

Concours du second degré – Rapport de jury

Session 2011

CONCOURS D'ACCES AU CORPS DES PROFESSEURS AGRÉGÉS

Concours Externe

Section GENIE 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 2011

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

Frédéric BOS, Professeur des Universités, IUT Bordeaux 1
Jean CANOU, Maître de Conférences, ENPC, Marne la Vallée.
Géraldine CASAUX-GINESTET, Maître de conférences, UPS Toulouse.
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
Frédéric KUZNIK, Maître de conférences, INSA Lyon.
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 Directeur de recherches au LCPC de Bouguenais
Yvon RIOU Maître de conférences à l'Ecole Centrale de Nantes
Thierry SEDRAN, Chargé de recherches, IFFSTAR, Nantes.

SOMMAIRE

Présentation générale

ADMISSIBILITE

EPREUVE 1 : Modélisation des matériaux et des ouvrages,

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

EPREUVE 2 : Mécanique des sols et qualité des ambiances

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

EPREUVE 3 : Projet A

- Eléments de correction et rapport du jury

EPREUVE 3 : Projet B

- Eléments de correction et rapport du jury

ADMISSION

EPREUVE DE DOSSIER

- Rapport du jury

EPREUVE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

- Rapport du jury

EPREUVE DE LABORATOIRE

- Rapport du jury

Présentation générale

Il s'agit d'un concours sélectionnant des candidats ayant 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 2011 comme en 2010 et 2009, ils ont tous été pourvus. 106 candidats (55 en 2010) ont composé au moins une épreuve. 30 candidats ont été déclarés admissibles, la moyenne des épreuves écrites des candidats admissibles est de 9,55/20 (8,60/20 en 2010, 8,43 en 2009, 8,18 en 2008), le dernier admissible a obtenu 7,05/20 (5,94/20 en 2010 ; 4,67/20 en 2009).

La moyenne des épreuves d'admission obtenues par les 29 candidats présents est de 9,55/20 (8,79/20 en 2010 ; 8,99 en 2009), celle des 13 candidats admis est de 11,96/20 (11,35/20 en 2010 et 11,81 en 2009).

La moyenne obtenue aux épreuves écrites et orales du concours de l'agrégation par les 29 candidats présents est de 9,33/20 (8,41/20 en 2010 ; 8,70 en 2009), celle des 13 admis de 11,44/20 (10,64/20 en 2010 ; 11,14 en 2009).

D'une manière générale, en 2011 les candidats n'ont pas traité une partie des épreuves écrites. Pour la session 2012, 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).

Concernant les épreuves orales, **beaucoup de candidats n'ont pas pris en compte les consignes des rapports du jury**. Les candidats de la session 2012 sont particulièrement invités à considérer les rapports de jury pour leur préparation.

Le Président de jury,

Christophe PETIT,

Epreuve de modélisation des matériaux et des ouvrages

Sujet matériaux et patrimoine

Eléments de corrigé

Partie A

On cherche à étudier, suivant des critères structurel et environnemental, un plancher dont la solution de base est composée de poutres en bois lamellé collé sur lesquelles repose, sans connexion, une dalle de béton (Figure A1). L'étude porte sur une bande de largeur 1 m de ce plancher, constituant une poutre mixte, comme indiquée sur la figure A2. Les nouvelles solutions étudiées sont fondées sur le principe du collage du béton au bois dans le but de réaliser une poutre mixte bois-béton, constituée d'une partie rectangulaire en bois lamellé collé de hauteur h_w et de largeur b_w , à laquelle est connectée en partie supérieure une plaque en béton armé de largeur b_c et d'épaisseur h_c . Le plancher est alors constitué par la juxtaposition de ces poutres mixtes, solidarisées entre elles en seconde phase. Le collage structurel permet de réduire l'épaisseur de plancher pour une inertie en flexion donnée.

On s'intéresse dans ce problème à l'évaluation de certaines propriétés des différentes poutres mixtes de ce plancher, obtenues à partir d'une famille de bétons donnés dans le tableau A1.

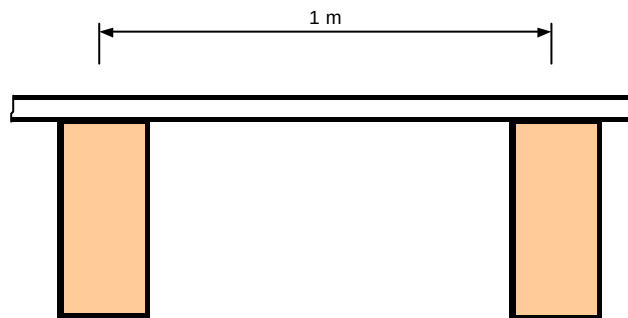


Figure A1. Plancher constitué d'une dalle béton reposant sur des poutres en bois lamellé collé

