,242$ A sans prise en compte $N = 124,8 \text{ cm}^2$

correction apportée par compression de 10 cm^2 soit une section nécessaire de $114,8 \text{ cm}^2$

choix possible : 1 HA32 + 1 HA25 tous les 10 cm pour une section réelle de $129,5 \text{ cm}^2$.

Sur la face extérieure, 1 HA 14 tous les 10 cm en correspondance.

? Vérification à l'ELS

on conduit un premier calcul en élasticité pour la combinaison caractéristique (avec un coefficient d'équivalence acier béton $n = 15$), pour obtenir les sollicitations en contrainte dans les matériaux.

La sollicitation au barycentre du coffrage est : $N_{ser} = 423 \text{ kN}$ et $M_{ser} = 4897 \text{ kN.m}$

l'équilibre de la section droite conduit à : $y_1 = 591 \text{ mm}$ et $k = 24,2 \text{ MN.m}^{-3}$

ce qui donne des contraintes :

dans le béton comprimé : $\sigma_c = 14,3 \text{ MPa}$

dans les aciers tendus : $\sigma_s = 294 \text{ MPa}$

ces valeurs sont conformes aux valeurs limites de $0,6 f_{ck} = 15 \text{ MPa}$ pour le béton est $0,8$

$f_{yk} = 400 \text{ MPa}$ pour l'acier.

Pour ce qui est de la fissuration du béton, l'extrait de CCTP du sujet nous indique que le béton en élévation de voile est en classe d'exposition XS1, donc la valeur recommandée de w_{max} est de 0,2 mm selon le DAN de l'EC2 (0,3 mm pour le texte européen), pour la **combinaison quasi permanente**.

La sollicitation au barycentre du coffrage est : $N_{ser} = 400 \text{ kN}$ et $M_{ser} = 4721 \text{ kN.m}$

l'équilibre de la section droite conduit à : $y_1 = 590 \text{ mm}$ et $k = 23,0 \text{ MN.m}^{-3}$

ce qui donne des contraintes :

dans le béton comprimé : $\sigma_c = 13,6 \text{ MPa}$

dans les aciers tendus : $\sigma_s = 280 \text{ MPa}$

la valeur de la contrainte de l'acier est trop forte si on se fie au tableau 7,2N de l'EC2 pour la maîtrise de la fissuration sans calcul direct.

Un calcul de l'ouverture de fissure détaillé conduit d'ailleurs à :

$s_{r,max} = 1,18 \text{ mm}$; $(\sigma_{sm} - \sigma_{cm}) = 1,2210^{-3}$; $w_k = 1,44 \text{ mm}$ ce qui est beaucoup trop important !

Il convient donc d'augmenter significativement la quantité d'aciers à mettre en place.

En limitant la contrainte dans l'acier à 200 MPa avec des barres de diamètre maxi 25,

un dimensionnement ELS conduit à 192 cm^2 , soit 39 HA 25 à répartir sur un mètre, soit 3 lits de 13 barres HA 25 par mètre. C'est un ferrailage très important, mais à mettre en rapport avec la taille du voile !!

3. Implantation des pieux

Commentaire du jury :

Pour information, le passage du torseur des efforts sous ELS QP calculé en R1 de : $N = 0,40 \text{ MN/ml}$; $M = 4,52 \text{ MN.m/ml}$ et $T = 0,93 \text{ MN/ml}$ au torseur $N = 1,39 \text{ MN/ml}$; $M = 2,23 \text{ MN.m/ml}$ et $T = 0,93 \text{ MN/ml}$ donné dans l'énoncé s'effectue ainsi :

Effort normal N :

Charbon sur semelle, $4,05 \times 15 \times 10 = 0,607 \text{ kN}$

Poids propre semelle $10,80 \times 1,20 \times 25 = 0,324 \text{ MN}$

soit $0,4 + 0,607 + 0,324 = 1,331 \text{ MN}$, sensiblement $1,39 \text{ MN}$ énoncé.

Moment M :

Charbon $-0,607 \times (4,05/2 + 1,25) = -1,988$

Semelle $+0,324 (5,40 - 5,30) = 0,03$

soit $4,52 - 1,988 + 0,03 = 2,56 \text{ MN.m}$, sensiblement $2,23 \text{ MN.m}$ énoncé.

L'énoncé est indépendant des 2 parties précédentes. Le problème peut être traité séparément.

Commentaire du jury :

Seulement 10 candidats ont abordé cette partie du sujet alors que la réponse à la question 2, d2 pouvait être abordée fort simplement, sans traiter la 1ère plus théorique (2 candidats l'ont bien vu puisqu'ils n'ont pas traité la 1). Il s'agit d'un sujet de RdM classique.

o Donner en fonction du paramètre d2, la valeur des efforts s'appliquant en tête de chaque pieu.

La planche P4 montre que la distance transversale entre 2 pieux est de 6m. Ces paires de pieux sont espacées de 5m.

$d_1 + d_2 = 6\text{ m}$; on note N_2 la charge du pieu 2 côté d_2 et N_1 celle du pieu 1, côté d_1 .

Calcul de l'effort normal N par pieu sous le moment de flexion du torseur :

On ramène le torseur à l'axe des deux pieux :

$$M = 2,23 - (3,00 - d_2) \times 1,39 = 6N \text{ avec } N \text{ effort du au moment dans chaque pieu}$$
$$- 1,94 + 1,39 d_2 = 6N$$

$$N_m = + (0,232 \times d_2 - 0,323) \text{ sur pieu 1}$$

$$N_m = - (0,232 \times d_2 - 0,323) \text{ sur pieu 2}$$

Calcul de l'effort normal N par pieu sous le normal du torseur

$$N_n = 1,39/2 \text{ par pieu}$$

Effort appliqué sur pieux : $N_n + N_m$

Effort appliqué sur pieu 1 :

$$[1,39/2 + (0,232 \times d_2 - 0,323)] \times 5 \text{ (5m entre paire)}$$
$$[0,372 + 0,232 \times d_2] \times 5$$

$$N_1 = 1,86 + 1,16 \times d_2 \text{ MN}$$

$$T_1 = 0,93/2 \times 5 = 2,325 \text{ MN}$$

Effort appliqué sur pieu 2

$$[1,39/2 - (0,232 \times d_2 - 0,323)] \times 5$$

$$N_2 = 5,09 - 1,16 \times d_2 \text{ MN}$$

$$T_1 = 2,325 \text{ MN}$$

o Calculer la valeur de d_2 optimale pour les charges de pieux

d_2 optimale si $N_1 = N_2$

$$1,86 + 1,16 \times d_2 = 5,09 - 1,16 d_2$$

$$3,23 = 2,32 d_2$$

$$d_2 = 1,39\text{m} \text{ et } N = 3,47\text{MN}$$

Autre façon de trouver sans avoir répondu à la question précédente :

Optimal si $N_1 = N_2 = 1,39/2 = 0,695 \text{ MN/ml}$

En écrivant l'équilibre du moment $d_1 \times N_1 - d_2 \times N_2 = M = 2,23 \text{ MN.m /ml}$

Et avec $d_1 = 6 - d_2$

$$(6 - d_2) \times 0,695 - d_2 \times 0,695 = 2,23$$

$$1,94 = 1,39d_2$$

$$d_2 = 1,39\text{m}$$

o On constate que la valeur de d_2 trouvée n'est pas celle qui a été retenue d'après les concepteurs du projet. Veuillez expliquer pourquoi.

On peut retrouver à partir des cotes sur le plan P4 que $d_2 = 1,25\text{m}$

R1 : La valeur annoncée de l'effort tranchant en pied de voile est de $0,93\text{MN}$. On a négligé le moment supplémentaire dû à la descente de cette charge horizontale en tête de pieu.

Cela apporte un moment $0,93 \times 1,2$ ($1,20\text{m}$ hauteur de semelle) = $+ 1,16 \text{ MN.m}$

B2- Etude de la réalisation

B2.1- Réalisation de la paroi périphérique

Avantages et inconvénients de la réalisation en facettes primaires et secondaires

Commentaires du jury

La plupart des candidats a abordé cette question, la contrainte de la courbure a bien été prise en compte, mais trop peu ont vu le problème lié à la forme tronconique du parement extérieur qui poserait un problème d'étanchéité en pied de coffrage si l'on inclinait des banches cintrables ; ce problème disparaissant avec les facettes.

La plupart des candidats a compris que le parement extérieur était plus long que le parement intérieur, mais ils n'en ont pas tirés de conséquences simples sur la réalisation de la paroi.

Le phénomène de retrait n'a que très rarement été abordé parmi les avantages de la solution de réalisation en facettes primaires et secondaires

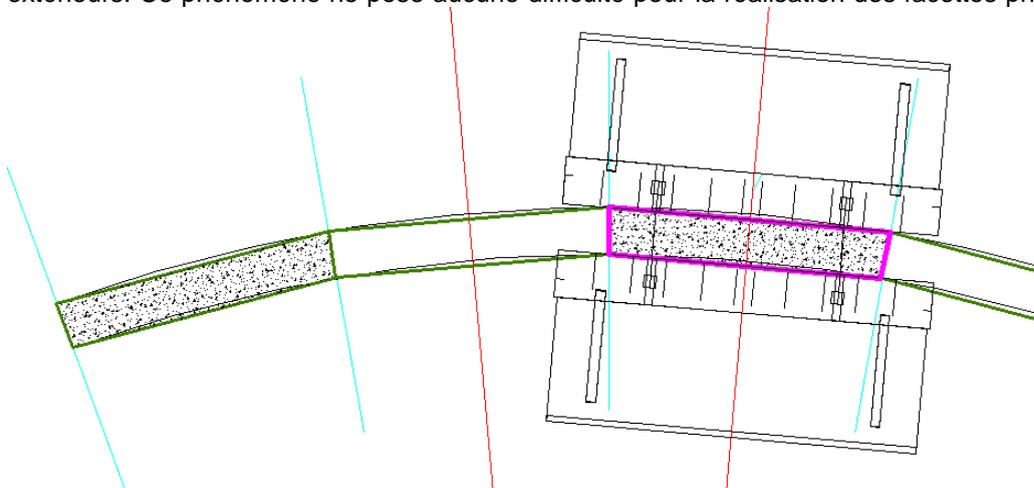
a) Avantages :

- Utilisation de matériel de coffrage plan standard donc moins cher
- Les armatures de répartition seront façonnées à partir d'éléments droits et non de cerces.
- La face inclinée devient plane et non plus un tronc de cône lequel entraînait un problème d'étanchéité de coffrage en pied si il était coffré à l'aide de banches cintrables.
- Le retrait thermique et hydraulique du béton des facettes primaires se produit avant le coulage des facettes secondaires ; la fissuration des joints de reprise de bétonnage sera moins importante.

b) Inconvénients :

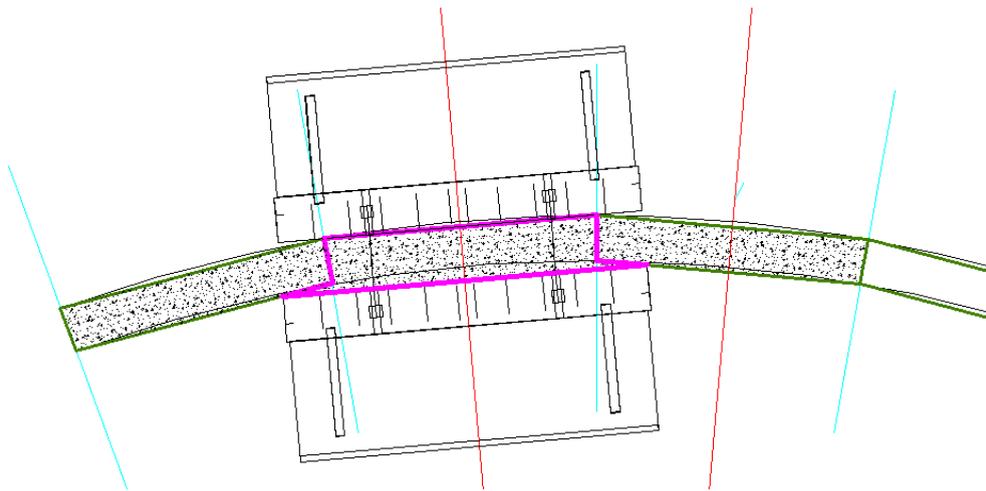
Dans le cas de la réalisation d'un réservoir, les facettes planes ne permettent pas d'utiliser au mieux l'effet de tonneau, une flexion localisée s'ajoute aux tractions qui résultent des pressions contre la paroi

Si en première approche, on réalise les joints entre facettes selon des rayons de la paroi circulaire, alors la longueur des parements intérieurs est inférieure à la longueur des parements extérieurs. Ce phénomène ne pose aucune difficulté pour la réalisation des facettes primaires.



Mais, lors de réalisation des facettes secondaires, l'extrémité du coffrage intérieur va s'appuyer contre le parement de la facette primaire avec deux conséquences :

- Une sur-épaisseur du voile de la facette secondaire
- Un décalage des parements au niveau du joint avec un effet de paroi augmenté par l'angle très faible entraînant un mauvais remplissage par le béton, donc des défauts d'aspects nécessitant un ragréage plus important



Pour réduire ces inconvénients, on pourrait faire fabriquer des banches de raccordement, mais on perd alors le premier avantage.

Définir la position de l'about et justifier votre choix

Commentaires du jury

Comme les conséquences de l'inégalité de longueur des parements n'ont pas bien été exploitées, la plupart des candidats a placé l'about sur un rayon, laissant subsister l'inégalité de longueur de parement sur les panneaux secondaires.

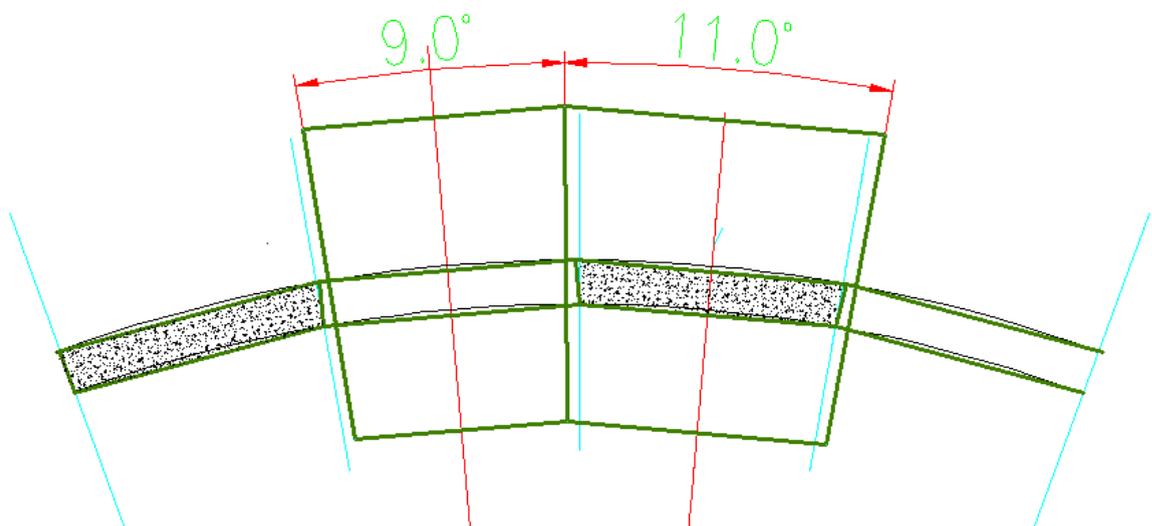
La conception et le maintien de l'about est trop souvent irréaliste.

Pour réduire les inconvénients, il faut donc que le recouvrement des banches intérieures sur le parement de la facette primaire soit limité (quelques centimètres), il faut donc adapter le train de banches ou la longueur de la facette secondaire à cette problématique.

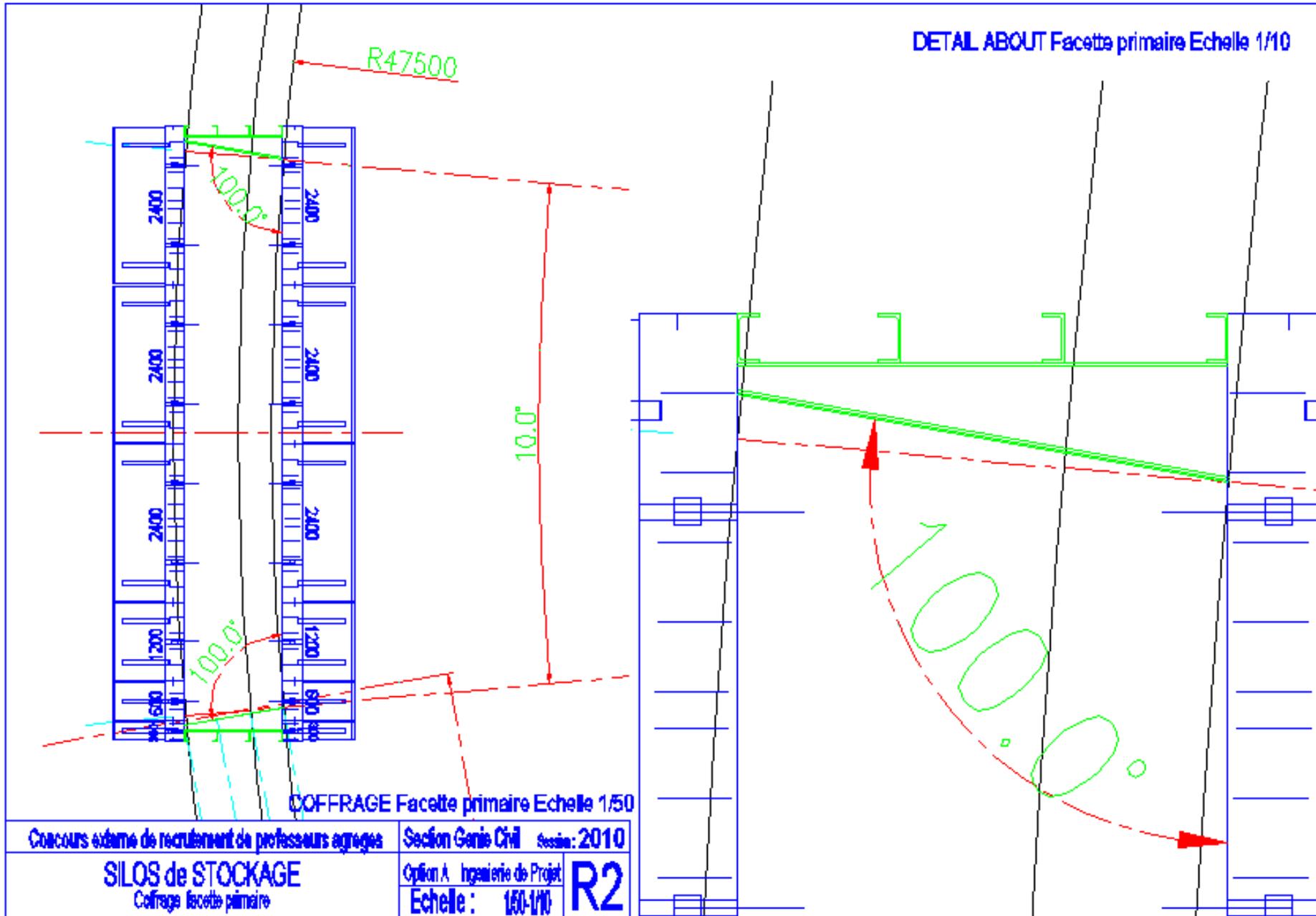
Mais il faut aussi que le train de banches extérieur corresponde au train de banches intérieur pour permettre la mise en place des tiges entretoises. Pour cela la longueur du parement extérieur des facettes secondaires doit être sensiblement égale à la longueur du parement intérieur de ces mêmes facettes ; il est donc nécessaire d'allonger la longueur du parement extérieur des facettes primaires en inclinant l'about pour qu'il soit sensiblement perpendiculaire aux parements de la facette secondaire.

Ceci revient dans notre problème à incliner l'about de 100° par rapport au parement intérieur de la facette secondaire.

L'allongement du parement extérieur de la facette primaire a une conséquence sur la réalisation de sa semelle. On choisira donc de réaliser la semelle des facettes primaires dans un secteur de 11° ; il en résulte que les semelles des facettes secondaires seront inscrites dans un secteur de 9° .



DETAIL ABOUT Facette primaire Echelle 1/10



Concours examen de recrutement de professeurs agrégés

Section Génie Civil session: 2010

SILOS de STOCKAGE
Coffrage facette primaire

Option A Ingénierie de Projet
Echelle : 1/50-1/10

R2

Déterminer les éléments de coffrage nécessaires pour la réalisation du voile des facettes primaires, puis des facettes secondaires.

Commentaires du jury

Beaucoup de candidats ont proposé une solution admissible pour les facettes primaires, mais qui s'adaptait mal aux facettes secondaires du fait de l'about retenu

Facette primaire

Longueur du parement intérieur

Rayon intérieur : 47.500 => longueur facette de 10° : $47.500 \times \sin 5 \times 2 = 8.280$ m

Longueur du parement extérieur en pied de voile

Épaisseur du voile à facette : $1.500 \cos 5^\circ = 1.494$ m

Sur-longueur due à l'inclinaison des abouts à 100° : $1.494 \times \tan 10 = 0.263$ m

Longueur du parement extérieur : $8.280 + 2 \times 0.263 = 8.806$ m

En montant vers le haut du voile, la longueur du parement extérieur.

On choisira donc un train de banche de 9.300 m qui permet de placer un about dont la structure aura une épaisseur de : $(9.300 - 8.806) / 2 = 0.247$ m

Le train peut être composé de la manière suivante : $3 \times 2.400 + 1.200 + 0.600 + 0.300$, et en hauteur 5 banches de 2.800 et une sous-hausse de 1.000 m soit 15.000 m. Soit :

- 15 banches de 2.400 m
- 5 banches de 1.200 m
- 5 banches de 0.600 m
- 5 banches de 0.300 m
- 3 sous-hausses de 1.000 m x 2.400 m
- 1 sous-hausse de 1.000 m x 1.200 m
- 1 sous-hausse de 1.000 m x 0.600 m
- 1 sous-hausse de 1.000 m x 0.300 m

Facette secondaire

Longueur des parements intérieur et extérieur : 8.280 m

On choisira donc un train de banche de 8.400 m qui permet un recouvrement sur le panneau primaire de : $(8.400 - 8.280) / 2 = 0.060$ m

Le train peut être composé de la manière suivante : $3 \times 2.400 + 1.200$, la composition en hauteur sera la même.

Déterminer le temps de bétonnage du voile d'une facette, définir la procédure de coulage et choisir la pompe à béton correspondante.

Commentaires du jury

Environ 50% des candidats ont déterminé la vitesse de bétonnage correctement à partir des documents ressource, mais aucun n'en a tiré de conclusion sur le débit de bétonnage qui diminue en fonction de la hauteur.

Le choix de la pompe à béton quand il a été correct au niveau du débit, ne l'a pas été au niveau de la flèche qui doit s'élever à 30 mètres pour permettre de descendre le tube plongeur au fond des banches.

Volume facette primaire

Longueur du parement intérieur : 8.280 m

Longueur du parement extérieur à mi-hauteur du voile

Épaisseur du voile à facette : $1.000 \cos 5^\circ = 0.996$ m

Sur-longueur due à l'inclinaison des abouts à 100° : $0.996 \times \tan 10 = 0.176$ m

Longueur du parement extérieur : $8.280 + 2 \times 0.176 = 8.632$ m

Section à mi-hauteur : $(8.280 + 8.632) / 2 \times 0.996 = 126.840$ m²

Volume : $126.840 \times 15.000 = 126.357 \text{ m}^3$

D'après les informations du constructeur de banches, on peut déterminer la vitesse de bétonnage

- Pression béton admissible : 12 t/m^2 avec tige entretoise $\varnothing 23$, 15 t/m^2 ; avec tige de $\varnothing 27$, on choisira 15 t/m^2 ; avec des tiges de $\varnothing 27$
 - Le béton étant auto-plaçant, on prendra un affaissement de 200 à 300 mm.
 - Comme on ne maîtrise pas la température de bétonnage, on prendra 5°
- La vitesse de bétonnage sera limitée à 2.5 m/h , le bétonnage durera donc $15.000 / 2.500 = 6 \text{ h}$

On calculera donc le volume correspondant à chacune des tranches de 2.500 m qui diminue au fur et à mesure que l'on monte.

Cote	Lint	Lext	Epaisseur	Section	Volume	
0,000	8,280	8,806	1,494	12,77		
2,500	8,280	8,750	1,328	11,31	30,1	1ere heure
5,000	8,280	8,692	1,162	9,86	26,5	2ème heure
7,500	8,280	8,632	0,996	8,42	22,9	3ème heure
10,000	8,280	8,574	0,830	6,99	19,3	4ème heure
12,500	8,280	8,516	0,664	5,58	15,7	5ème heure
15,000	8,280	8,456	0,498	4,17	12,2	6ème heure

Il sera souhaitable de placer des cellules de mesure de pression sur les tiges en partie basse sur les 7.500 premiers mètres

La pompe à béton doit assurer un débit minimum de $30 \text{ m}^3/\text{h}$.

Si l'on veut simplifier les opérations de mise en place des tuyaux souples qui descendront dans les banches, sa flèche doit monter à au moins 32.000 m (15.000 m de banches + 15.000m de tuyau souple + 2.000 m de sécurité)

Toutes les pompes proposées conviennent au niveau du débit

Seule la dernière permet d'atteindre la hauteur voulue.

On choisira donc la pompe M36-4 qui permet d'atteindre 32.000 m avec un déport de 15.000 m et un débit minimum de $88 \text{ m}^3/\text{h}$.

Établir le déboursé sec de la réalisation de l'ensemble d'une facette primaire et le PVHT.

Commentaires du jury

Les candidats qui ont abordés cette question ont calculés le déboursé sec quand ils n'ont pas fait d'erreurs de calcul. Par contre beaucoup de candidats confondent la notion de coût de réalisation et coût de revient.

R5- Quantitatif des travaux de réalisation d'une facette de la paroi périphérique

Croquis cotés et calculs

Semelle

Béton de propreté

Longueur intérieure

Rayon : $47.500 - 4.050 = 43.450 \Rightarrow$ longueur facette de 11° : $43.450 \times \sin 5.5 \times 2 = 8.325 \text{ m}$

Longueur extérieure

Rayon : $43.450 + 10.800 = 54.250 \Rightarrow$ longueur facette de 11° : $54.250 \times \sin 5.5 \times 2 = 12.527$ m
Largeur : 10.800 m
Surface : $(8.325 + 12.527)/2 \times 10.800 = 112.62 \text{ m}^2$

Coffrage

Périmètre : $8.325 + 12.527 + 2 \times 10.800 = 42.456$ m
Hauteur : 1.200 m
Surface de coffrage : $42.456 \times 1.200 = 50.95 \text{ m}^2$

Béton

Hauteur : 1.200 m
Volume : $112.62 \times 1.200 = 135.147 \text{ m}^3$

Armatures

Ratio : 80 kg/m^3
Masse : $80 \times 135.147 = 10812 \text{ kg}$

Remblaiement

Section : $(1,200 + 1.200 / 2) \times 1.200 = 2.16 \text{ m}^2$
Longueur de remblai : $8.325 + 12.527 = 20.852$ m
Volume de remblai : $2.06 \times 20.852 = 45.049 \text{ m}^3$

Mise en place de passerelle

Longueur : $2 \times 10.800 = 21.600$ m
Surface : $21.600 \times 1.200 = 25.92 \text{ m}^2$

Voile

Coffrage face intérieure et abouts

Longueur intérieure
Rayon intérieur : $47.500 \Rightarrow$ longueur facette de 10° : $47.500 \times \sin 5 \times 2 = 8.280$ m
Épaisseur voile à facette à mi-hauteur : $1.000 \cos 5^\circ = 0.996$ m
Longueur de l'about : $0.996 / \cos 10 = 1.012$ m
Longueur de coffrage : $8.280 + 2 \times 1.012 = 10.304$
Hauteur du voile : 15.000 m
Surface de coffrage : $15.000 \times 10.304 = 154.55 \text{ m}^2$

Echafaudage :

Longueur : 8.280 m
Hauteur du voile : 15.000 m
Surface : $15.000 \times 8.280 = 124.20 \text{ m}^2$

Coffrage face extérieure

Longueur de coffrage : $8.280 + 2 \times 1.012 \times \sin 10 = 8.632$ m
Hauteur du voile : 15.000 m
Surface : $15.000 \times 8.632 = 129.47 \text{ m}^2$

Béton du voile

Surface : $0.996 \times (8.280 + 8.632) = 8.42 \text{ m}^2$
Hauteur du voile : 15.000 m
Volume : $15.000 \times 8.42 = 126.357 \text{ m}^3$

Armatures du voile

Ratio : 80 kg/m³
Masse : 80 x 126.357 = 10109 kg

Ragréage

Longueur : 8.280 + 8.632 = 16.912 m
Hauteur du voile : 15.000 m
Surface : 15.000 x 16.912 = 253.68 m²

Locations

Compacteur 1jour
Pompe à béton : 2 jours
Grue mobile : 5 jours

R5- DS des travaux de réalisation d'une facette de la paroi périphérique

N°	Désignation	U	Quantité	Déboursés unitaires	Déboursés secs Matériaux
	Béton propreté	m2	112,62	8,35 €	940,40 €
	Armatures semelle	kg	10812	1,15 €	12 433,51 €
	Bétonnage semelle	m3	135,15	106,74 €	14 425,98 €
	Armatures voile	kg	10109	1,15 €	11 624,87 €
	Bétonnage voile	m3	126,36	106,74 €	13 487,76 €
	Ragréage	m2	283,68	0,15 €	38,05 €
					52 950,58 €

N°	Désignation	Quantité	TU	Crédit Horaire	Déboursés secs Main d'Œuvre
	Béton propreté	112,62	0,20	22,52	529,33 €
	Armatures semelle	10812	0,01	108,12	2 540,76 €
	Coffrage semelle	50,95	0,50	25,47	598,63 €
	Bétonnage semelle	135,15	0,20	27,03	635,19 €
	Remblaiement	45,050	0,25	11,26	264,66 €
	Echafaudage et passerelle	150,12	0,10	15,01	352,78 €
	Coffrage voile face1 + abouts	154,55	0,75	115,91	2 723,89 €
	Armatures voile	10109	0,01	101,09	2 375,52 €
	Coffrage voile face 2	129,47	0,75	97,10	2 281,82 €
	Bétonnage voile	126,36	0,20	25,27	593,88 €
	Ragréage	253,68	0,05	12,68	298,07 €
					13 194,53 €

N°	Désignation	U	Quantité	Déboursés unitaires	Déboursés secs Matériel
	Coffrage semelle	m2	50,95	9,09 €	126,32 €
	Location compacteur tandem 1,5 t	j	1	105,00 €	105,00 €
	Echafaudage	m2	150,12	2,73 €	409,42 €
	Coffrage voile face1 + abouts	m2	154,55	18,18 €	766,35 €
	Coffrage voile face 2	m2	129,47	9,09 €	320,99 €
	Location grue	j	5	1 000,00 €	5 000,00 €

Location pompe à béton	j	2	550,00	1 100,00 €
				7 828,07 €

Remarque :

Les tarifs de location journaliers ont été établis sur la base de 22 jours ouvrés par mois, on aurait pu prendre 21 jours ou 30x5/7.

Pour réaliser un panneau tous les 5 jours, soit 562h de travail soit 15 ouvriers, il est nécessaire de mettre en place plusieurs équipes qui travaillent simultanément sur plusieurs panneaux simultanément : par exemple :

Une équipe semelle (195 h soit 5 ouvriers)

Une équipe coffrage face intérieure et ferrailage (232 h soit 6 ouvriers)

Une équipe fermeture du coffrage et bétonnage (135 h soit 4 ouvriers)

Le coffrage de la face intérieure et des abouts sera donc immobilisé pendant 10 jours

Déboursé Sec total :

Déboursés secs Matériaux	Déboursés secs Main d'Œuvre	Déboursés secs Matériel	Déboursés secs Totaux
52 950,58 €	13 194,53 €	7 828,07 €	73 973,18 €

R5- PVHT des travaux de réalisation d'une facette de la paroi périphérique

Coût de Réalisation ou Déboursé Total = DS + FC avec FC = 0.14 DS

Coût de Revient = DT + FG avec FG = 0.18 DT

PVHT = CR + B avec B = 0.04 PVHT

		%FC	FC				
DS	73 973,18	14%	10356,25	%FG	FG		
		DT	84329,43	18%	15179,30	%B	B
				CR	99508,73	4%	4146,20
						PVHT	103654,92
						kv	1,401

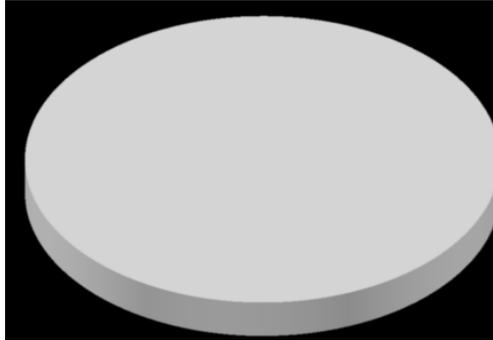
$$Kv = (1 + 14\%) \times (1 + 18\%) \times (1 + 4\% / (1 - 4\%)) = 1,401$$

1.2.3	Ferrailage (densité de ferrailage :50 kg/m3)								4 156.475	KG	4 156.475
1.3	Poteaux										
1.3.1	Coffrage										
	Partie rectiligne : périmètre		1.15								
			0.50								
			<u>1.15</u>								
				2.80	2.00	5.60					
	Partie trapézoïdale : périmètre moyen (2.100+1.150)/2		1.63								
			0.50								
			<u>1.63</u>								
				3.76	1.40	<u>5.26</u>					
								10.86			
								x 3 poteaux			
								32.57		M2	32.571
1.3.2	Bétonnage										
	Calcul de la surface latérale	Trapèze	1.63	1.40	2.28						
		Rectangle	1.15	2.00	<u>2.30</u>						
								4.58	0.50	2.288	
										x 3 poteaux	
										6.863	M3
											6.863
1.3.3	Ferrailage (densité de ferrailage : 50 kg/m3)								343.125	KG	343.125
1.4	Dalle épaisse										
1.4.1	Coffrage										
	Coffrage circulaire extérieur : périmètre : Plx10.00		31.42	2.18	68.49						
	Coffrage circulaire intérieur : périmètre : Plx4.300		13.51	2.18	29.45						
	Coffrage fond de moule (surface totale) : PI x 8.50 ²				226.98						
	Coffrage fond de moule déduire ouverture centrale : PI x 4.30 ²				-58.09						
								266.83			M ²
	About de coffrage		2.85	2.18	6.21						266.828
1.4.2	Bétonnage										
	Surface extérieur : PI() x (5.000) ² =				78.54						
	Surface intérieur : PI() x (2.15) ² =			à déduire	<u>14.52</u>						
								64.02	2.18	139.559	M3
											139.559
1.4.3	Ferrailage (densité de ferrailage : 100 kg/m3)								13 955.881	KG	13 955.881
1.5	Voile périphérique supérieur										
1.5.1	Coffrage										
	Coffrage circulaire extérieur : périmètre : Pix8.000		25.13	2.00	50.27						
	Coffrage circulaire intérieur : périmètre : Plx6.000		18.85	2.00	<u>37.70</u>						
								87.96			
	Coffrage de la partie horizontale du bequet										
	Surface extérieur : PI() x (4.00) ² =				50.27						
	Surface intérieur : PI() x (3.65) ² =			à déduire	<u>41.85</u>						
								8.41			
								96.38			M ²
	About de voile		1.00	2.00	1.00						96.376
1.5.2	Bétonnage										
	Voile d'épaisseur 1.000 m										
	Surface extérieur : PI() x (4.000) ² =				50.27						
	Surface intérieur : PI() x (3.000) ² =			à déduire	<u>28.27</u>						
								21.99	1.60	35.186	
	Volume du bequet										
	Surface extérieur : PI() x (3.650) ² =				41.85						
	Surface intérieur : PI() x (3.000) ² =			à déduire	<u>28.27</u>						
								13.58	0.40	5.432	
										40.618	M3
											40.618
1.4.3	Ferrailage (densité de ferrailage : 50 kg/m3)								2 030.883	KG	2 030.883