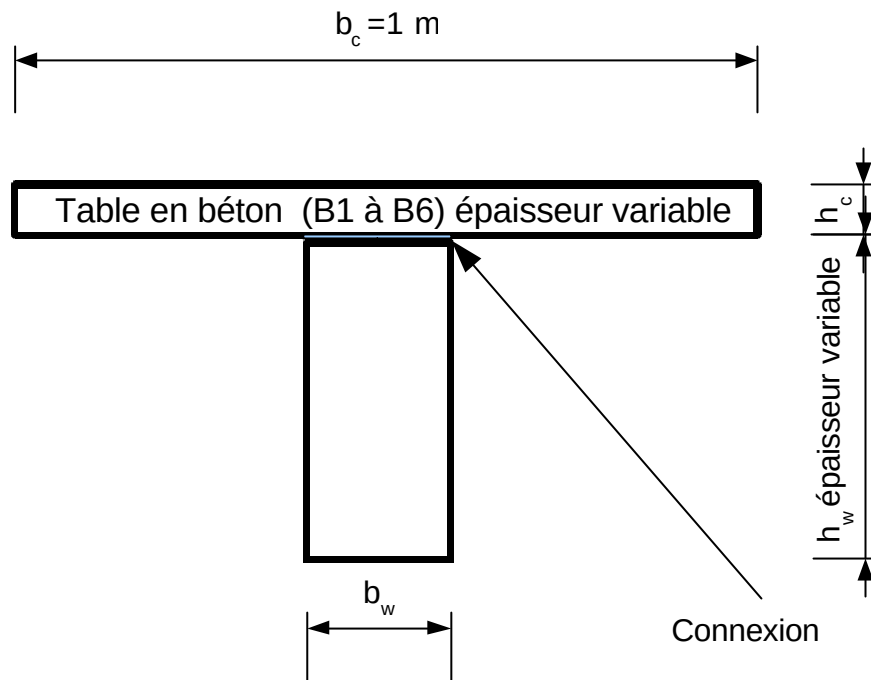


Figure A2. Élément de l'étude

A1. Quel est le paramètre principal qui pilote la résistance des bétons pour un jeu de constituants donné ?

Réponse

Le rapport e/c est le paramètre principal qui pilote la résistance pour des constituants donnés, autrement dit pour un ciment fixé. Les lois de résistance de type loi de Férét ou de Bolomey en tiennent compte.

A2. En déduire la raison qui conduit généralement le formulateur à augmenter le dosage en ciment du béton quand il cherche à en augmenter la résistance, pour une consistance donnée, comme l'indique le tableau A1.

Réponse

On cherche à diminuer e/c pour augmenter la résistance mais tout en préservant la quantité d'eau pour garder la consistance. Il en résulte que le dosage en ciment doit augmenter.

A3. L'assemblage du béton et du bois s'effectue grâce à un collage structural. Précisez les caractéristiques principales que la colle doit respecter au regard des performances attendues de l'assemblage. Citez une nature de colle appropriée répondant à ces exigences.

Réponse

Le collage doit d'abord être efficace du point de vue mécanique. Sa résistance en cisaillement doit être supérieure à la résistance en cisaillement des 2 matériaux, c'est-à-dire supérieure à 5 MPa. La colle doit être compatible avec le bois et le béton et sa durabilité du collage doit être assurée, compte tenu de possibles variations dimensionnelles des 2 matériaux. D'autres propriétés liées à la mise en œuvre sont aussi à exprimer. La consistance de la colle doit par exemple être adaptée à la méthode de mise en œuvre. Un comportement thixotrope peut être

un avantage pour son maintien en épaisseur constante pendant la pose. La durée pratique d'utilisation, la vitesse de durcissement, etc., sont d'autres propriétés à maîtriser.

Une colle de type époxy est une solution adaptée, du fait des preuves de résistance qu'elle a montré pour l'assemblage du bois (bateau en bois-époxy) et pour le béton (renforcement structurel des ouvrages par des composites collés à l'époxy). De plus certaines colles commerciales bénéficient de la marque NF collage structurel, ce qui constitue un indice supplémentaire de fiabilité.

A4. Des essais ont montré que la résistance de l'assemblage collé n'est satisfaisante qu'après avoir attendu 4 semaines de maturation du béton (de classe C80 pour les essais en question) avant la réalisation de l'opération de collage. Donner une explication à cette condition en étayant votre réponse. Ce délai est-il susceptible d'évoluer si la résistance du béton varie ?

Réponse

On doit attendre que le retrait soit majoritairement effectué avant le collage afin de diminuer la création d'auto-contraintes de cisaillement ultérieures. Le retrait visé ici est le retrait endogène, considéré comme prépondérant pour les BHP. Comme le retrait endogène évolue rapidement au jeune âge, l'attente de 4 semaines constitue un bon compromis. Si la résistance du béton augmente, le délai peut diminuer, mais si elle diminue, le retrait de dessiccation ne sera plus négligeable et le temps d'attente sera alors plus long.

A5. Afin que le béton ne soit sollicité qu'en compression, on pose comme condition que la fibre neutre de la poutre mixte se situe à l'interface des 2 matériaux. En posant $n = b_c E_c / b_w E_w$, montrer alors que l'expression du rapport m , de la hauteur de la poutre en bois à l'épaisseur de la plaque de béton, est telle que : $m = h_w / h_c = \sqrt{n}$

Réponse

On écrit que le moment statique est nul, ce qui revient à :

$$\frac{E_c b_c h_c^2}{2} = \frac{E_w b_w h_w^2}{2}$$

autrement dit :

$$m = \frac{h_w}{h_c} = \sqrt{\frac{E_c b_c}{E_w b_w}} = \sqrt{n}$$

A6. On s'intéresse au calcul des dimensions des différentes solutions de plancher mixtes bois-béton, obtenues pour les différents bétons du tableau A1,. Calculer, pour les différents bétons du tableau A1, les valeurs numériques de n et m des différentes poutres mixtes ainsi obtenues. Renseigner le tableau A2 avec ces valeurs. On prendra pour cela $E_w = 11600 \text{ MPa}$,