Volume total de béton : 368 m³

1. Présenter le phasage des travaux ainsi que les reprises de bétonnage entre les différentes parties :

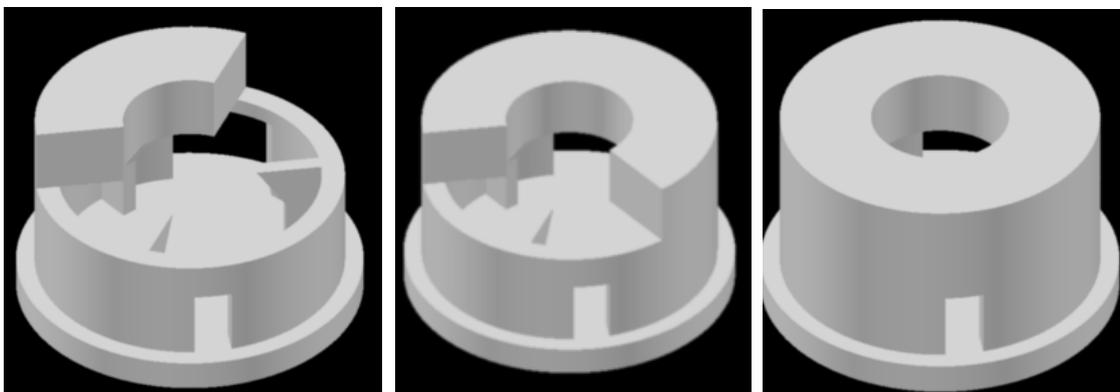
- Après recépage des pieux, réalisation du radier



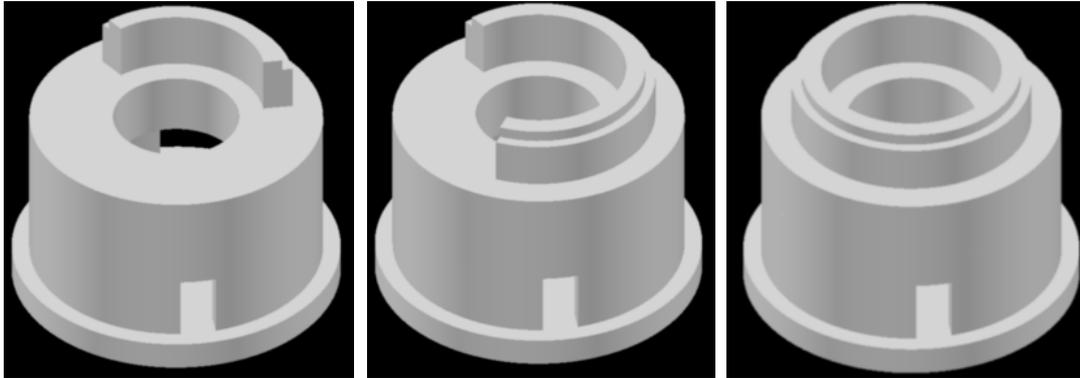
- Réalisation du poteau et d'un tiers du voile périphérique inférieur :
La réalisation du poteau et d'une partie du voile dans le même coulage permet un raccordement simple de l'élément courbe et rectangulaire.
La réalisation d'une amorce de part et d'autre du poteau permet un raccordement sans côte bloquée pour le voile périphérique.
La réalisation d'un tiers du noyau permet une économie de coffrage et un réemploi.



- Réalisation de la dalle épaisse : pour optimiser la quantité de coffrage et faire le bétonnage dans la journée, on peut de nouveau diviser la dalle en trois parties. Les arrêts de bétonnage devront être décalés par rapport au voile :



- Réalisation du voile périphérique supérieur de la même manière avec un phasage en trois parties pour permettre une réutilisation du coffrage et un phasage de bétonnage. Le becquet étant coulé en même temps que le voile :



2. Présenter les modes constructifs que vous avez retenu pour chaque phase de travaux en argumentant vos choix. Cette présentation devra être accompagnée de schémas soignés définissant le matériel utilisé et prenant en compte les contraintes liées à la sécurité.

Commentaires du jury

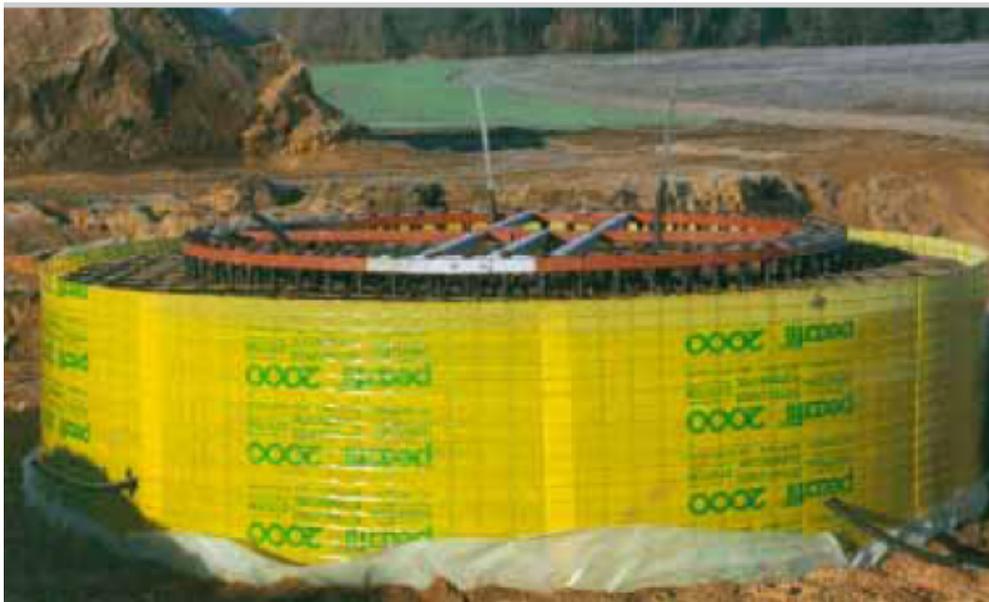
Moins de la moitié des candidats a abordé cette question. Lorsqu'elle était traitée, les bonnes solutions étaient souvent envisagées. Globalement les documents produits et les schémas ne rentraient pas trop dans les détails des problèmes posés.

Le matériel proposé dans cette correction, ne l'est qu'à titre indicatif pour illustrer la solution.

c) Radier

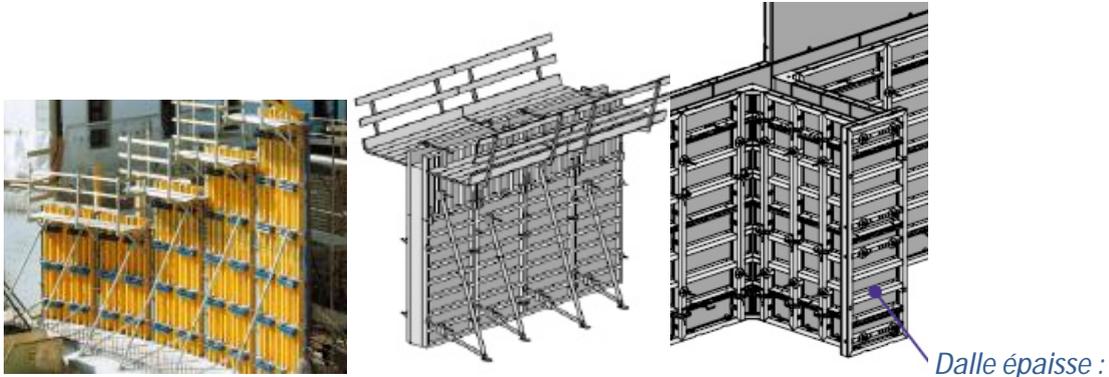
Terrassement – Béton de Propreté – Traçage, ferrailage - coffrage - bétonnage

Pour la partie enterrée, le parement peut ne pas être parfait. Par soucis de simplicité de coffrage et d'économie, on propose un coffrage perdu souple, commercialisé sous la marque de « Pécafil » utilisé principalement en fondation.

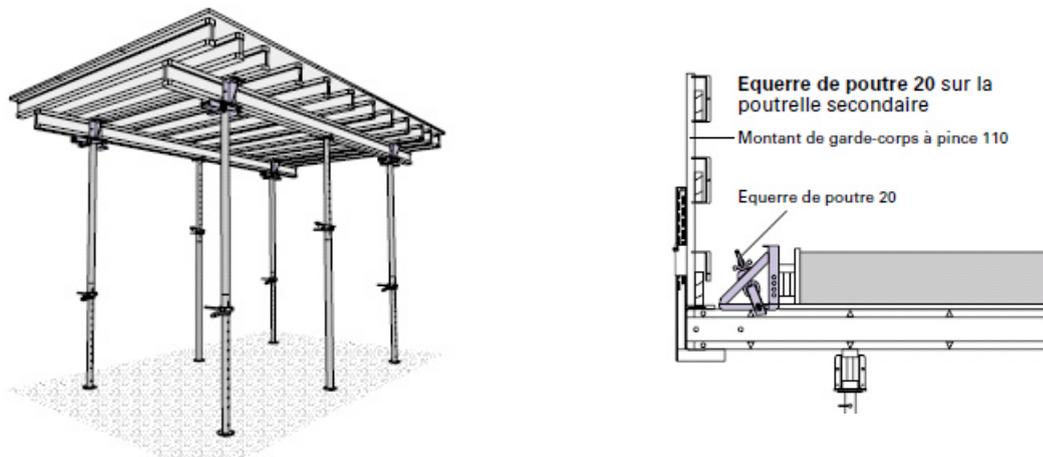


d) Voiles circulaires intérieurs :

On peut choisir un système mixte de voile courbe qui peut être raccroché à un système de coffrage de poteau pour coffrer un tiers de voile avec le poteau.



Platelage constitué de contreplaqué, poutrelles et étais du système Doka :

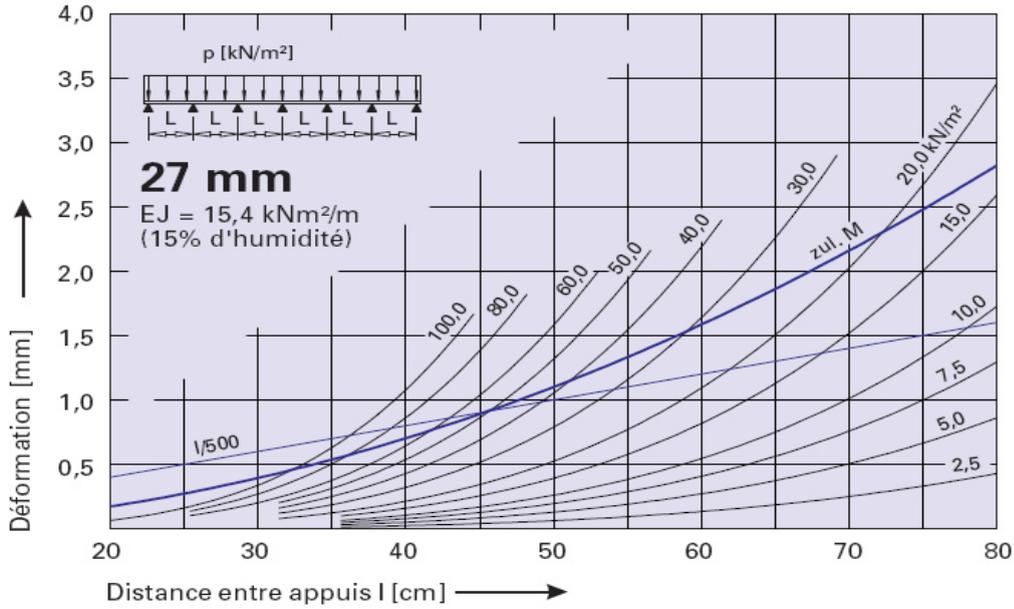


Commentaires du jury :

« Le calcul qui suit n'était pas demandé par le jury car les candidats n'avaient pas les documents du fournisseur, mais il est joint à titre indicatif pour démontrer la faisabilité de la solution ».

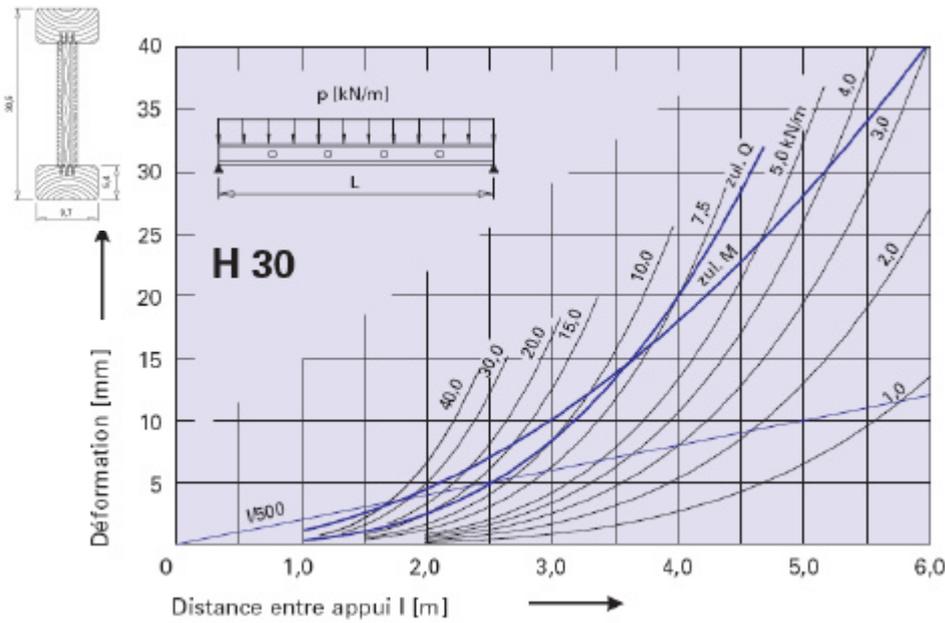
Ecartement des poutrelles :

Avec le critère de flèche au $1/500^{\text{ème}}$ de la portée pour de contreplaqué de 27 mm :
pour 2.20 de béton à $25 \text{ kN/m}^3 + 1 \text{ kN/m}^3$ pour tenir compte de l'effet dynamique, des charges de chantier, etc. on obtient 57.2 kN/m^2 soit un espacement entre poutrelles de 42 cm. On pourra prendre 40 cm



Le sens des fibres extérieures des panneaux sera perpendiculaire aux appuis.

Ecartement des étais :

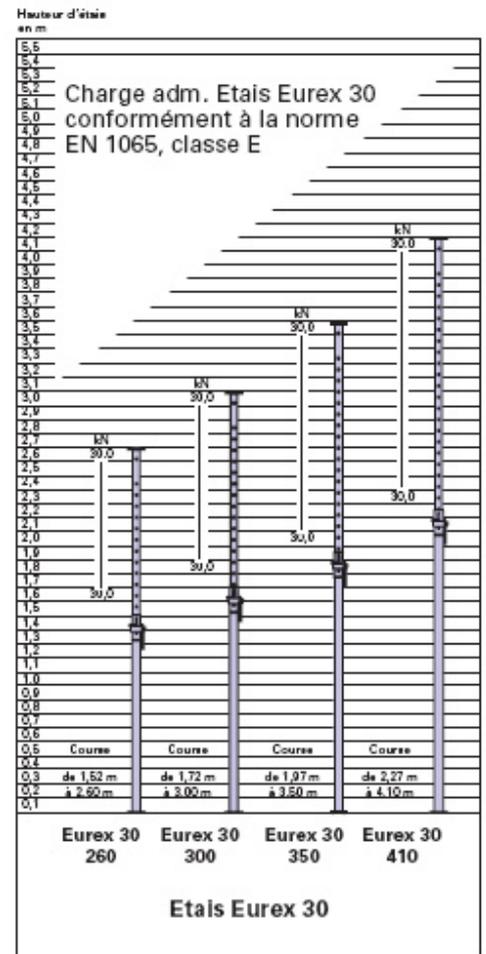


charge de $26 \times 0.40 = 10.40 \text{ kN/m}$

Pour les poutrelles H30 : on se réfère au diagramme précédent :

Toujours avec le critère de flèche on obtient des distances entre étais de 2.50 m. Soit une charge moyenne par étais de $2.50 \times 10.40 = 26 \text{ kN}$.

Pour des poutrelles écartées de 40 cm on obtient une



Charge adm. Etais Eurex 30 conformément à la norme EN 1065, classe E

Etais Eurex 30

On peut choisir les étais EUREX 30 350 pour une charge inférieure à 30 kN et une hauteur allant jusqu'à 3.50 m.

Coffrage latérale de la dalle

Pour le coffrage intérieur, il faut positionner sur le platelage le coffrage circulaire avec des clés de décoffrage. Il faut préparer un platelage central pouvant être hissé au niveau supérieur sans devoir décoffrer la dalle épaisse.

Pour le coffrage extérieur, on peut installer des consoles ou un échafaudage pour monter le coffrage circulaire extérieur. Ces coffrages sont limités à une poussée de 60 kN/m² que l'on obtient pour une hauteur de béton supérieure à 2.50 m ce qui n'est pas le cas ici !

f) Voile périphérique supérieur

Pour ce voile, on peut remonter le platelage intérieur et l'échafaudage extérieur pour positionner le coffrage circulaire en sécurité. Pour le béquet, il est plus simple de positionner le négatif dans le coffrage pour obtenir sa forme définitif.

3. Déterminer les effectifs et constituer les équipes

Commentaires du jury

Les candidats ayant effectués le quantitatif ont généralement bien traité cette partie et sont arrivés à des résultats convenables. Mais peu ont vérifié les durées de bétonnage.

Ref	Désignation	U	Q	TU	Crédit d'heures	Nb Ouvrier	Durée	Durée arrondie	Total
1.1	Radier								
1.1.1	Coffrage	M ^F	35.186	0.500	17.59	4	0.6	0.5	
1.1.3	Ferrailage (densité de ferrailage : 80 kg/m ³)	KG	7881.628	0.010	78.82	4	2.8	2.5	
1.1.2	Bétonnage Journée de 10h de coulage	M3	98.520	0.400	39.41	4	1.4	1	
									5.0
1.2	Voile périphérique inférieur et un poteau								
1.2.1	Premier cycle : un tiers du coffrage plus deux bouts								
	Coffrage du voile	M ^F	70.969	0.500	35.48	4	1.3	1.3	
	Ferrailage (densité de ferrailage : 50 kg/m ³)	KG	1385.492	0.010	13.85	4	0.5	0.5	
	Coffrage d'un poteau	M2	10.86	0.500	5.43	4	0.2	0.2	
	Ferrailage (densité de ferrailage : 50 kg/m ³)	KG	114.375	0.010	1.14	4	0.0	0	
							2.0		2
	Bétonnage du voile	M3	27.710	1.000	27.71	4	1.0	0.9	
	Bétonnage du poteau	M3	2.288	1.000	2.29	4	0.1	0.1	
							1.1		1
									3
1.2.1	Deuxième et troisième cycle : un tiers du coffrage plus deux bouts On conservera la même durée pour les deux prochains cycles.	M ^F	68.419	0.500	34.21	4	1.2		

1.4	Dalle épaisse								
	Premier Cycle : le coffrage du fond de moule est monté pour l'ensemble et un tiers de coffrage latérale et deux abouts								
	Fond de moule complet y compris vide annulaire central	M²	226.98	0.500	113.49	4	4.1		
	Tiers du coffrage latéral plus deux abouts	M²	45.071	0.500	22.54	4	0.8		
	Tiers du ferrailage	KG	4651.960	0.010	46.52	4	1.7		
							6.5		7
	Bétonnage	Journée de 9.5h de bétonnage	M3	46.520	0.800	37.22	4	1.3	1
									8
	Second et troisième cycle avec seulement le coffrage latéral et ferrailage								
	Tiers du coffrage latéral plus un about	M²	38.858	0.500	19.43	4	0.7		
	Tiers du ferrailage	KG	4651.960	0.010	46.52	4	1.7		
							2.4		3
	Bétonnage		M3	46.520	0.800	37.22	4	1.3	1
									4
1.5	Voiles périphérique supérieur								
	Premier cycle de coffrage : platelage central et un tiers du voile et deux abouts								
	Platelage central	M²	58.088	0.500	29.04	4	1.0		
	Tiers du coffrage latéral plus deux abouts	M²	34.125	0.500	17.06	4	0.6		
	Tiers du ferrailage	KG	676.961	0.010	6.77	4	0.2		
							1.9		1.5
	Bétonnage		M3	13.539	1.000	13.54	4	0.5	0.5
									2
	Deuxième et troisième cycle de coffrage : un tiers du voile et un about								
	Tiers du coffrage latéral plus deux abouts	M²	33.125	0.500	16.56	4	0.6		
	Tiers du ferrailage	KG	676.961	0.010	6.77	4	0.2		
							0.8		0.5
	Bétonnage		M3	13.539	1.000	13.54	4	0.5	0.5
									1

Compte tenu du découpage des travaux, cela ne peut être qu'une seule équipe qui réalise les travaux. Pour l'effectif, compte tenu de l'exigüité du noyau nous avons choisi 4 ouvriers. Nous avons vérifié que les durées de bétonnage sont raisonnables pour être réalisés dans la journée sans reprise.

4. Elaborer le planning journalier des travaux à réaliser dans le noyau central en complétant le document réponse R 6.

Commentaires du jury

L'étude et la réalisation du planning n'a été que très rarement abordé.

g) 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.**

Document Réponse R6 : Programme journalier des travaux du noyau central			J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15	J16	J17	J18	J19	J20	J21	J22	J23	J24	J25	J26	J27	J28	J29	J30	J31	J32	J33	J34	J35
Numéro	Nom de la tâche	Durée	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
1	Radier		[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
11	Coffrage et ferrallage	3	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
12	Bétonnage	1	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
2	Voile périphérique inférieur		[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
21	Cycle 1		[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Coffrage et ferrallage	2	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Bétonnage	1	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
22	Cycle 2		[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Coffrage et ferrallage	2	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Bétonnage	1	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
23	Cycle 3		[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Coffrage et ferrallage	2	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Bétonnage	1	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
3	Dalle épaisse		[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
31	Cycle 1		[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Coffrage et ferrallage	7	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Bétonnage	1	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
32	Cycle 2		[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Coffrage et ferrallage	3	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Bétonnage	1	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
33	Cycle 3		[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Coffrage et ferrallage	3	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Bétonnage	1	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
4	Voile périphérique supérieur		[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
41	Cycle 1		[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Coffrage et ferrallage	15	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Bétonnage	0.5	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
42	Cycle 2		[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Coffrage et ferrallage	0.5	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Bétonnage	0.5	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
43	Cycle 3		[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Coffrage et ferrallage	0.5	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
	Bétonnage	0.5	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		
5	Démontage	1	[Gantt chart grid with red bars representing task durations]																																		

Légende			
Equipe N°	Effectif	Fonction	Représentation
Equipe N° 1 :	4 ouvriers	Coffreurs-Ferrailleurs-Bétonneux	[Red bar]
Equipe N° 2 :			
Equipe N° 3 :			
Equipe N° 4 :			

Légende			
Equipe N°	Effectif	Fonction	Représentation
Equipe N° 5 :			
Equipe N° 6 :			
Equipe N° 7 :			
Equipe N° 8 :			

Conclusions du jury

Le jury rappelle qu'un approfondissement des connaissances des candidats en technologie est nécessaire pour aborder cette épreuve.

Des visites et des suivis 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 (ingénieur méthodes, chargé d'affaire, conducteur de travaux) 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***

Epreuve portant sur l'ingénierie de projet

Option B : Equipements et Energies

* * *

PARTIE 1

1. Démarche haute Qualité Environnementale (HQE)

La Haute Qualité Environnementale se définit comme étant une démarche de management de projet visant à obtenir la qualité environnementale d'une opération de construction ou de réhabilitation.

L'obtention des performances environnementales de l'ouvrage est autant une question de management environnemental qu'une question architecturale et technique. Le référentiel technique de certification est structuré en deux volets permettant d'évaluer les performances atteintes sur les deux éléments structurants de la démarche HQE :

- le référentiel du Système de Management de l'Opération (SMO) pour évaluer le management environnemental mis en œuvre par le maître d'ouvrage,
- le référentiel de la Qualité Environnementale du Bâtiment (QEB) pour évaluer la performance architecturale et technique de l'ouvrage.

La Qualité Environnementale du Bâtiment consiste à maîtriser les impacts des bâtiments sur l'environnement extérieur et à créer un environnement intérieur sain et confortable. Il s'agit d'une réponse opérationnelle à la nécessité d'intégrer les critères du développement durable dans l'activité du bâtiment. Il s'agit d'une prise en compte de l'environnement à toutes les étapes de l'élaboration et de la vie des bâtiments : programmation, conception, construction, gestion, utilisation, démolition...

La Qualité Environnementale du Bâtiment est déclinée en 14 cibles (cf. tableau) représentant des enjeux environnementaux pour une opération de construction. Ces 14 cibles sont elles-mêmes déclinées en sous-cibles, représentant les préoccupations majeures associées à chaque enjeu environnemental, puis en préoccupations élémentaires.

MAITRISER LES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT EXTERIEUR	CREER UN ENVIRONNEMENT INTERIEUR SATISFAISANT
SITE ET CONSTRUCTION Cible n°1 : Relation du bâtiment avec son environnement immédiat Cible n°2 : Choix intégré des produits, systèmes et procédés de construction Cible n°3 : Chantier à faible impact environnemental	CONFORT Cible n°8 : Confort hygrothermique Cible n°9 : Confort acoustique Cible n°10 : Confort visuel Cible n°11 : Confort olfactif
GESTION Cible n°4 : Gestion de l'énergie Cible n°5 : Gestion de l'eau Cible n°6 : Gestion des déchets d'activités Cible n°7 : Maintenance - Pérennité des performances environnementales	SANTE Cible n°12 : Qualité sanitaire des espaces Cible n°13 : Qualité sanitaire de l'air Cible n°14 : Qualité sanitaire de l'eau

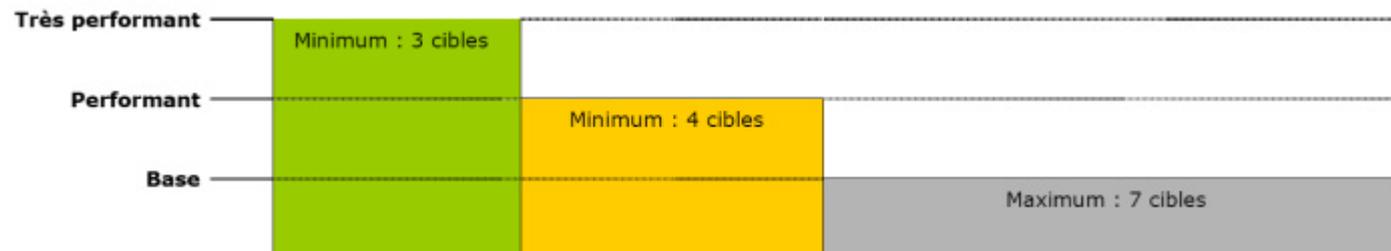
Niveaux de performance associés aux cibles de Qualité Environnementale du Bâtiment :

L'une des phases les plus importantes de la démarche HQE est celle de la hiérarchisation des "exigences" environnementales. Par exemple, pour une construction neuve, tout n'est pas possible en même temps.

La performance associée aux cibles de QEB se décline selon 3 niveaux :

- **BASE** : niveau correspondant à la performance minimum acceptable pour une opération HQE. Cela peut correspondre à la réglementation si celle-ci est suffisamment exigeante sur les performances de l'ouvrage, ou à défaut à la pratique courante.
- **PERFORMANT** : niveau correspondant à de bonnes pratiques.
- **TRES PERFORMANT** : niveau calibré par rapport aux performances maximales constatées dans des opérations à haute qualité environnementale, tout en veillant à ce qu'il reste atteignable.

L'attribution du certificat est subordonnée à l'obtention d'un profil minimum sur les 14 cibles :



Le maître d'ouvrage doit donc établir une liste de priorités en choisissant parmi les quatorze "cibles de construction", les trois qui lui semblent les plus importantes et sur lesquelles un maximum d'effort sera concentré. De même, dans cette hiérarchisation, quatre autres cibles seront retenues pour un traitement particulier. Les cibles restantes se devant d'être traitées d'une façon évidemment très correcte, au minimum conformément à la réglementation ou aux bonnes pratiques. Ces choix se font en fonction du terrain sur lequel sera installée la construction, de la destination du bâtiment et de toutes les caractéristiques propres au projet.

Pour la construction, la démarche HQE apporte un plus pour :

- la santé : qualité de l'air intérieur, qualité de l'eau au robinet, bonne hygiène des locaux
- le confort : températures et humidité, recherche de la lumière naturelle et qualité de la lumière électrique, lutte contre le bruit et les mauvaises odeurs,
- les économies de charges d'habitation, chauffage, électricité, entretien,
- la valeur patrimoniale des immeubles et leur capacité d'adaptation.

Pour la planète et la collectivité, la démarche HQE contribue :

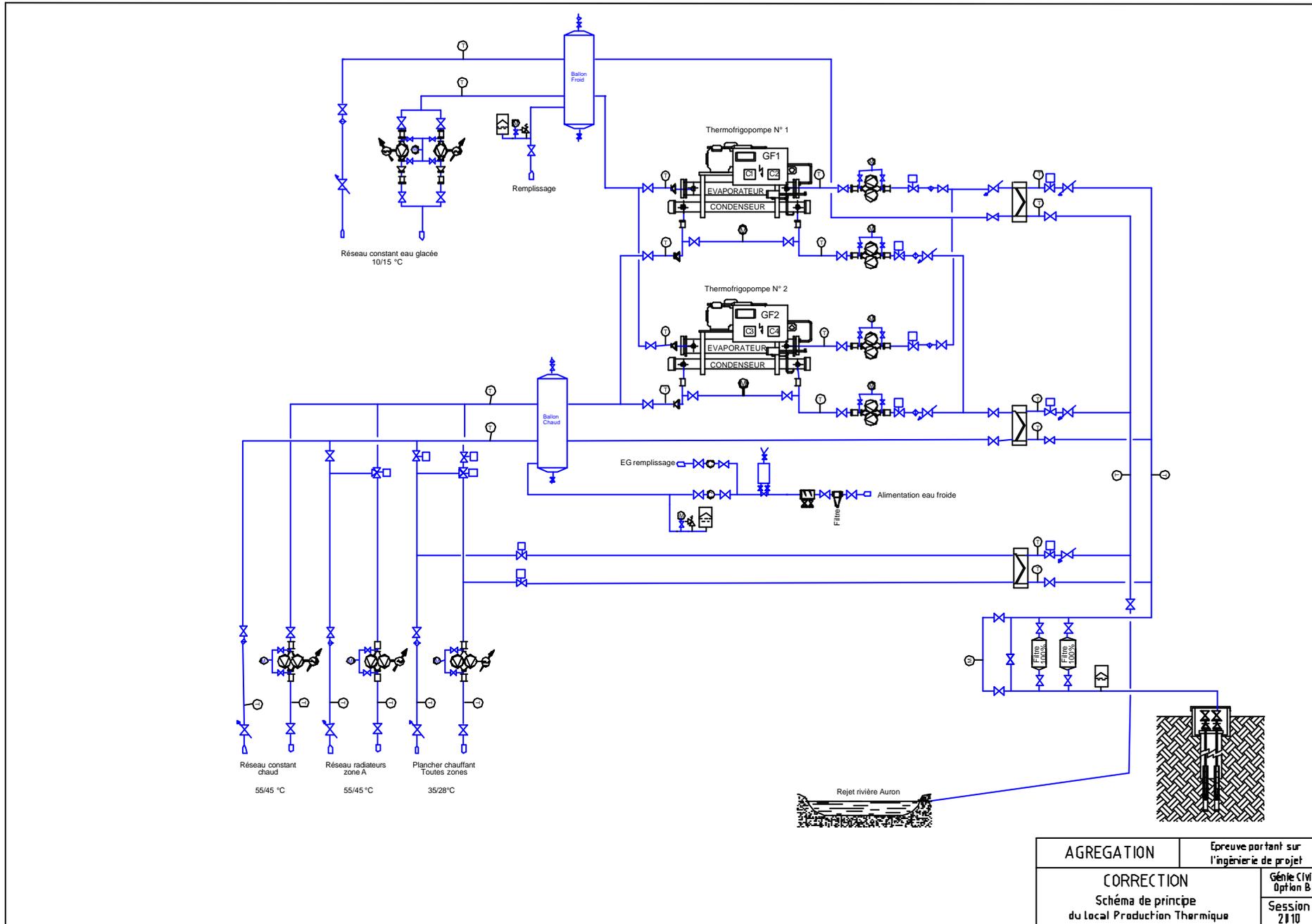
- à bien gérer les ressources naturelles : réduction des prélèvements de matières premières, gestion des eaux pluviales et des espaces collectifs,
- à économiser l'énergie sous toutes ses formes,
- à lutter contre le réchauffement climatique,
- à réduire les pollutions émises par les logements : pollution de l'air, eaux usées, tri des déchets,
- à une bonne insertion dans le site, pour un paysage urbain de qualité,
- au maintien et au développement de la diversité biologique, par une bonne gestion des espaces extérieurs,
- pendant le chantier, à une réduction des nuisances pour les riverains.

2. Tableau comparatif entre Thermofrigopompe et Chaudière Gaz + Groupe Eau Glacée

Critères de comparaison	Solution de base Chaudière gaz à condensation modulante+ Groupe Froid à condensation par air	Thermofrigopompe sur nappe phréatique
Faisabilité	Pas de contrainte particulière de faisabilité (réseau Gaz à proximité seulement).	Nécessite une nappe phréatique en sous sol et un forage à proximité.
Implantation dans la construction	Chaudière Gaz dans la chaufferie et Groupe Froid à l'extérieur de la chaufferie, en terrasse par exemple.	Implantation de la thermofrigopompe en lieu et place des chaudières dans le local technique chaufferie.
Coût investissement	Solution de base.	Surcoût par rapport à un groupe froid de l'installation de pompage (forage, matériel de pompage, réseau d'alimentation des échangeurs et échangeurs) Mais économie de chaudière.
Impact environnemental : ➤ Sur l'air ➤ Sur l'eau ➤ Energie finale ➤ Energie primaire	Solution de base.	GES (Gaz à effet de Serre) diminué d'une quantité équivalente à celle de la chaudière gaz de la solution de base. Gain en énergie finale. Gain sur énergie primaire diminué en raison du coefficient de 2,58 de l'électricité.
Coût d'exploitation : ➤ Coût annuel ➤ Maintenance	Solution de base.	Plus économe en coût annuel par rapport à la solution de base, vérifier le coût du pompage. Maintenance plus onéreuse en raison des pompes de puisage.

	<p align="center">Solution de base</p> <p align="center">Chaudière gaz à condensation modulante+ Groupe Froid à condensation par air</p>	<p align="center">Thermofrigopompe sur nappe phréatique</p>
<p>Avantages</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilité de produire du chaud et du froid simultanément, les puissances fournies en chaud et froid seront à tout moment adaptées aux plus proche des besoins. • Sélection de la puissance de chaque matériel en fonction des besoins maxi en chaud et froid. 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilité de produire du chaud et du froid simultanément avec une seule machine au lieu de deux. <p>Implantation de la thermofrigopompe en lieu et place des chaudières dans le local technique</p> <ul style="list-style-type: none"> • Présente des rendements d'exploitations intéressants, par l'usage simultané du chaud et du froid produit par la thermofrigopompe. • Bilan GES intéressant. • Bilan en énergie finale plus intéressant. • Consommation électrique plus importante que la solution de base, et conséquence négative sur le bilan en Energie Primaire.
<p>Inconvénients</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite l'implantation d'une chaufferie pour la chaudière Gaz (encombrement). • Pose du Groupe Froid à condensation par air en toiture ou à l'extérieur du bâtiment (niveau sonore). • GES important due à la présence de la chaudière gaz. • Bilan en énergie finale moyen. • Maintenance plus importante. • Risque vis-à-vis de la sécurité contre l'incendie avec le local à risque chaufferie gaz. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite une puissance d'appoint par puisage ou rejet sur nappe phréatique pour adaptation à la puissance demandée. Nécessite donc des échangeurs sur nappe d'eau phréatique. • Sélection du matériel en fonction de la puissance maxi en chaud et froid. • Impact écologique, lié aux rejets dans la rivière. • Contraintes liées au forage (variation du niveau d'eau dans le puits de forage). • Entretien des pompes immergées plus difficile.

3. Schéma de principe



Partie 2

1. Production de chaud et de froid par thermofrigopompe

1.1. Sélection

De l'analyse de l'annexe 2, il faut retenir que la sélection sera faite non pas d'après le premier tableau des caractéristiques techniques sous les conditions EUROVENT, (car les températures spécifiques de régime de fonctionnement ne sont pas celles attendues dans notre projet) mais plutôt d'après le tableau de performances annoncées pour le modèle 30hxc080 option 50 (High condensing).