Réponse

Valeurs obtenues directement visibles dans le tableau A2

A7. Calculer les valeurs des hauteurs h_c , h_w et $h_t = h_c + h_w$ ainsi que le poids linéique pour les différents bétons en considérant que $b_c/b_w = 5$ et en posant comme condition que ces solutions ont la même raideur en flexion $(EI)_{ef}$ que la solution de base $(EI)_{ef} = 16 \text{ MN.m}^2$. Remplir le tableau A2 après avoir explicité le calcul et commenter les résultats obtenus. Le poids

volumique du béton armé sera pris à 25 kN/m^3 et celui du bois à 5 kN/m^3 . On pourra se servir de l'expression suivante de la raideur en flexion des poutres mixtes collées lorsque la fibre neutre est placée à l'interface des 2 matériaux : $(EI)_{ef} = (h_w^3 + nh_c^3) \frac{b_w E_w}{3}$

Réponse

$$b_w = 1/5 = 0,2 \text{ m}$$

$$(EI)_{ef} = h_w^3 \left(1 + \frac{n}{m^3} \right) \frac{b_w E_w}{3}$$

$$h_w = \sqrt[3]{\frac{3(EI)_{ef}}{b_w E_w \left(1 + \frac{n}{m^3} \right)}}$$

$$h_c = \frac{h_w}{\sqrt{n}} \text{ d'après question A5}$$

D'où les valeurs du tableau A2

A8. On s'intéresse pour la phase de production des matériaux au calcul de la consommation énergétique, qu'on nomme l'indicateur énergétique, pour la réalisation d'une poutre mixte. Les impacts de la colle sont ici négligés. L'énergie liée à la production du bois lamellé collé est $W_w = 19000 \text{ MJ/m}^3$. Le terme W_w désigne l'énergie totale dépensée à la fabrication du lamellé collé. L'énergie W_{rc} de production du béton armé est donnée dans le tableau A1.

Calculer pour un mètre de longueur de chaque poutre mixte l'indicateur énergétique. Renseigner le tableau A2 après avoir expliciter le calcul.

Réponse

$$W_t = h_c \cdot 1 \cdot W_{rc} + h_w b_w W_w$$

Valeurs dans le tableau A2

A9. On s'intéresse pour la phase de production des matériaux au calcul du potentiel de réchauffement climatique (PRC), exprimé en émission équivalente de gaz carbonique. Les impacts de la colle sont ici négligés. L'impact PRC lié à la production du bois lamellé collé est $M_{wCO_2} = -448 \text{ kg/m}^3$. Le PRC du béton armé est fourni dans le tableau A1.

Calculer le PRC pour un mètre de longueur de chaque poutre mixte et renseigner le tableau A2.

Réponse

$$M_{tCO_2} = h_c \cdot 1 \cdot M_{rcCO_2} + h_w b_w M_{wCO_2}$$

Résultats dans tableau A2

A10. Comparer et commenter les impacts des différentes solutions entre elles et avec la solution de base. Si l'on considère que la recherche d'un plancher d'épaisseur minimale constitue un objectif structurel, existe-t-il une solution optimale, satisfaisant à la fois aux

objectifs structurel et environnementaux ? On fait l'hypothèse que toutes les solutions satisfont par ailleurs aux vérifications des états limites ultimes.

Réponse

Pour les solutions mixtes, la hauteur totale du plancher varie peu en fonction de la résistance du béton. Le poids diminue de 16% pour la solution PB6 par rapport à PB1. On peut conclure que les performances structurelles varient dans une faible marge. Sur le plan des indicateurs d'impact, on s'aperçoit que solution PB1 est la meilleure. Un écart faible de 9% est constaté par rapport à PB6 sur l'indicateur énergétique, tandis que PB1 a un PRC négatif. La comparaison des solutions mixtes permettent de conclure au choix d'un béton de résistance faible pour l'application envisagée.

La solution de base est quant à elle pénalisée tant sur le plan structurel (poids et hauteur totale) que sur les indicateurs environnementaux. Cette conclusion est évidemment à relativiser du fait que les impacts de la colle ont été négligés, mais les calculs montrent que l'écart entre les solutions est pratiquement conservé quand on tient compte des impacts de la colle.

A11. La recherche d'un compromis a conduit au choix de la solution PB3. Le marché potentiel de cette solution représente une surface annuelle de 5000 m² de plancher. On désire comparer les impacts PRC et énergie de la solution par rapport à ceux d'un européen moyen, tels qu'ils sont indiqués dans le tableau A3. A partir de cette comparaison, préciser lequel des 2 impacts calculés est jugé prépondérant. Les conclusions sont elles les mêmes pour la solution de base ?

Réponse

On s'aperçoit en faisant le rapport des 2 indicateurs d'impact avec ceux d'un citoyen européen que l'indicateur Energétique est prépondérant, puisqu'il représente 57 fois celui d'un citoyen européen, contre 0,45 pour le PRC. Une recherche d'amélioration des solutions pourraient judicieusement être orientées vers une diminution de cet impact en particulier. Il en est de même pour la solution de base.

Pour 5000 m ² de plancher	PB3	SB	Rapport de l'impact PB3 avec celui d'un citoyen européen	Rapport de l'impact SB avec celui d'un citoyen européen
PRC (kg CO ₂)	4533	24016	0,45	2,4
Energie (MJ)	5,7 10 ⁶	9,9 10 ⁶	57	99

A12. Proposer en le justifiant un autre impact environnemental qui vous semble approprié au problème étudié.

Réponse

L'impact lié à l'épuisement des ressources en masse équivalente d'antimoine, au sens de la norme NFP 01 010 peut être intéressant du fait de l'association d'un matériau renouvelable au béton.