Pour couvrir les besoins en été, une seule thermofrigopompe suffit, pour les déperditions en hiver, il en faudra 2 :

- Puissance calorifique : 655 kW
- Puissance frigorifique en été : 290 kW

Un groupe de production d'eau glacée assurera les besoins frigorifiques des bâtiments. Il sera implanté dans la zone technique sur la terrasse derrière la scène de l'auditorium. La puissance froid à couvrir est de 290 kW.

Produit : 30HXC080-phase 3 OPTION 150 (High condensing)

	<u>Mode de fonctionnement</u> <u>« HIVER » optimisé</u>	<u>Mode de fonctionnement</u> <u>« ETE » optimisé</u>
Puissance brut	248 kW	<u>303 kW</u>
Puissance absorbée unité	85 kW	62 kW
Puissance abs compresseur		
COP	85 kW	62 kW
Nombre de palier de charge	2,92	4,87
Palier minimum :	6	6
Réfrigérant	19%	19%
Détendeur	R134A EXV	R134A EXV
Evaporateur :		
Fluide		
Sortie :	eau	eau
Delta :	7 °C	10 °C
Entrée :	4 °C	5 °C
Débit :	11,03 °C	15 °C
Perte de charge évaporateur	14,7 l/s	14,7 l/s
Encrassement :	65 kPa	63 kPa
Pression maxi eau	0,04403 m ² K/W 1 000 kPa	0,04403 m ² K/W 1 000 kPa
Condenseur :		
Fluide :		
Entrée :	eau	eau
Delta :	50 °C	30 °C
Sortie :	5,4 °C	6 °C
Débit :	55,4 C	36C
Perte de charge évaporateur	14,7 l/s	14,7 l/s
Encrassement :	25 kPa	25 kPa
Pression maxi eau	0,04403 m ² K/W	0,04403 m ² K/W
THR puissance calorifique	1 000 kPa <u>329 kW</u>	1 000 kPa 363 kW

1.2 Détermination des températures d'évaporation et de condensation

Hypothèses : En mode hiver, pincement 5 °C sur l'évaporateur et sur le condenseur
 En mode été, pincement 5 °C sur l'évaporateur et 4°C sur le condenseur :

Retenons les valeurs suivantes pour définir les cycles frigorifiques :

Régime	Hiver	Été
To	2	5
Tk	60	40

1.3. Tracé des cycles frigorifiques

Mode Hiver - Hypothèses :

- compression isentropique
- sous refroidissement 5 °C
- surchauffe 5 °C

Point	1	2	3	4
P (Bar abs)	3,15	16,82	16,82	3,15
T (°C)	7	70	55	5
h (kJ/kg)	403,02	438,56	278,3	278,3
v (dm ³ /kg)	66,36			
s (kJ/kgK)	1,737	1,737		

$$P_c = Q_{m_{ff}} \cdot (h_2 - h_3) \quad (Q_{m_{ff}} : \text{débit massique de fluide frigorigène})$$

$$Q_{m_{ff}} = 329 / (438,56 - 278,3) = 2,05 \text{ kg/s}$$

Pabs unite (d'après tableau) = 85 kW

$$\boxed{COP_c = P_c / P_{abs} = 329 / 85 = 3,9}$$

Mode Été - Hypothèses :

- compression isentropique
- sous refroidissement 5 °C
- surchauffe 5 °C

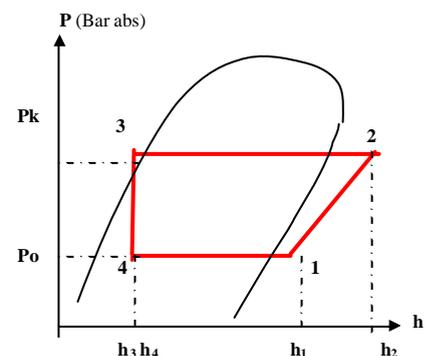
Point	1	2	3	4
P (Bar abs)	3,5	10,15	10,15	3,5
T (°C)	10	49,6	35-36	5
h (kJ/kg)	404,78	427,56	248,1	248,1
v (dm ³ /kg)	59,7			
s (kJ/kgK)	1,736	1,737		

$$P_f = Q_{m_{ff}} \cdot (h_1 - h_4)$$

$$Q_{m_{ff}} = 303 / (404,78 - 248,1) = 1,934 \text{ kg/s}$$

Pabs unite (d'après tableau) = 62 kW

$$\boxed{COP_f = P_f / P_{abs} = 303 / 62 = 4,9}$$



2. Etude des échangeurs à plaques

	Puissance	Température Primaire	Débit Primaire (eau nappe)	Température secondaire	Débit secondaire	Modèle Présélectionné Type
	kW	°C	m ³ /h	°C	m ³ /h	
Echangeur évaporateur	496	15	75	7/11	106	VT045
Echangeur condenseur	365	15	78	36/30	53	VT028

Modèle Echangeur Type	Surface d'une plaque (m ²)	Coefficient d'échange (kW/m ² K)
VT045	4,46.10 ⁻¹	5,04
VT028	2,685.10 ⁻¹	1,64

Les températures d'entrée et sortie sur circuit secondaire sont relevées dans les performances annoncées par constructeur Modèle 30 HXC80

Mode HIVER Echangeur côté Evaporateur type VT045:

	Côté Primaire (eau nappe)	Côté secondaire	
Puissance échangée	496 kW d'après doc CARRIER mode HIVER (valeur multipliée par 2 car 2 thermofrigopompes en fct)		
Débit (m3/h)	75 d'après lecture sujet	106	D'après doc CARRIER
T° entrée	15 d'après lecture sujet	7	
T° sortie	$T_{SP} = T_{EP} - P / Qm.Cp = 15 - 496 / (75 * 999,002 / 3600) / 4.186 = 9,3 \text{ °C}$	11	
DTLM	$DTLM = \frac{(T_{pe} - T_{ss}) - (T_{ps} - T_{se})}{\ln\left(\frac{T_{pe} - T_{ss}}{T_{ps} - T_{se}}\right)} = \frac{(15 - 11) - (9.31 - 7)}{\ln\left(\frac{15 - 11}{9.31 - 7}\right)} = 3,07 \text{ °C}$		
Surface nécessaire d'échange	$S = P / (K.DTLM) = 496 / (5,04 \times 3,07) = 32 \text{ m}^2$		
Nb plaques	$= 32.05 / 4,46.10^{-1} = 71.9$ plaques soit 73 plaques		
Efficacité	$E = 5,47 / 8 = 0,68$		

Mode ETE Echangeur côté Condenseur type VT028:

	Côté Primaire (eau nappe)	Côté secondaire	
Puissance échangée	365 kW d'après doc CARRIER mode Été 1 thermofrigopompe en fct		
Débit (m3/h)	78 d'après lecture sujet	53	D'après doc CARRIER
T° entrée	15 d'après lecture sujet	36	
T° sortie	$T_{SP} = T_{EP} + P / Qm.Cp = 15 + 365 / (78 * 998,072 / 3600) / 4.186 = 19 \text{ °C}$	30	
DTLM	$DTLM = \frac{(T_{se} - T_{ps}) - (T_{ss} - T_{pe})}{\ln\left(\frac{T_{se} - T_{ps}}{T_{ss} - T_{pe}}\right)} = \frac{(36 - 19.03) - (30 - 15)}{\ln\left(\frac{36 - 19.03}{30 - 15}\right)} = 16 \text{ °C}$		
Surface nécessaire d'échange	$S = P / (K.DTLM) = 365 / (1,64 \times 15,96) = 14 \text{ m}^2$		
Nb plaques	$= 13,94 / 2,685.10^{-1} = 51,93$ plaques soit 53 plaques		
Efficacité	$E = 6 / 21 = 0,29$		



ECHANGEUR A PLAQUES VITHERM - FICHE TECHNIQUE

Client :
Référence : ENMB

Page : 1
Repère : 1 - EVAPORATEUR

DONNEES DE CALCUL

	Coté Primaire	Coté Secondaire	
DC1 Puissance		P = 496 kW	kW
DC2 Température d'entrée	15	7	°C
DC3 Température de sortie	9,31	11	°C
DC4 Débit	(75)	(106)	kg/hr (m³/hr)
DC5 Fluide	Eau	Eau	
DC6 Pression d'étude		NC	bar
DC7 Température d'étude		NC	°C

LIMITATION DE CALCUL

LC1 Perte de Charge Maxi	.21	.21	bar
LC2 Coefficient d'encrassement	0.00001	0.00001	°C.m².h/kcal

DONNEES PHYSIQUES

DP1 Masse spécifique	999.002	999.156	kg/m³
DP2 Chaleur spécifique	1.000	1.000	kcal/kg.°C
DP3 Conductivité thermique	0.502	0.501	kcal/hr.m.°C
DP4 Viscosité dynamique	1.266	1.306	centipoise

ECHANGEUR SELECTIONNE

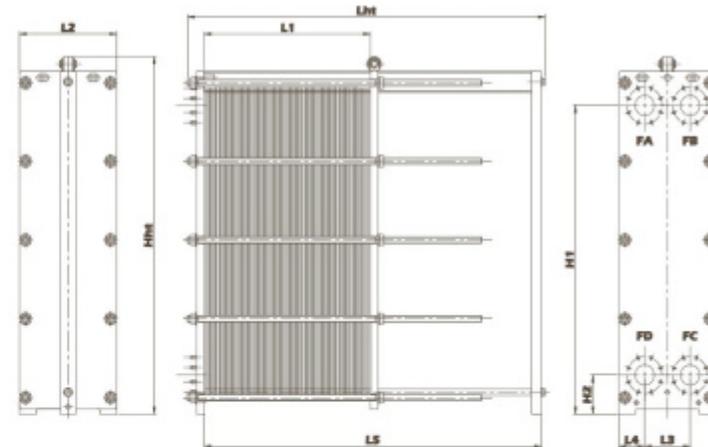
ES1 Type d'échangeur	VT045		
ES2 D.T.L.M.		9,31 °C	°C
ES3 Perte de charge	1.00	1.90	mCE
ES4 Nombre de passes	1	1	
ES5 Vitesse entre plaques	0.13	0.18	m/s
ES6 Vitesse dans les tubulures	2.7 (DN100)	3.8 (DN100)	m/s

ES10 Surface d'échange		32,05 m²	m²
ES11 Pression d'épreuve	9.0	9.0	bar
ES12 Poids a vide		1260	kg
ES13 Poids en charge		1657	kg
ES14 Volume des circuits	198.900	198.900	litres

OBSERVATIONS :

1°) Coefficient d'échange moyen à prendre en compte pour les calculs :
K = 5,04 kW/m²K

2°) Surface d'échange par plaque : **4,46.10⁻¹ m²**



Lht	1800	mm	Hht	1655	mm
L1		mm	H1	1491	mm
L2	500	mm	H2	189	mm
L3	235.0	mm	DN racc.	PN16 DN100	
			Type racc.	CB taraudée	

DONNEES DE FABRICATION

DF1 Matériau du batt	Fe 510 C1
DF3 Matériau des plaques	SS316
DF4 Matériau des collecteurs	EPDM
DF5 Matériau des joints	EPDM
DF6 Plaques	73 Plaques HC 0.6 mm
DF7 Distance entre plaques	4.0 mm

RACCORDEMENT

R1 Entrée/Sortie Primaire	FA/FC
R2 Entrée/Sortie Secondaire	FD/FB



ECHANGEUR A PLAQUES VITHEM - FICHE TECHNIQUE

Client :
Référence : ENMB

Repère : 1 - CONDENSEUR

DONNEES DE CALCUL

	Coté Primaire	Coté Secondaire	
DC1 Puissance		$P = 367 \text{ kW}$	kW
DC2 Température d'entrée	15	36	°C
DC3 Température de sortie	19,05	30	°C
DC4 Débit	(78)	(53)	kg/hr (m³/hr)
DC5 Fluide	Eau	Eau	
DC6 Pression d'étude	NC		bar
DC7 Température d'étude	NC		°C

LIMITATION DE CALCUL

LC1 Perte de Charge Maxi	.5	.5	bar
LC2 Coefficient d'encrassement	0.00001	0.00001	°C.m².h/kcal

DONNEES PHYSIQUES

DP1 Masse spécifique	998.072	993.833	kg/m³
DP2 Chaleur spécifique	1.000	1.000	kcal/kg.°C
DP3 Conductivité thermique	0.510	0.534	kcal/hr.m.°C
DP4 Viscosité dynamique	1.094	0.769	centipoise

ECHANGEUR SELECTIONNE

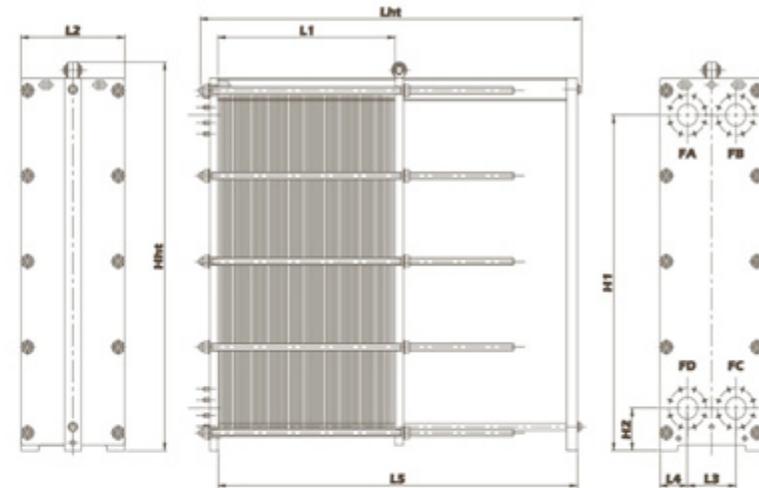
ES1 Type d'échangeur	VT028		
ES2 D.T.L.M.		15,95 °C	°C
ES3 Perte de charge	2.90	1.30	mCE
ES4 Nombre de passes	1	1	
ES5 Vitesse entre plaques	0.64	0.44	m/s
ES6 Vitesse dans les tubulures	2.8 (DN100)	1.9 (DN100)	m/s

ES10 Surface d'échange		14,03 m²	m²
ES11 Pression d'épreuve	9.0	9.0	bar
ES12 Poids a vide		503	kg
ES13 Poids en charge		556	kg
ES14 Volume des circuits	26.400	26.400	litres

OBSERVATIONS :

1°) Coefficient d'échange moyen à prendre en compte pour les calculs :
 $K = 1,64 \text{ kW/m}^2\text{K}$

2°) Surface d'échange par plaque : $2,685.10^{-1} \text{ m}^2$



Lht	800	mm	Hht	1235	mm
L1		mm	H1	1071	mm
L2	500	mm	H2	189	mm
L3	235.0	mm	DN racc.	PN16 DN100	
			Type racc.	CB taraudée	

DONNEES DE FABRICATION

DF1 Matériau du bâti	Fe 510 C1
DF3 Matériau des plaques	SS316
DF4 Matériau des collecteurs	EPDM
DF5 Matériau des joints	EPDM
DF6 Plaques	53 Plaques SC 0.6 mm
DF7 Distance entre plaques	4.0 mm

RACCORDEMENT

R1 Entrée/Sortie Primaire	FC/FA
R2 Entrée/Sortie Secondaire	FB/FD

3. Etude hydraulique du circuit de captage et de rejet

3.1 Sélection de la pompe de captage

A partir du débit requis pour les échangeurs à plaques d'après le CCTP, (75 et 78 m³/h), la pompe doit pouvoir assurer 78 m³/h.

Pour déterminer la hauteur manométrique, il faut appliquer le théorème de Bernoulli en tenant compte des conditions de fonctionnement suivantes :

- Différence de niveau à vaincre : 50 m
- Pression à obtenir après passage dans l'échangeur : 1,5 bar
- Pertes de charges des accessoires :
 1. échangeur 2,9 mCE (d'après feuille réponse)
 2. Tuyauterie Inox : 40 m DN 150 (159,5 x 4,5)
 3. Tuyauterie PVC DN 160 : 80 m
 4. Filtre max : 15 mCE max
 5. Vanne de commutation VVF 41 KVS 80
 6. Vanne de réglage TA dn 150
 7. Compteur WESAN (choix DN125 Kvs 330)

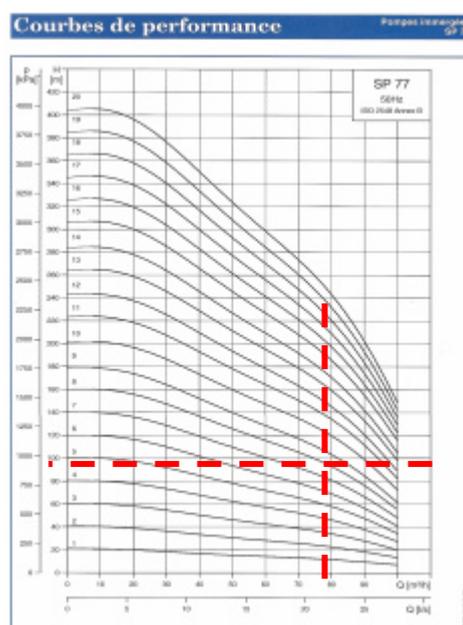
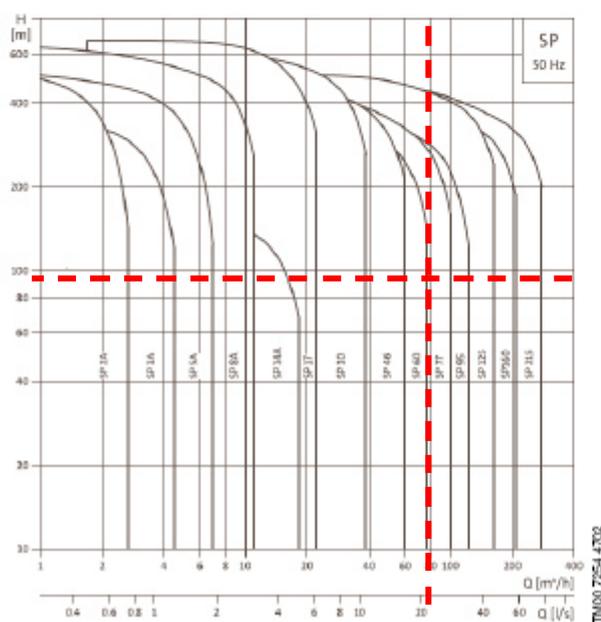
Tableau de calcul des pertes de charge des accessoires : (du point 0 au point 2 sur schéma)

Pdc Accessoires	Circuit échangeur condenseur Qv = 78 m3/h	Circuit échangeur évaporateur Qv = 75 m3/h
1. Tuyauterie Inox	J = 10 mmCE /m JL = 40 x 10 = 400 mmCE	J = 9,2 mmCE /m JL = 40 x 9,2 = 368 mmCE
2. Tuyauterie PVC	J = 11mmCE /m JL = 80 x 11 = 880 mmCE	J = 10,2 mmCE /m JL = 80 x 10,2 = 816 mmCE
3. Filtre	15 mCE	15 mCE
4. Echangeur	2,9 mCE	1,9 mCE
5. Vanne de commutation	0,95 bar	0,879 bar
Total J₀₋₂ (mCE)	28,86	27,04

$$H_m = \sum p_{dc} + (P_2 - P_0) + \rho g Z + \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$H_m = 28,86 + 15,29 + 50 + 0,006 = 94,16 \text{ mCE}$$

Sélection de la pompe : Choix possible du modèle SP 77 → 8 étages minimum



3.2 Réglages nécessaires : équilibrage des 2 circuits.

Grâce aux vannes TA DN 150, il est possible de régler les pertes de charge de chaque circuit et d'atteindre le point de fonctionnement de la pompe aux débits requis.