Mais d'une manière générale les 10 impacts de la norme NFP 01 010 seraient à prendre en considération.

référence	Dosage en ciment	Résistance en compression moyenne	Module instantané du béton	Potentiel de réchauffement climatique (PRC), acier compris	Indicateur d'impact énergétique acier compris
	c (kg/m ³)	f_c (MPa)	E_c (MPa)	M_{rcCO_2} (kg/m ³)	W_{rc} (MJ/m ³)
B1	300	33	35268	211	1609
B2	350	58	42602	369	2515
B3	400	79	47165	420	2809
B4	450	96	50304	459	3029
B5	500	110	52546	513	3340
B6	550	120	54164	582	3735

Tableau A1. Propriétés théoriques de bétons en fonction de leur dosage en ciment, pour une valeur d'affaissement au cône de 17 cm. Simulations obtenues par un logiciel sur la base de granulats courants siliceux roulés 0/20mm. Les indicateurs d'impact sont donnés pour la phase de production seule du béton armé.

Energie consommée (MJ/an)	Potentiel de réchauffement climatique M_{CO_2} (kg/an)
100 000	10 000

Tableau A3. Impact moyen d'un citoyen européen sur une année.

Tableau réponse B2

	c (kg/m ³)	fc (MPa)	CO2 (kg/m ³)	Energie (MJ)	Ec [MPa]	n=Ec _{bc} /E _{wbw}	m=hw/hc	hw	hc	h	CO2 poutre/m	énergie (MJ/m)	masse (kN/m)
B1	300,0	33	211	1609	35268	15,2	3,9	0,254	0,065	0,320	-9,0	1072	1,9
B2	350,0	58	369	2515	42602	18,4	4,3	0,256	0,060	0,316	-0,9	1123	1,7
B3	400,0	79	420	2809	47165	20,3	4,5	0,257	0,057	0,314	0,9	1136	1,7
B4	450,0	96	459	3029	50304	21,7	4,7	0,257	0,055	0,313	2,3	1145	1,6
B5	500,0	110	513	3340	52546	22,6	4,8	0,258	0,054	0,312	4,7	1160	1,6
B6	550,0	120	582	3735	54164	23,3	4,8	0,258	0,053	0,311	8,0	1179	1,6
SB	350,0	58	369	2515	42602			0,440	0,120	0,560	4,8	1974	3,4

Partie B

Sur un chantier d'accès difficile, il est possible de mettre en œuvre le béton par pompage. On cherche ici à écrire les équations permettant de prédire, pour une géométrie de circuit de pompage et un béton donnés, la pression nécessaire au pompage en fonction du débit souhaité. On pourra alors en déduire la puissance de la pompe nécessaire pour réaliser le chantier.

B1. Soit un circuit de pompage constitué d'un tuyau horizontal de rayon R (en m) et de longueur L (en m) comme indiqué sur la figure B1.

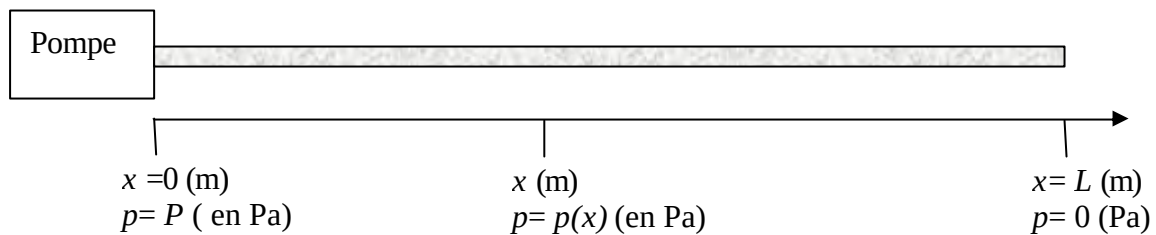


Figure B1 : schéma de principe du circuit de pompage

On applique une pression P (en Pa) au niveau de la pompe. Le béton s'écoule alors en bloc par glissement. Son écoulement est freiné par les contraintes de frottement $t_f(x)$ s'exerçant à l'interface entre le béton et le tuyau, comme l'indique la figure B2.

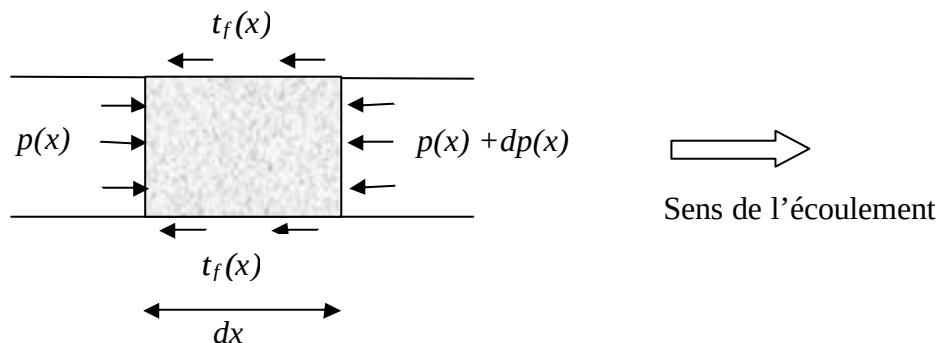


Figure B2 : équilibre d'un élément de béton dans le tuyau

En écrivant l'équilibre d'un tronçon unitaire de béton, exprimer la dérivée de la pression $dp(x)/dx$ (en Pa/m) en fonction de $t_f(x)$ et R .

Réponse

$$\frac{dp(x)}{dx} = -2 \frac{t_f(x)}{R}$$

B2. On procède à la mesure de la pression en différents endroits d'un circuit de pompage horizontal de 140 m de longueur, pour différents débits de pompage. Les résultats obtenus sont résumés dans la figure B3.

Que concluez-vous sur la dépendance de la contrainte de frottement $t_f(x)$ entre le béton et le tuyau vis-à-vis de la pression et de la vitesse de glissement du béton ? Justifiez votre réponse.