Le circuit hydraulique à considérer est le circuit entier (point 0 à 3), il faut inclure les pertes de charge du compteur et la longueur totale du circuit :

$$P_0 + \rho g Z_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2 + H_m - J_{0-3} = P_3 + \rho g Z_3 + \frac{1}{2} \rho v_3^2$$

$$P_0 = P_3 = P_{atm}$$

$$v_0 = 0$$

$$Z_0 - Z_3 = 35 \text{ m}$$

$$\rho g Z_0 + H_m - J_{0-3} = \rho g Z_3 + \frac{1}{2} \rho v_3^2$$

$$J_{0-3} = H_m - \rho g (Z_3 - Z_0) - \frac{1}{2} \rho v_3^2$$

Le tableau suivant donne les pertes de charge du circuit sans inclure celle de la vanne de Réglage TA :

Pdc Accessoires	Circuit échangeur condenseur Qv = 78 m3/h	Circuit échangeur évaporateur Qv = 75 m3/h
1. Tuyauterie Inox	j = 10 mmCE /m JL = 40 x 10 = 400 mmCE	j = 9,2 mmCE /m JL = 40 x 9,2 = 368 mmCE
2. Tuyauterie PVC	j = 11mmCE /m JL = 130 x 11 = 1430 mmCE	j = 10,2 mmCE /m JL = 130 x 10,2 = 1326 mmCE
3. Filtre	15 mCE	15 mCE
4. Echangeur	2,9 mCE	1,9 mCE
5. Vanne de commutation	0,95 bar	0,879 bar
7. Compteur WESAN DN 125 Kvs = 330	0,056 bar	0,051 bar
Total J₀₋₃sans Vanne TA (mCE)	29,98	28,07

$$\frac{1}{2} \rho v_3^2 = 581 \text{ Pa}$$

$$H_m = 95 \text{ mCE (lue sur courbes de performances)}$$

$$J_{0-3} = H_m - \rho g (Z_3 - Z_0) - \frac{1}{2} \rho v_3^2 = 95 - 35 - 0.06 = 59,94 \text{ mCE}$$

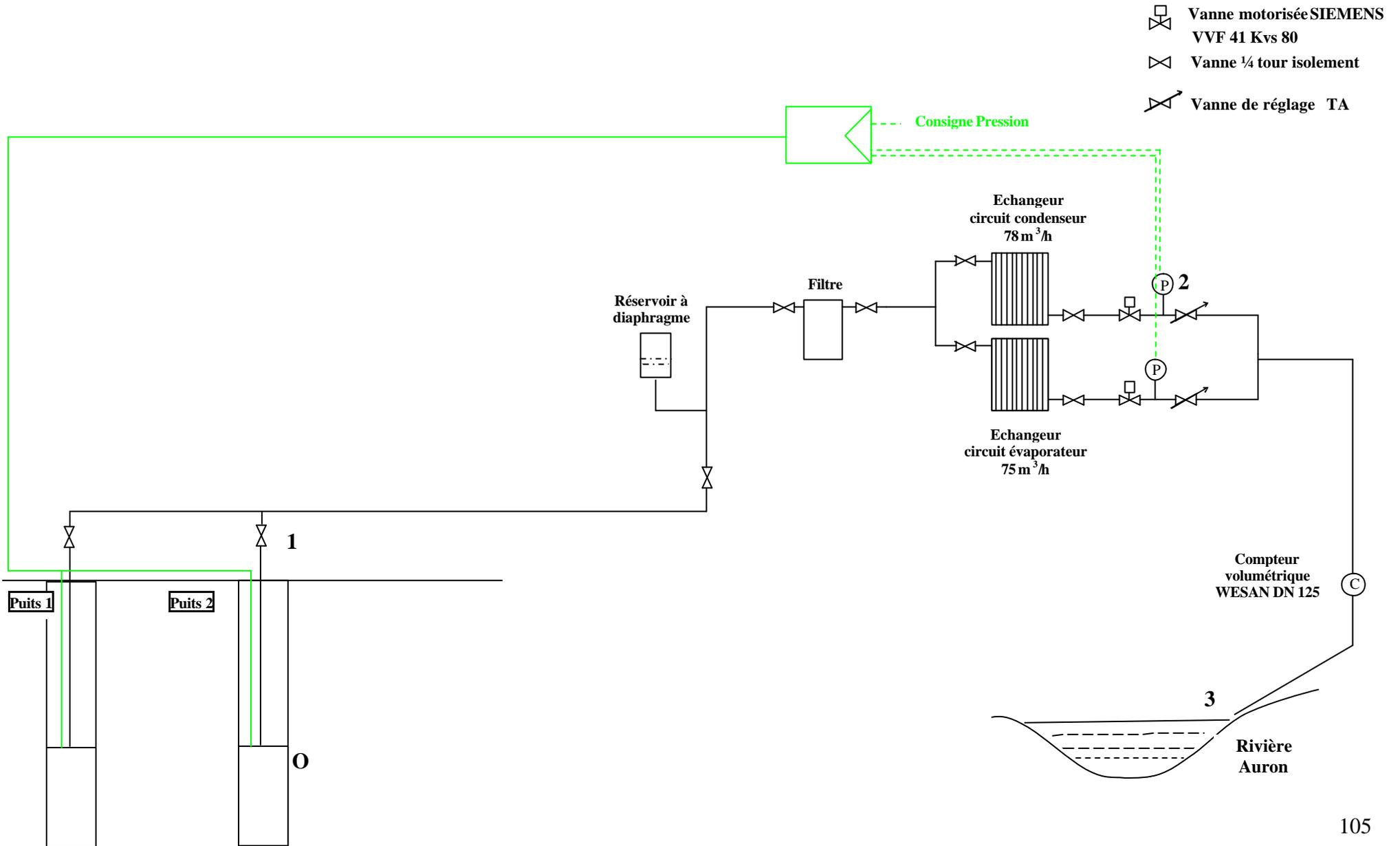
Résultat pour le circuit condenseur :

$$J \text{ vanne TA} = J_{0-3} - J_{0-3 \text{ sans vanne TA}} = 29,96 \text{ mCE} \rightarrow Kvs = Qv / \sqrt{v?p} = 45,49 \rightarrow \text{position 2,1 tours}$$

Résultat pour le circuit évaporateur :

$$J \text{ vanne TA} = J_{0-3} - J_{0-3 \text{ sans VR}} = 31,87 \text{ mCE} \rightarrow Kvs = Qv / \sqrt{v?p} = 42,41 \rightarrow \text{position 2 tours}$$

Schéma de Principe Circuit de captage



PARTIE 3

1. Conception du traitement d'air de l'auditorium

1.1 Détermination des conditions de soufflage en été

Pour déterminer le débit total de soufflage de la CTA, nous allons distinguer deux zones, d'une part la salle avec les 500 personnes et d'autre part la fosse d'orchestre et la scène avec ses 120 musiciens.

1.1.1. Etude de la salle

Calcul des apports totaux de la salle :

Apports sensibles par les personnes :	28,5 kW
Apports par l'éclairage :	9 kW
Apports latents par les personnes :	21,2 kW
Apports en humidité :	$8,5 \cdot 10^{-3}$ kg/s

Détermination des conditions de soufflage dans la salle (Point S₁) :

Calcul du débit massique de soufflage :

$$\text{Bilan en chaleur sensible : } H_{\text{sens}} = qm_{\text{AS}} \times Cp \times \Delta\theta \rightarrow qm_{\text{AS Salle}} = 3,1 \text{ kg/s}$$

$$\text{Bilan en humidité : } M = qm_{\text{AS}} \times \Delta r \rightarrow rs = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Calcul du débit volumique d'air neuf :

$$qv_{\text{AN}} = 9\,000 \text{ m}^3/\text{h}$$

Calcul du débit massique d'air neuf :

$$qm_{\text{AN}} = 2,9 \text{ kg/s}$$

1.1.2. Etude de la scène

Calcul des apports totaux de la scène :

Apports sensibles par les personnes :	7,2 kW
Apports par l'éclairage :	27 kW
Apports latents par les personnes :	11,5 kW
Apports en humidité :	$4,6 \cdot 10^{-3}$ kg/s

Détermination des conditions de soufflage dans la cage de scène (Point S₂) :

Calcul du débit massique de soufflage :

$$\text{Bilan en chaleur sensible : } H_{\text{sens}} = qm_{\text{AS}} \times Cp \times \Delta\theta \rightarrow qm_{\text{AS Salle}} = 6,8 \text{ kg/s}$$

$$\text{Bilan en humidité : } M = qm_{\text{AS}} \times \Delta r \rightarrow rs = 8,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Calcul du débit volumique d'air neuf :

$$qv_{\text{AN}} = 2160 \text{ m}^3/\text{h}$$

Calcul du débit massique d'air neuf :

$$qm_{\text{AN}} = 0,7 \text{ kg/s}$$

Dans la CTA

Débit massique total de la CTA :	9,9 kg/s
Débit volumique total de la CTA :	30 650 m ³ /h

La CTA HYDRONIC sera donc de type CCM 315 avec séparateur de gouttelettes.

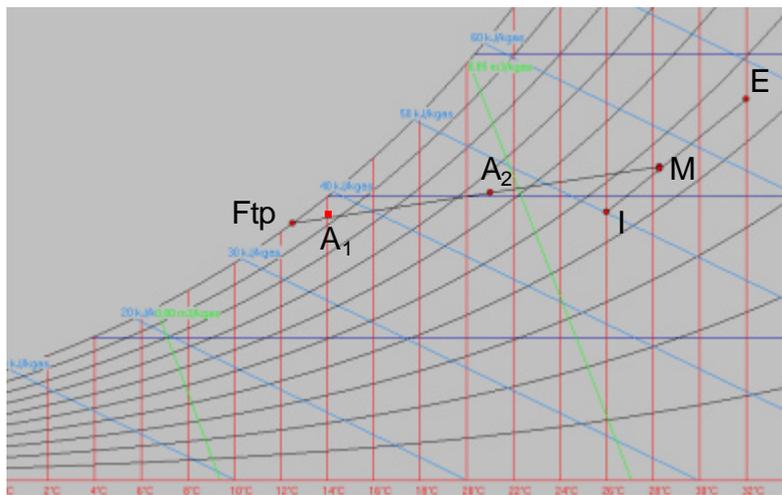
Détermination du point de mélange dans la CTA :

Le taux d'air neuf dans la CTA est de 37 %.

Tableau récapitulatif des résultats :

Etat de l'air	Point	q (°C)	ϕ (%)	h (kJ/kg _{AS})	r (g/kg _{AS})
Air Intérieur Salle	I	26	45	51	9,5
Air extérieur	E	32	45	64	13,5
Point de soufflage calculé pour la salle	S ₁	14	55	30	6,5
Point de soufflage calculé pour la scène	S ₂	21	57	43	8,8
Point de mélange	M	28,3	45	56	11
Point de sortie batterie froide pour la salle	A ₁	14	90	37	9,3
Point de sortie batterie froide pour la scène	A ₂	21	65	46,5	10

Evolution sur le Diagramme de l'air humide :



1.2. Détermination des conditions de soufflage en hiver

Le dimensionnement de la batterie chaude va s'effectuer dans les conditions les plus défavorables, pour cela deux cas vont être étudiés :

- Sans occupation. Il est précisé dans le CCTP, que la CTA sera à l'arrêt, ou en recyclage total, uniquement sur température ambiante trop basse.
- Avec occupation de la salle

CAS N°1 : Salle sans occupation, fonctionnement de la CTA en recyclage total

Calcul des déperditions :

- Salle de spectacle :	- 14,5 kW
- Scène	- 18,5 kW
TOTAL Déperditions :	- 33 kW

En recyclage total, la batterie chaude aura une puissance de 33 kW.

Détermination des conditions de soufflage :

$$\text{Bilan en chaleur sensible : } H_{\text{sens}} = qm_{\text{AS}} \times C_p \times \Delta\theta \rightarrow \Delta\theta = - 3,3 \text{ °C} \rightarrow$$

La température de soufflage sera de 22,5°C, au débit maximum de la CTA.

CAS N°2 : Salle avec occupation (500 pers.), scène (120 pers.)

Calcul des déperditions :

- Salle de spectacle : - 14,5 kW
- Scène - 18,5 kW

Calcul des apports sensibles :

- Salle de spectacle, par les personnes : + 26,5 kW
- Scène par les musiciens + 6,7 kW
- Salle de spectacle, éclairage : + 9 kW
- Scène, éclairage + 27 kW
- TOTAL apports sensibles : + 36,2 kW

Calcul des apports latents salle + scène : 34,9 kW

Détermination des conditions de soufflage :

Bilan en chaleur sensible : $H_{sens} = q_{m_{AS}} \times C_p \times \Delta\theta \rightarrow \Delta\theta = 3,7 \text{ °C} \rightarrow$

Bilan en chaleur latente : $H_{lat} = q_{m_{AS}} \times L_v \times \Delta r \rightarrow \Delta r = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/kg}_{AS}$

La température de soufflage calculée sera de 15,3°C, et l'humidité absolue de soufflage de 4,8 g/kg_{AS} au débit maximum de la CTA.

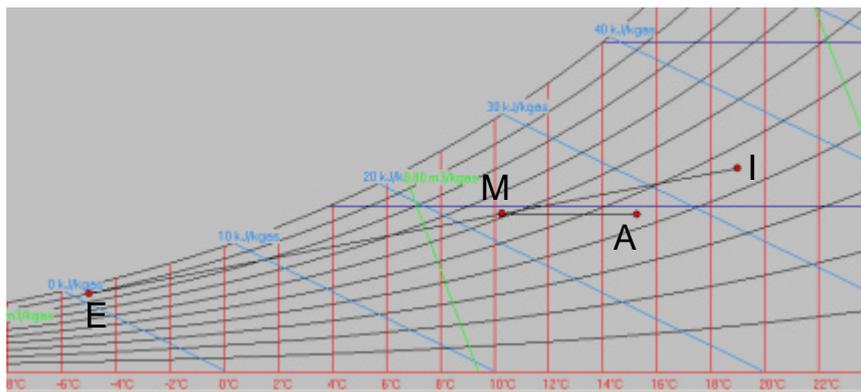
Dans la CTA

Débit massique total de la CTA : 9,9 kg/s (identique à l'été)

Tableau récapitulatif des résultats :

Etat de l'air	Point	q (°C)	φ (%)	h (kJ/kg _{AS})	r (g/kg _{AS})
Air Intérieur Salle	I	19	45	35	6,2
Air extérieur	E	- 5	90	1	2,3
Point de soufflage calculé salle + scène	S	15,3	48	28	4,8
Point de mélange	M	10,5	60	22,4	4,8
Point de sortie batterie chaude	A	15,3	48	28	4,8

Evolution sur le Diagramme de l'air humide :



1.3. Caractéristiques des équipements

Puissance de la batterie chaude :

$$P_{BC} = qm_{AS} \times \Delta h = qm_{AS} \times (h_A - h_M) \quad \rightarrow 55 \text{ kW}$$

Puissance de la batterie froide :

Pour maintenir les deux niveaux de température de soufflage dans la salle et la scène + fosse d'orchestre, il faut prévoir une première batterie froide dans la CTA qui abaissera la température de l'air soufflé à 21°C, puis une batterie froide terminale sur le réseau de soufflage de la salle qui va refroidir l'air jusqu'à 14°C. Le régime d'eau des batteries froides est de 10/15°C, soit une température moyenne de surface de batterie froide humide de 12,5°C.