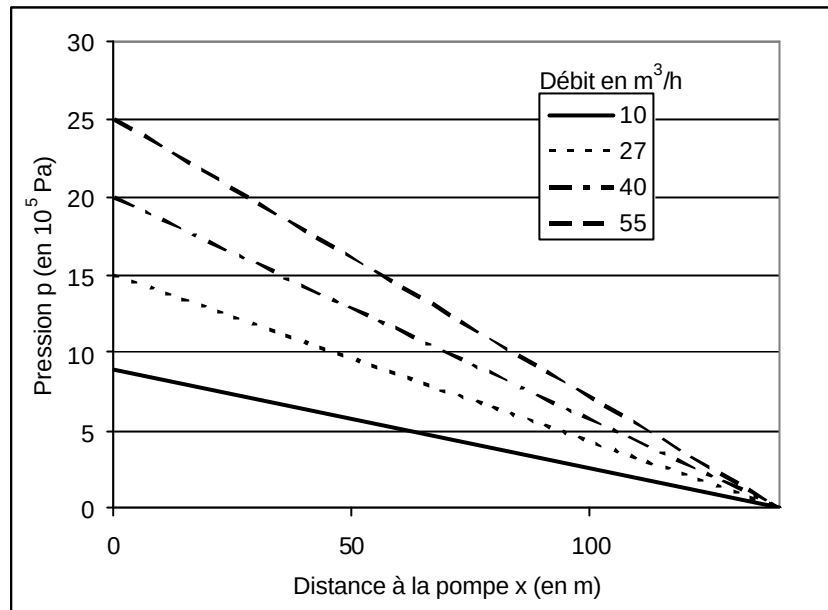


Figure B3 : profils de pression dans le circuit de pompage pour différents débits

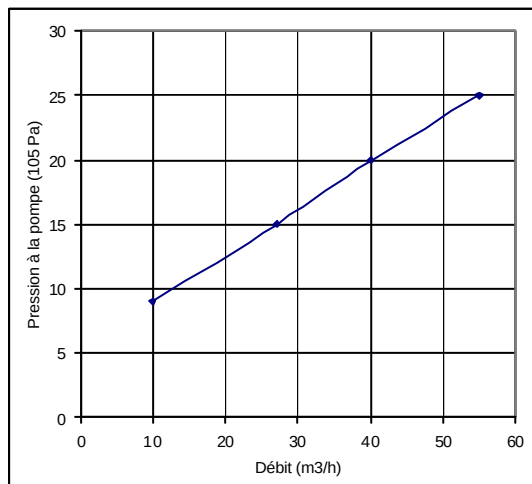
Réponse

Pour un débit donné, $\delta p(x)/\delta x$ est constant, donc la contrainte de frottement τ_f ne dépend pas de la pression. Par contre $\delta p(x)/\delta x$ évolue quand le débit du béton augmente, donc τ_f dépend de la vitesse de glissement.

B3. Quel type de relation observe-t-on entre la pression à la pompe P (c'est-à-dire $p(0)$) et le débit Q ? Pour étayer votre réponse vous pouvez vous aider du graphe vierge mis à votre disposition.

Réponse

En reportant les valeurs de pression à la pompe en fonction du débit on obtient une relation linéaire.



B4. On peut évaluer en laboratoire le frottement d'un béton avec un tuyau à l'aide d'un tribomètre à cylindres coaxiaux. Le principe de cet appareil est le suivant :

- le béton est placé dans une gamelle cylindrique fixe équipée en son centre d'un cylindre mobile motorisé équipé d'un couplemètre et d'un compte-tours (voir figure B4). Le cylindre intérieur est composé du même matériau que le tuyau sur le circuit de pompage.
- on impose au cylindre intérieur différents paliers de vitesses de rotation et on mesure les couples de frottement entre le béton et le cylindre intérieur correspondants à chaque palier.

On obtient alors une courbe de la forme $C = C_0 + A.N$ où

- C est le couple imposé au cylindre intérieur (en N.m)
- N le nombre de tours par seconde (en 1/s)
- C_0 et A des constantes

En faisant l'hypothèse que le béton reste immobile dans la gamelle en cours d'essai, on en déduit l'expression de la contrainte de frottement t_f (en Pa) entre le béton et le cylindre intérieur, en fonction de la vitesse de glissement V_g (en m/s) du béton par rapport au cylindre intérieur, sous la forme :

$$t_f = t_{0i} + hV_g$$

où

- t_{0i} est le seuil d'interface (en Pa)
- h est la constante d'interface (en Pa.s/m)

En vous appuyant sur la question précédente, expliquez en quoi cet essai réalisé sous pression atmosphérique est pertinent pour étudier le pompage du béton.

Exprimez t_{0i} et h en fonction de C_0 , A et des dimensions de l'appareil.

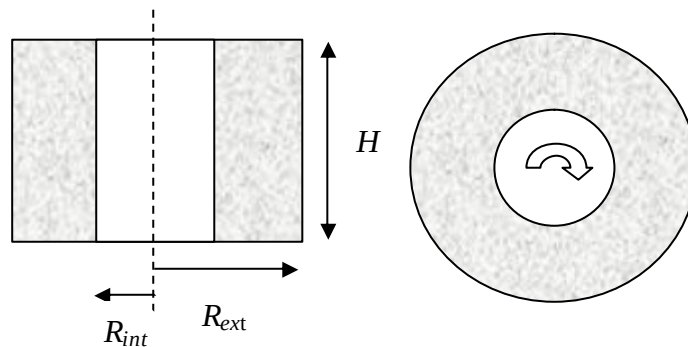


Figure B4 : Vues de côté et de dessus du tribomètre

Réponse

On a montré que la contrainte de frottement ne dépend pas de la pression mais de la vitesse de glissement. Faire des essais à la pression atmosphérique permet donc d'évaluer les frottements dans le tuyau.

$$t_{0i} = \frac{C_0}{2p R_{int}^2 H} \text{ et } h = \frac{A}{(2p)^2 R_{int}^3 H}$$

B5. En vous appuyant sur les questions B1 et B2, exprimez la pression à la pompe P (en Pa) pour un débit donné, en fonction de la contrainte de frottement t_f et de la géométrie du circuit.