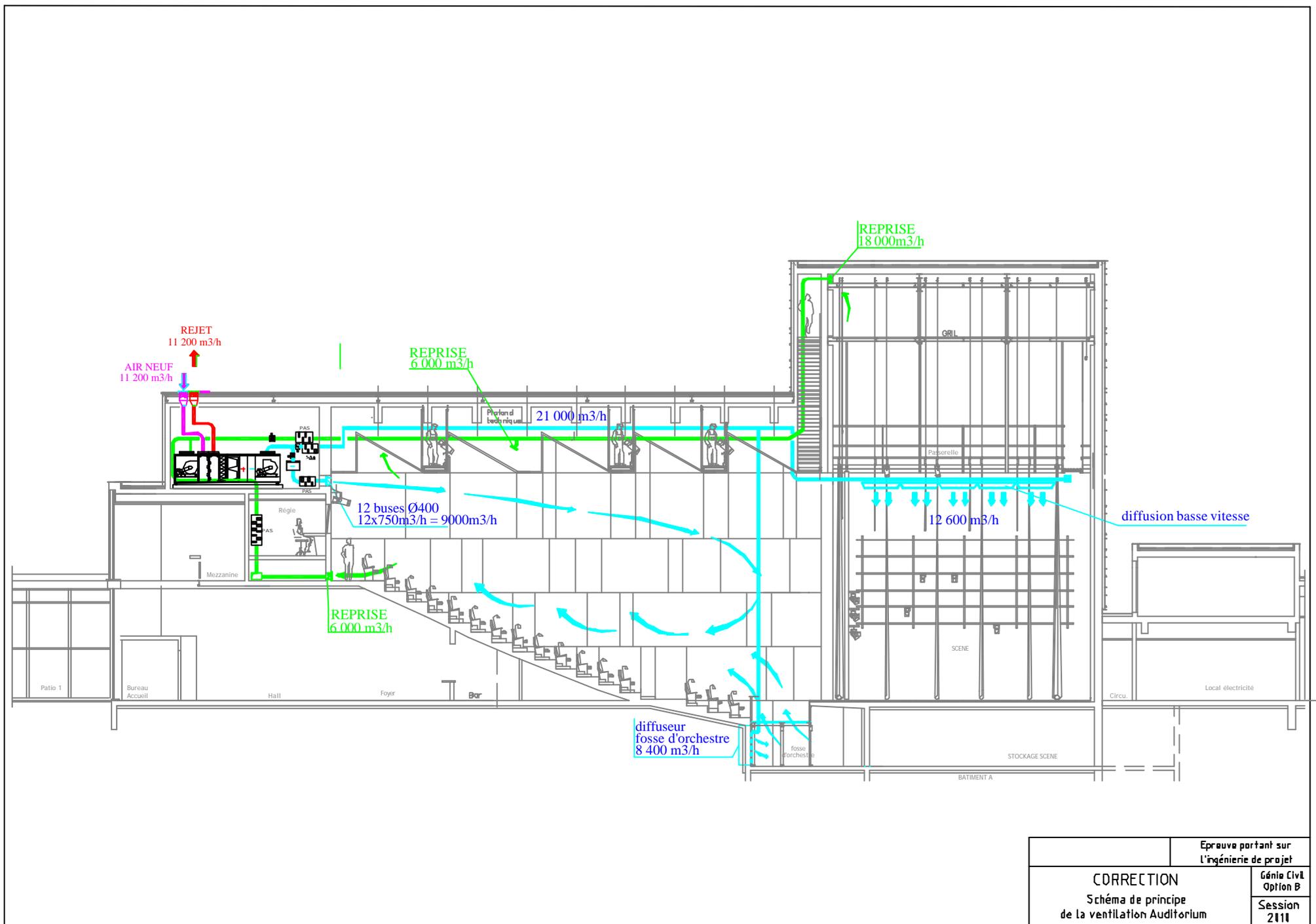
$$P_{BF} = qm_{AS} \cdot (h_M - h_{A2}) \quad \rightarrow 94 \text{ kW}$$

$$\text{Efficacité de la batterie froide : } E = \frac{h_M - h_A}{h_M - h_{FPT}} = \frac{56 - 46,5}{56 - 35} = 0,45 \rightarrow 45\%$$

$$\text{Puissance de la batterie froide terminale, pour la salle : } P_{BF} = qm_{AS} \cdot (h_{A2} - h_{A1}) \quad \rightarrow 29 \text{ kW}$$

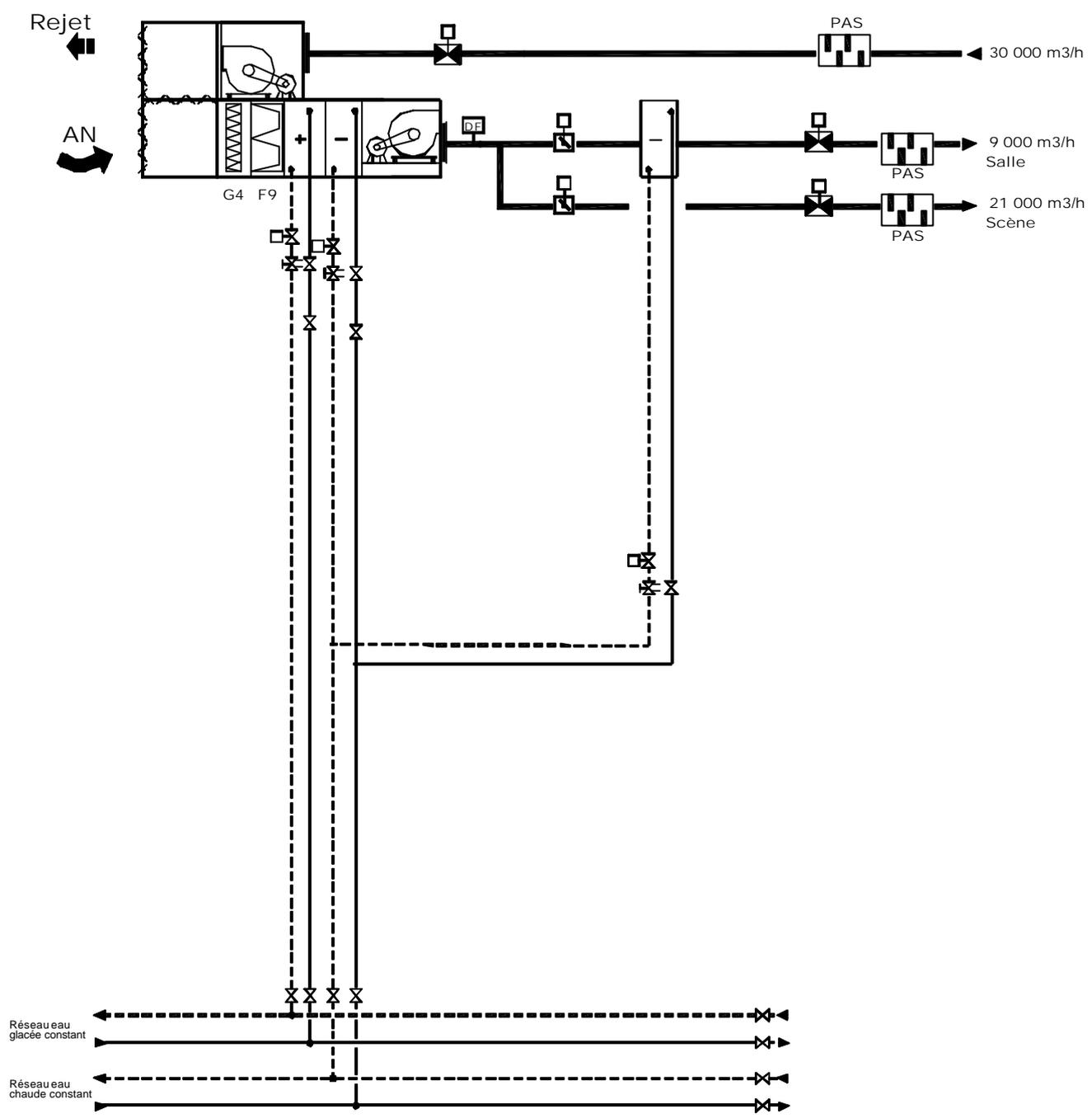
$$\text{Efficacité de la batterie froide terminale : } E = \frac{h_M - h_A}{h_M - h_{FPT}} = \frac{46,5 - 37}{46,5 - 35} = 0,83 \rightarrow 83\%$$

Remarque : Les points de sortie des batteries froides (A_1) et (A_2), ne correspondent pas aux points de soufflage calculés (S_1) et (S_2). La température sortie des batteries est correcte, mais pas l'humidité relative, qui est plus élevée. Dans cet espace, aucune contrainte d'humidité relative n'est fixée au CCTP, donc l'humidité relative de la salle et de la scène ne sera pas contrôlée.



		Epreuve portant sur l'ingénierie de projet	
CORRECTION Schéma de principe de la ventilation Auditorium		Génie Civil Option B	
		Session 2111	

Schéma de principe de la CTA Auditorium



3. 4. Nomenclature des équipements de la GTB Energie Systeme

Repère	Désignation Actionneur ou commande équipement	Type de signal	E/S	TA	TS	TM	TC	TR	Raccordement sur matériel Energie Systeme (préciser les références des modules Energie Systeme)
1	Variateur de vitesse du ventilateur soufflage	0-10V	A0					1	1 sortie sur Energie Box 8 A0
2	Variateur de vitesse du ventilateur de reprise	0-10V	A0					1	1 sortie sur Energie Box 8 A0
3	Vanne de régulation de la BC CTA	0-10V	A0					1	1 sortie sur Energie Box 8 A0
4	Vanne de régulation de la BF CTA	0-10V	A0					1	1 sortie sur Energie Box 8 A0
5	Vanne de régulation de la BF terminale	0-10V	A0					1	1 sortie sur Energie Box 8 A0
6	Registre d'air du caisson 3 voies	0-10V	A0					1	1 sortie sur Energie Box 8 A0
7	Commande marche/arrêt	TOR	DO				1		1 sorties sur Energie Box 8 D0
8	Commande PV et GV	TOR	DO				1		1 sorties sur Energie Box 8 D0
9	Défauts encrassement filtres	TOR	DI	2					2 entrées Energie Box 8 DI
10	Sonde détection incendie (CH24)	TOR	DI	1					1 entrée Energie Box 8 DI
11	Thermostat anti-gel	TOR	DI	1					1 entrée Energie Box 8 DI
12	Pressostat contrôle courroies ventilateurs	TOR	DI	2					2 entrées Energie Box 8 DI
13	Signalisation d'état : arrêt et PV/GV	TOR	DI		2				2 entrées Energie Box sur module UC Box
14	Fin de course des clapets coupe-feu	TOR	DI	3 ⁽²⁾					3 entrées Energie Box sur module UC Box
15	Synthèse défaut CTA	TOR	DI	1					1 entrée Energie Box 8 DI
17	Sondes d'ambiance	Pt 100 ⁽¹⁾	AI			4			4 entrées Energie Box 16 AI
18	Sondes de reprise scène	Pt 100 ⁽¹⁾	AI			1			1 entrée Energie Box 16 AI
19	Sonde de température extérieure	Pt 100 ⁽¹⁾	AI			1			1 entrée Energie Box 16 AI
20	Sonde de soufflage	Pt 100 ⁽¹⁾	AI			1			1 entrée Energie Box 16 AI
21	Sonde qualité d'air (CO ₂)	0-10V	AI			1			1 entrée Energie Box 16 AI

Nota : ⁽¹⁾ Les sondes PT 100 seront raccordées sur la GTB par l'intermédiaire d'un convertisseur de signal.

⁽²⁾ Le CCTP prévoit 2 CCF, un sur le réseau de soufflage et de reprise. La solution proposée prévoit un CCF supplémentaire, car le réseau de soufflage se divise en deux dans le local technique, pour alimenter la salle et la scène.

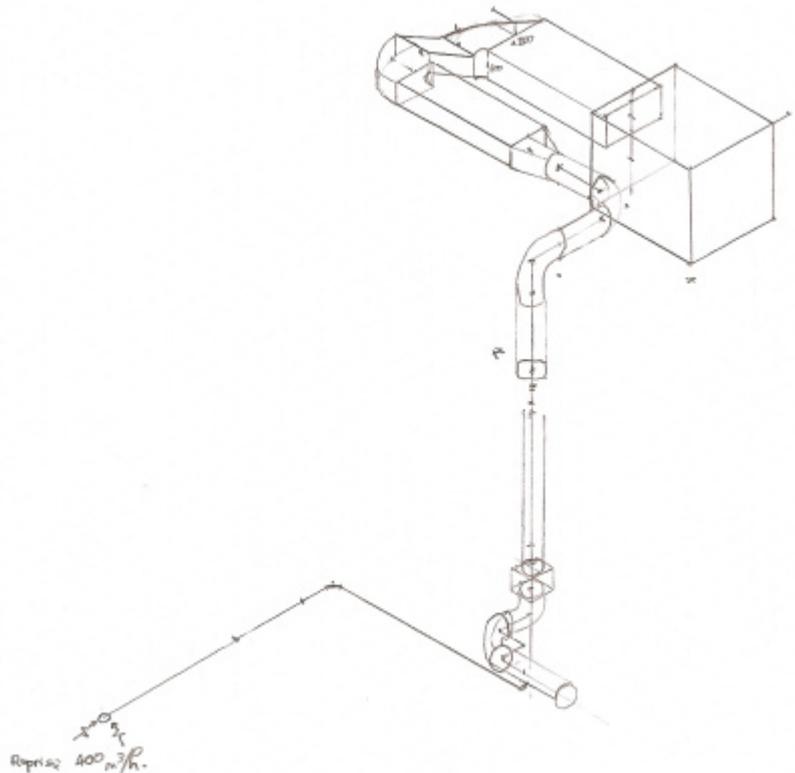
Tableau récapitulatif des points GTB et liste des Modules Energie Systeme

	Total des points GTB	TA	TS	TM	TC	TR	Listes du matériel Energie Systeme
TOTAL Automates et Régulation GTB Local technique CTA Auditorium	28	10	2	8	2	6	1 Module UC Energie Box Pro 1 module Energie Box 16 AI 1 Module Energie Box 8 A0 1 Module Energie Box 8 D0/ 8 DI

PARTIE 4

1. Liste des éléments constitutifs du réseau de reprise de la salle de musique 12.02 jusqu'à la CTA.

- a) 1 longueur droite 1 200 x 600 mm, longueur 900 mm
- b) 1 piège à son 1 200 x 600 mm, longueur 2 000 mm
- c) 1 coude 90 ° avec changement section 1200 x 600 mm
→ 800 x 400 mm
- d) 1 pièce de dévoiement rectangulaire 800 x 400 mm
- e) 1 coude 90°, 800 x 400 mm
- f) 1 longueur droite 2,60 m, 800 x 400 mm
- g) 1 changement section 800 x 400 mm → ϕ 630 mm
- h) 1 longueur droite 1 m, ϕ 630 mm
- i) 1 coude 90°, ϕ 630 mm
- j) 1 longueur droite 1 m, ϕ 630 mm
- k) 1 coude 90°, ϕ 630 mm
- l) 1 longueur droite 1,80 m, ϕ 630 mm
- m) 1 piquage 5940-3680 m³/h + réduction, ϕ 500 mm
- n) 1 longueur droite 3,2 m, ϕ 500 mm
- o) 1 CCF (clapet coupe feu)
- p) 1 coude 90°, ϕ 500 mm
- q) 1 longueur droite 0,2 m, ϕ 500 mm
- r) 1 coude 90°, ϕ 500 mm
- s) 1 longueur droite 0,5 m, ϕ 500 mm
- t) 1 piquage ϕ 200 mm, + coude 90 °
- u) 1 registre ϕ 200 mm
- v) 1 longueur droite 3,6 m, ϕ 200 mm
- w) 1 coude 90°, ϕ 200 mm
- x) 1 longueur droite 400 mm, ϕ 200 mm
- y) 1 piège à son ϕ 250 mm, longueur 1500 mm
- z) 1 longueur droite 3 m, ϕ 200 mm
- aa) Raccordement à la bouche de reprise



Tracé du réseau de reprise de la sortie CTA à la bouche de reprise de la salle formation musicale 12-02

2. Méthodologie : vérification du respect des contraintes acoustiques

Les éléments constituant le réseau étant définis à la question précédente, la méthode de calcul acoustique des réseaux est la suivante :

1. Définir le spectre de la puissance acoustique du ventilateur (symbole **Lw**),
2. Déterminer l'atténuation (symbole **At**) des éléments présents sur le réseau (longueur droite, coude, piège à son, clapet coupe feu, registre, piquage...)
3. Déterminer la régénération de bruit dû au passage du débit d'air, à partir d'abaques fournis (symbole **Rg**).
4. Déterminer la puissance en sortie de l'élément sans régénération (symbole **Lw1**) par soustraction de **At** à **Lw**.
5. Déterminer la puissance en sortie en tenant compte de la régénération, (symbole **Lw2**) par une somme logarithmique des niveaux **Lw1** et **Rg**.

Les différents calculs de la variation du niveau de puissance le long du réseau seront présentés dans un tableau pour chaque octave :

F (Hz)		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Lw ventilateur (dB)									
Eléments :	At (dB)								
	Rg (dB)								
Lw1 sortie sans régénération (dB)									
Lw2 sortie avec régénération (dB)									

Le calcul doit être fait de proche en proche jusqu'à la bouche de reprise.

Cette méthode permet de tenir compte des bruits régénérés par les éléments constituant le réseau, qui peuvent être prépondérants devant le niveau de bruit atténué du ventilateur.

La même étude doit être faite sur le réseau de soufflage en partant du niveau de puissance du ventilateur de soufflage, auquel on retranche les atténuations, mais en tenant compte aussi des régénérations de chaque élément du réseau de soufflage, jusqu'en amont de la bouche de soufflage.

Au niveau de chaque bouche (en reprise comme au soufflage), il faut additionner les niveaux de puissance intrinsèque de la bouche et le niveau de puissance précédent.

Déterminer enfin, le niveau de pression dû au réseau de soufflage, puis dû au réseau de reprise, en prenant en compte l'émission en champ direct ($r = 1,7$ m ; facteur de directivité $Q = 2$) et en champ réverbéré (temps de réverbération donné dans le CCTP).

Déterminer le niveau global et effectuer la comparaison aux contraintes acoustiques fixées au CCTP.

3. Niveau de puissance en sortie du piège à son

F (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000
Lw ventilateur Reprise (dB)	82	76	82	67	65	63	54
Atténuation PAS 1200 x 600 X 2000 (dB)	7	17	35	38	49	50	43
Bruit du flux d'air (dB)	48	43	39	35	31	28	25
Correction LS (dB)	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Bruit corrigé avec LS (dB)	47	42	38	34	30	27	24
Lw après PAS sans régénération (dB)	75	59	47	29	16	13	11
Lw après PAS avec régénération (dB)	75,0	59,1	47,5	35,2	30,2	27,2	24,2

4. Détermination du niveau de pression au centre du local

F (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000
Somme des atténuations de la sortie du PAS à l'entrée de la bouche de reprise (dB)	20	22	23	25	25	24	26
Lw réseau avant bouche de reprise (dB)	55,0	37,1	24,5	10,2	5,2	3,2	-
Lw Bouche Reprise (dB)	51	39	30	24	20	18	15
Lw résultant en reprise (dB)	56,5	41,2	31,1	24,2	20,1	18,1	15,1
Lw soufflage (bruit provenant du ventilateur soufflage atténué par réseau) (dB)	55,8	34,7	24,4	15,5	11,3	11,3	11,4
Lw Bouche soufflage (dB)	51	39	30	24	20	18	15
Lw résultant soufflage (dB)	57,0	40,4	31,1	24,6	20,5	18,8	16,6
Temps de réverbération (s)	1,7	1,5	1,3	1,2	1,1	1	0,9
Aire d'absorption équivalente (m ²)	14,6	16,5	19,1	20,7	22,5	24,8	27,5
Lp soufflage point central salle (dB)	52,0	34,9	25,0	18,3	13,9	11,9	9,2
Lp reprise point central salle (dB)	51,4	35,7	25,1	17,9	13,5	11,2	7,8
Lp total (soufflage + reprise) point central salle (dB)	54,7	38,3	28,1	21,1	16,7	14,6	11,6
Pondération A (dB _A)	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1,0
Lp total (dB _A)	28,5	22,2	19,5	17,9	16,7	15,8	12,6

Le tracé du spectre acoustique sur les courbes ISO, indique un critère NR 25, et un niveau global de 30 dB(A), ce qui est conforme aux critères acoustiques demandés dans le CCTP.