Réponse

D'après B1 on a $\frac{dp(x)}{dx} = -2 \frac{t_f(x)}{R}$

D'après B2 on a $t_f(x) = t_f$, constant pour un débit donné.

$p(L)=0$ et $p(0)=P$

Donc $P = 2 \frac{L}{R} t_f$

B6. En déduire que l'on peut exprimer la pression à la pompe P (en Pa) en fonction du débit de pompage Q (en m^3/s) sous la forme suivante :

$P = P_0 + k.Q$ où

- P_0 est une constante (en Pa)
- k est une constante (en Pa.s/m^3)

Exprimez les constantes P_0 et k en fonction de la géométrie du tuyau horizontal et des propriétés d'interface t_{oi} et h du béton.

Réponse

$$P = 2 \frac{L}{R} (t_{oi} + h V_g) = 2 \frac{L}{R} \left(t_{oi} + h \frac{Q}{p R^2} \right)$$

B7. Sachant qu'en moyenne le béton a une densité de 2,4, que devient l'expression de la pression si le tuyau n'est plus horizontal mais que sa sortie se trouve à une hauteur H (en m) au dessus de la pompe ?

On fera l'hypothèse ici que l'accélération terrestre est égale à $g = 10 \text{ m/s}^2$.

Réponse

On retrouve la même équation qu'en B6 sauf qu'il faut ajouter la pression hydrostatique du béton.

On a donc $P = 2 \frac{L}{R} \left(t_{oi} + h \frac{Q}{p R^2} \right) + 2,4 H 10^4$ (en Pa)

L est la longueur totale du circuit (segment horizontal et vertical)

B8. On réalise un chantier pour lequel la mise en œuvre du béton se fait par pompage. Le circuit de pompage est le suivant : diamètre du tuyau 125 mm, hauteur de pompage 200 m, distance horizontale 100 m.

La centrale à béton fournissant le chantier dispose dans son catalogue de deux formulations de béton à hautes performances ayant la même résistance mécanique. L'une d'entre elles contient de la fumée de silice. Le tableau B1 résume les propriétés de ces deux bétons.

Constituants		BHP-C	BHP-FS
Gravillon 10/20 (kg/m ³)		733	693
Gravillon 4/10 (kg/m ³)		114	180
Sable 0/4 (kg/m ³)		754	673
Sablon 0/0,63 (kg/m ³)		91	225
Ciment CEM I (kg/m ³)		590	430
Fumée de silice (kg/m ³)		-	43
Superplastifiant (kg/m ³)		8,85	13,2
Retardateur (kg/m ³)		2,95	2,15
Eau totale (l/m ³)		172	179
Etalement (cm)		75	64
Masse volumique kg/m ³		2466	2438
Données de tribologie	Seuil d'interface t_{oi} (Pa)	60	50
	Constante visqueuse d'interface h (Pa.s/m)	1 400	900

Tableau B1 : propriétés des BHP disponibles à la centrale à béton

Quelle est la formule *a priori* la plus facilement pompable (c'est-à-dire celle nécessitant le moins de puissance de pompage) ? Justifiez votre réponse.

Réponse

La formule avec la fumée de silice a des propriétés tribologiques plus faibles. Elle frotera moins. Elle nécessitera une pression de pompage plus faible.

B9. La pompe utilisée sur le chantier est une pompe à pistons dont le volume est de 66 litres. Le pompiste peut suivre le débit de pompage en comptant le nombre de coups de piston par minute. Il peut également lire sur un manomètre la pression dans le circuit hydraulique de la pompe. Cette pression hydraulique est égale à 1,8 fois la pression sur le béton à la sortie de la pompe.

C'est finalement la formule à base de fumée de silice BHP-FS qui est sélectionnée pour le chantier. Après quelques jours de coulage sans problème, le béton devient soudain plus difficile à pomper. Pour comprendre ce qu'il se passe, le pompiste fait alors des mesures de pression pour deux débits de pompage. Celles-ci sont données dans le tableau B2.

Mesure N°	1	2
Débit de pompage (coups/min)	6,0	10,7
Pression hydraulique lue sur le manomètre (bars)	225	311

Tableau B2 : données de pompage

En faisant attention aux unités, en déduire les propriétés de frottement du béton pompé. Peut-on expliquer les difficultés de pompage par une erreur de livraison de la centrale à béton ?

Deux expériences :

$$P_1 = 2 \frac{L}{R} \left(t_{0i} + h \frac{Q_1}{p R^2} \right) + 2,438 H 10^4$$

$$P_2 = 2 \frac{L}{R} \left(t_{0i} + h \frac{Q_2}{p R^2} \right) + 2,438 H 10^4$$

On a donc

$$h = \frac{(P_2 - P_1)}{2L(Q_2 - Q_1)} p R^3$$

$$t_{0i} = (P_1 - 2,438 H 10^4) \frac{R}{2L} - h \frac{Q_1}{p R^2}$$

AN :

$$R = 0.0625 \text{ m}$$

$$P_1 = 225 / 1,8 \cdot 10^5 = 125 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_2 = 311 / 1,8 \cdot 10^5 = 172,7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$Q_1 = 6 \cdot 66 / 60 / 1000 = 0.0066 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_2 = 10 \cdot 66 / 60 / 1000 = 0.011 \text{ m}^3/\text{s}$$

On trouve

$$h = 1388 \text{ Pa.s / m}$$

$$t_{0i} = 48 \text{ Pa}$$

Ces résultats sont proches de la formule sans fumée de silice. Il y a probablement eu confusion de formule à la centrale.

B10. Le béton à l'état frais peut être considéré comme un matériau de Bingham dont la loi d'écoulement s'écrit sous la forme suivante :

$$t = t_0 + \mu \cdot \dot{g}$$

avec

- t contrainte de cisaillement (en Pa)
- t_0 seuil de cisaillement (en Pa)
- μ viscosité plastique (en Pa.s)
- $\dot{g}$ gradient de vitesse (en 1/s)

Lors du pompage et lorsque la vitesse de glissement entre le tuyau et le béton devient importante, la contrainte de frottement t_f devient suffisamment grande pour qu'un cisaillement se propage dans le béton. Le profil de vitesse d'écoulement s'en trouve modifié comme indiqué sur la figure B5.

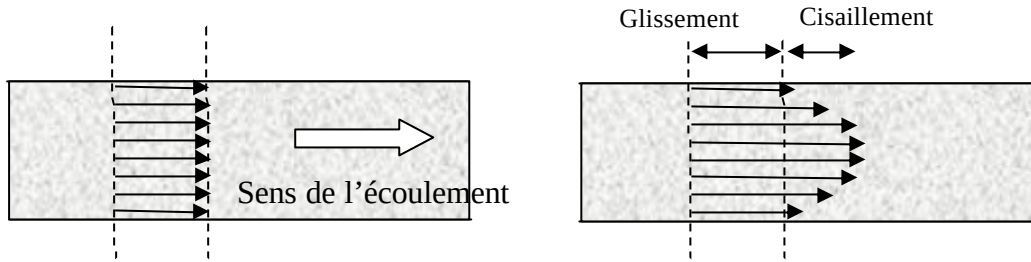


Figure B5 : profil de vitesses d'écoulement, avec glissement seul (à gauche), avec glissement et cisaillement (à droite)

B11. Déterminez la vitesse de glissement V_{g0} à partir de laquelle le béton se cisaille, en fonction de t_0 , t_{0i} et h .

Réponse :

Le cisaillement se propage dans le béton à partir du moment où

$$t_f \geq t_0$$

soit

$$t_{0i} + hV_g \geq t_0$$

soit

$$V_g \geq V_{g0} = \frac{t_0 - t_{0i}}{h}$$

B12. Au delà de cette vitesse V_{g0} , le débit total Q est la somme d'un débit par glissement Q_g et d'un débit par cisaillement Q_c (voir figure B5).

On admet que l'équation suivante, dérivée de l'équation de Buckingham-Reiner, donne le débit de cisaillement :

$$Q_c = -\frac{pR^4}{8m} \frac{dp(x)}{dx} \left(1 - \frac{4}{3} \left(-\frac{dx}{dp(x)} \frac{2t_0}{R} \right) \right), dp(x)/dx \text{ étant négatif}$$

Déterminer l'expression de la vitesse de glissement en fonction du débit Q , du rayon du tuyau et des propriétés rhéologiques t_0 et μ et tribologiques t_{0i} et h du béton.

En injectant cette valeur de vitesse dans l'expression de t_f et dans l'équation déterminée à la question B5, en déduire l'expression de la pression de pompage P (en Pa) en fonction de Q , de la géométrie du tuyau et des propriétés rhéologiques t_0 et μ et tribologiques t_{0i} et h du béton pour un tuyau horizontal.

Dans ces conditions on a alors :

$$Q = Q_g + Q_c$$

$$Q = \frac{V_g}{pR^2} - \frac{pR^4}{8m} \frac{dp(x)}{dx} \left(1 - \frac{4}{3} \left(-\frac{dx}{dp(x)} \frac{2t_0}{R} \right) \right)$$

or

$$\frac{dp(x)}{dx} = -2 \frac{t_f}{R} = -\frac{2}{R} (t_{0i} + h V_g)$$

donc

$$Q = \frac{V_g}{pR^2} + \frac{pR^4}{8m} \left(\frac{2}{R} (t_{0i} + h V_g) - \frac{4}{3} \frac{2t_0}{R} \right)$$

$$V_g = \frac{Q - \frac{pR^3}{4m} t_{0i} + \frac{pR^3}{3m} t_0}{pR^2 + \frac{pR^3}{4m} h}$$

D'après B5 on a :

$$P = 2 \frac{L}{R} (t_{0i} + h V_g) = 2 \frac{L}{R} \left(t_{0i} + h \frac{Q - \frac{pR^3}{4m} t_{0i} + \frac{pR^3}{3m} t_0}{pR^2 + \frac{pR^3}{4m} h} \right)$$

Rapport sur l'épreuve de modélisation des matériaux et des ouvrages sujet matériaux et patrimoine 2011

La moyenne de l'épreuve est de 7,1. Les candidats ont traité en majorité la partie A, la moyenne de cette partie est de 9,7 tandis que celle de la partie B est de 4,6. De nombreux candidats donnent des réponses beaucoup trop longues et parfois hors sujet, alors que les questions appellent des réponses concises mais précises. Il doit être rappelé aux candidats que la longueur de la réponse n'en fait pas la qualité. On regrette à l'inverse que nombre de copies sont très insuffisamment rédigées, les réponses se limitant à l'application numérique sans autre explication.

Il est important de rappeler, comme dans le rapport 2010, que les candidats doivent s'attacher à analyser une situation inconnue de manière rationnelle et pragmatique.