<p style="text-align: center;">RAPPORT DE JURY Epreuve portant sur l'ingénierie de projet Option B : Equipements et Energies</p>

Partie 1

Les candidats ont, pour la plupart d'entre eux, une connaissance de la démarche HQE. Mais, de nombreuses réponses se limitent à évoquer les aspects d'économie d'énergie et les contraintes environnementales, sans aborder la nécessité de créer un environnement intérieur sain et confortable.

La comparaison technico-économique des deux solutions proposées a été assez bien traitée par la majorité des candidats. Néanmoins, de nombreux candidats limitent leur analyse à certains critères, comme les aspects économiques (investissement et coût d'exploitation), sans aborder l'impact environnemental (émission de gaz à effet de serre), la maintenance, la sécurité, ou les contraintes liées au forage des thermofrigopompes.

La qualité graphique des schémas est dans l'ensemble décevante. Le jury attend un autre niveau, avec au moins le respect des symboles normalisés et l'utilisation de matériel de dessin.

Seuls quelques candidats ont respecté le CCTP, qui précisait le fonctionnement des thermofrigopompes. Beaucoup de candidats n'en connaissent pas le principe de fonctionnement. Les raccordements hydrauliques présentés sont souvent incohérents (absence de pompes, raccordement évaporateur et condenseur en série, ...).

Partie 2

Question 1 :

Très peu de candidats ont répondu correctement à cette question. De nombreuses confusions sont faites entre les puissances indiquées par le document constructeur à l'évaporateur et au condenseur. Cela montre que beaucoup de candidats n'ont pas vraiment compris le principe de fonctionnement des TFP.

La détermination des paliers de pression P_0 et P_k a été globalement bien traitée avec des pincements de fonctionnement cohérents sur l'évaporateur et le condenseur.

Le tracé du cycle sans le diagramme enthalpique, uniquement avec les tables thermodynamiques, a posé beaucoup de difficultés à certains candidats. Seul, 1/3 des copies comportent des calculs cohérents en regard des hypothèses posées.

Question 2 :

La majorité des candidats n'a pas bien analysé le fonctionnement du système, car en été une seule TFP suffit, alors qu'en hiver deux TFP sont nécessaires pour couvrir les besoins. De nombreuses erreurs sont relevées au niveau du débit primaire des échangeurs (pourtant indiqués dans le CCTP). Les mauvaises hypothèses de dimensionnement faites par les candidats montrent là encore une analyse insuffisante du fonctionnement de cette installation.

Question 3 :

Seul, 1/3 des candidats ont traité le problème en considérant un circuit ouvert, donc en intégrant la hauteur géométrique à vaincre. La pression minimum requise en aval de l'échangeur de 1,5 bar était un paramètre très important dans la sélection des pompes de captage. De nombreux candidats n'ont pas su intégrer cette donnée dans leur dimensionnement.

Partie 3

Cette partie a été très mal traitée par la majorité des candidats. Les candidats ne maîtrisent pas la méthode de détermination des conditions de soufflage à partir des charges enthalpiques et hydriques d'un local.

Le CCTP précisait que l'auditorium comprenait deux zones (salle de spectacle + scène) avec pour chaque zone des techniques de diffusion d'air et des écarts de température différents. De trop nombreux candidats n'ont pas distingué ces deux zones dans leurs calculs.

La qualité graphique des plans et schémas de principe de CTA est très décevante. Beaucoup de candidats ne respectent pas les symboles normalisés. Les tracés sont souvent effectués sans matériel de dessin. Le jury rappelle que l'évaluation des documents graphiques porte aussi sur la qualité et la clarté des tracés. Un schéma de principe doit faire l'objet d'un tracé sur une page entière et pas seulement sur un quart de page.

La partie GTB n'a pas été traitée par de nombreux candidats, alors qu'il suffisait de traduire en une liste de points les fonctions du système données dans le CCTP sous forme d'une analyse fonctionnelle.

Partie 4

Cette partie n'a été traitée que par la moitié des candidats. Les deux premières questions ne demandaient pas de calculs mais de connaître la méthodologie pour la détermination des pièges à sons (PAS) sur les réseaux de ventilation.

Les deux dernières questions n'ont pu être traitées correctement. Les candidats n'ont pas pris en compte les phénomènes de régénération des PAS, et n'ont pas su évaluer le niveau sonore à l'intérieur du local.

ORAL D'ADMISSION

EPREUVE DE DOSSIER

Commentaires du jury

Le jury apprécie les dossiers s'appuyant sur des supports très récents prenant en compte les enjeux actuels de la construction (bâtiments ou ouvrages d'art) tant dans les domaines des matériaux, des techniques de construction, de la performance énergétique de l'enveloppe et des systèmes, et du développement durable.

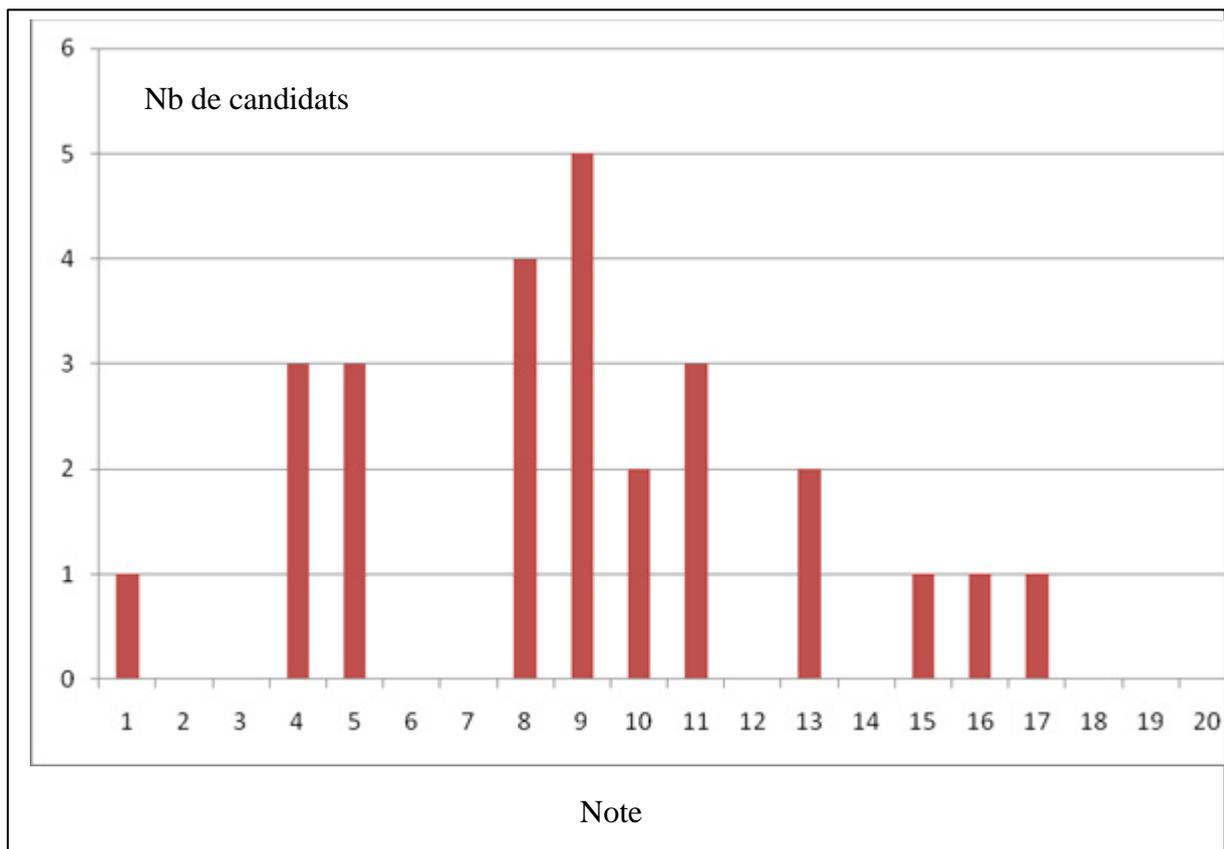
Il ne devrait pas être nécessaire de préciser que pour réussir dans cette épreuve, les candidats doivent débiter la conception du dossier dès l'inscription au concours.

Toutefois le jury a noté, tant sur le fond que sur la forme, un certain nombre d'insuffisances :

- des dossiers récents, sans originalité ni spécificité, dont il est quasi impossible d'extraire des études pertinentes ou d'effectuer des exploitations pédagogiques attractives,
- une exploitation scientifique et technique d'un niveau souvent largement insuffisant, se limitant par exemple à des vérifications réglementaires, des copies de notes de calcul impersonnelles,
- des dossiers identiques aux années précédentes avec les mêmes études et pour lesquels les candidats n'ont tenu aucun compte des observations du jury,
- 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 hypothèses nécessaires à la mise en œuvre d'outils de calculs informatiques souvent inexistantes ou pas suffisamment explicites,
- une mauvaise utilisation du temps d'exposé ; il ne s'agit en aucun de faire un cours au jury (réglementation...),
- des dossiers conçus très tardivement et donc sans consistance,
- des modèles numériques se limitant au savoir faire du candidat vis-à-vis d'un logiciel, sans analyse critique et physique des problèmes modélisés et des résultats obtenus, et sans calage minimal sur des calculs analytiques simplifiés,
- des propositions de variantes constructives ne correspondant pas à la réalité industrielle,
- une orthographe inacceptable à ce niveau, tant dans les rapports que dans les supports de présentation orale.

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 de l'analyse du cycle de vie. Ces différents points, lorsqu'ils sont évoqués, sont souvent traités de façon superficielle ou artificielle, et manquent de pertinence et d'ancrage dans le projet traité.



Histogramme des notes obtenues par les candidats

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.

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 qu'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 ;

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.

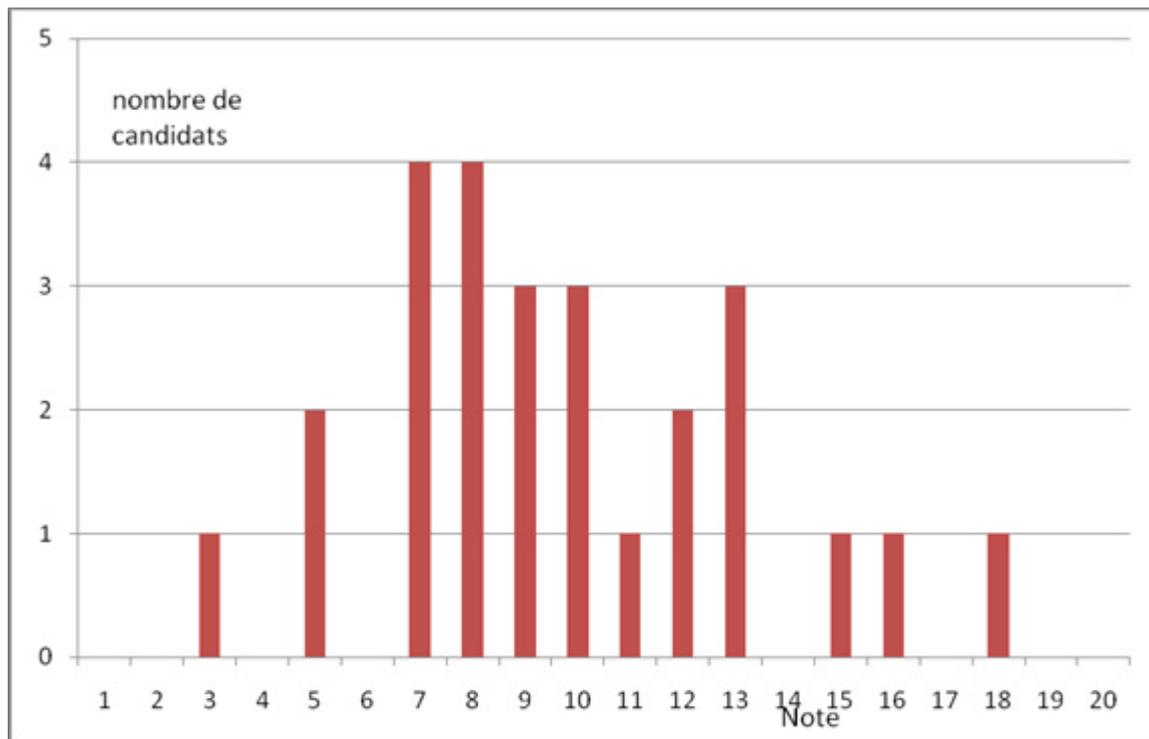
Il met parfois en évidence l'absence ou le défaut de maîtrise de certains points énoncés comme des évidences lors de l'exposé. Certains candidats ont à l'inverse développé leur propos de manière très satisfaisante, corrigeant le manque de confiance dans l'exposé initial (situation bien compréhensible en cette occasion). Le jury peut éventuellement questionner sur des sujets qui se situent à la marge de celui de la leçon pour évaluer leur culture scientifique et technologique.

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. L'attitude passive et consentante n'est pas non plus celle attendue d'un futur enseignant.

4- BILAN

Nombre de candidats présents : 26

Notes des candidats :



Agrégation de génie civil

Concours externe

Session 2010

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

Pressiomètre Ménard
Pénétrromètre dynamique léger PANDA
Compacteur Proctor
Machine de cisaillement à la boîte
Presse Triaxiale
Oedomètre
Matériel pour limites d'Atterberg
Matériel pour étude d'un arrangement granulaire
Matériel pour étude de prise et consistance des
Matériel pour mesure de la classe vraie d'un ciment
Presses à Béton
Matériel pour étude des granulats et des sols
Matériel pour essais non destructifs sur béton
Matériel pour mesure des caractéristiques physiques et
Machine de traction sur acier pour béton (200kN)
Banc d'essai de poutres en béton armé
Matériel pour coffrage d'un plancher
Matériel pour coffrage d'une poutre
Banc pour flexion simple sur
Banc pour flexion composée
Poutre cantilever
Poutre hyperstatique
Presse pour étude de la compression simple
Presse pour étude de la traction
Tachéomètre et niveau

Option B : équipements et énergies

Sonomètre, source de bruit
Banc d'étude des pertes de charges
Banc d'étude pour équilibrage d'un réseau de
Banc d'étude de protection électrique dans le bâtiment
Banc d'étude d'un système photo-voltaïque

Eclairage artificiel
Calorimétrie
Pompe à chaleur eau/eau
Banc d'étude d'échange de chaleur
Banc d'étude de traitement de l'air

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.**

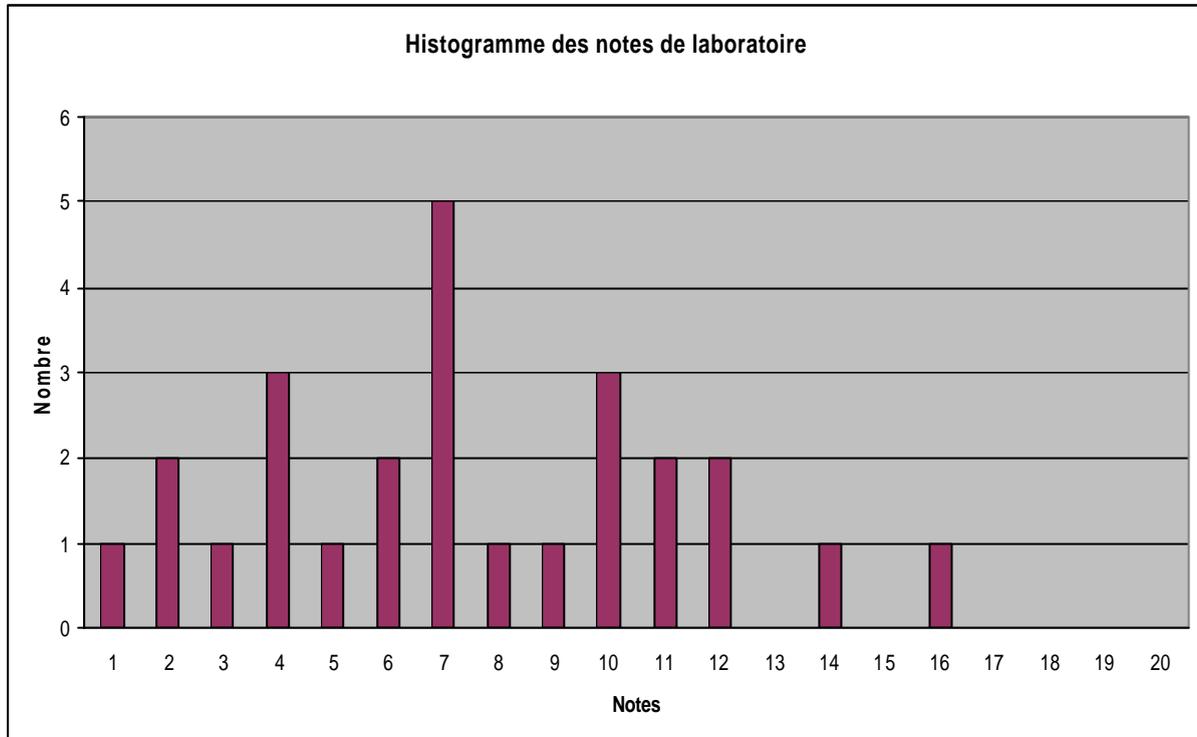
Le jury prend en compte dans l'évaluation le choix de l'expérimentation par le candidat en fonction du sujet proposé (ce choix conditionne le niveau scientifique et technique).

Les candidats n'ont pas toujours répondu aux attentes du jury :

- Il faut bien définir l'objectif de l'expérimentation en introduction et la mise en situation réelle de l'expérimentation.
- Pour cette session, le jury note une mauvaise gestion du temps pour certains candidats qui présentent des exposés trop courts et n'exploitent pas les 45 minutes accordées. 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 déconseillé de détailler les différents éléments de base car les candidats s'adressent à un jury d'experts et non à des élèves.**
- **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).
- Une majorité de candidats effectue une exploitation très limitée des potentialités scientifiques des supports didactiques proposés.

- Le jury regrette que généralement les résultats de mesures et la comparaison aux modèles théoriques ne soient pas assez développés.
- Beaucoup de candidat n'ont pas eu la rigueur suffisante dans les manipulations.

3.3 - BILAN



Nombre de candidats présents : 26