Sur la partie A

La partie A a été abordée par la grande majorité des candidats.

Un premier point important à souligner est le manque d'attention porté à la lecture des questions, ce qui conduit à des erreurs de logique. Par exemple pour la question A1, plusieurs copies ont mentionné que la qualité des constituants joue un rôle sur la résistance du béton, alors que la question précisait « pour un jeu de constituant donné ». De même, plusieurs paramètres ont été invoqués, alors qu'un seul paramètre était demandé. Moins de la moitié des candidats a proposé le rapport e/c comme paramètre principal pilotant la résistance. Dans la suite, les réponses ont été peu argumentées dans la question sur le choix de la colle, du fait d'une analyse partielle ou erronée des phénomènes en jeu dans l'assemblage par collage. Ainsi, l'identification du retrait du béton a été peu proposée comme facteur pouvant affaiblir la liaison par collage. Les questions liées aux impacts environnementaux ont été assez bien traitées dans l'ensemble. Des erreurs de calcul dès la question A7 sont cependant à observer, malgré l'absence de difficultés. Les conclusions ainsi que la comparaison avec les impacts d'un européen ont été assez bien traitées.

Sur la partie B

La partie B visait à amener par une démarche originale et progressive les étudiants à écrire les équations permettant de dimensionner un circuit de pompage de béton. Ce sujet faisait appel aux notions de rhéologie du béton frais et de tribologie (étude du frottement béton tuyau).

La moyenne obtenue sur la partie B est inférieure à celle obtenue sur la partie A. Cela s'explique probablement par les deux remarques suivantes :

- un certain nombre de candidats semblent avoir commencé par la partie A et avoir consacré moins de temps à la partie B
- la dernière question faite pour départager les étudiants n'a été résolue par aucun étudiant et s'est donc avérée trop difficile.

Un nombre important de candidats n'ont pas su répondre correctement à la première question. Dans l'équilibre des forces du segment de béton, les candidats ont oublié de multiplier la pression par la section. Ceci devrait pourtant être une connaissance de base !!

La partie B avait toutefois été construite pour que les candidats puissent poursuivre l'exercice même si les questions précédentes n'avaient pas été résolues. Cela a permis à un certain nombre de candidats d'assurer un minimum de points à cette partie.

Partie 1 - Mécanique des Fluides

Captage d'eau

1. Vitesse dans la conduite

Le débit Q étant connu, la vitesse V s'exprime :

$$V = \frac{Q}{S}$$

avec S la section de la conduite, soit $S = \frac{\pi D_1^2}{4}$.

Application numérique : $V = 4,95 \text{ m.s}^{-1}$

2. Pertes de charge linéïques

Les pertes de charge linéïques s'expriment :

$$\Delta H_l = \lambda \frac{L}{D_1} \rho \frac{V^2}{2}$$

Application numérique : $\Delta H_l = 7,76.10^5 \text{ Pa}$

3. Pertes de charge singulières

Les pertes de charge singulières s'expriment :

$$\Delta H_s = \sum_i K_i \rho \frac{V^2}{2}$$

Application numérique : $\sum_i K_i = 4,99$; $\Delta H_s = 6,1.10^4 \text{ Pa}$

4. Hauteur manométrique du groupe de pompes

Les hypothèses (fluide incompressible, écoulement irrotationnel) permettent d'écrire le théorème de Bernoulli généralisé le long d'une ligne de courant allant du point 2 au point 6 :

$$p_6 + \rho g z_6 + \rho \frac{V^2}{2} = p_2 + \rho g z_2 + \rho \frac{V^2}{2} + H_m + \Delta H_l + \Delta H_s$$

L'écriture du théorème de Bernoulli généralisé entre les points 1 et 2 d'une part, et 6 et 7 d'autre part amène

$$p_a + \rho g z_1 + 0 = p_2 + \rho g z_2 + \rho \frac{V^2}{2}$$

et

$$p_6 + \rho g z_6 + \rho \frac{V^2}{2} = p_a + \rho g z_7 + 0$$

Il vient alors

$$H_m = \rho g \Delta z + \Delta H_l + \Delta H_s$$

Application numérique : $H_m = 3,9.10^6 \text{ Pa}$ ou $H_m = 397,5 \text{ mCE}$

5. Puissance hydraulique

La puissance hydraulique s'exprime :

$$P = Q \times H_m$$

Application numérique : $P = 49,14 \text{ MW}$.

Centrale hydro-électrique

1. Débit volumique

Les hypothèses (fluide parfait, isovolume et écoulement stationnaire) permettent d'écrire le théorème de Bernoulli tel que :

$$\frac{1}{2}\rho V_A^2 + \rho g z_A + p_A = \frac{1}{2}\rho V_B^2 + \rho g z_B + p_B$$

avec $V_A = 0$ (réservoir suffisamment grand), $V_B = v$ et $p_A = p_B = p_a$ d'où

$$v = \sqrt{2g(z_A - z_B)}$$

Application numérique : $v = 192,2 \text{ m.s}^{-1}$.

On en déduit le débit volumique :

$$Q = v \frac{\pi d^2}{4}$$

Application numérique : $Q = 73,9 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

2. Efforts sur le massif d'ancrage

La résultante des efforts de pression exercés sur le massif d'ancrage du coude s'écrit :

$$\vec{R} = \iint_{\Sigma_c} -p \vec{n}_{p \rightarrow f} d\Sigma_c = - \iint_{\Sigma_c} -p \vec{n}_{f \rightarrow p} d\Sigma_c$$

avec $\vec{n}_{f \rightarrow p}$ vecteur normal dirigé du fluide vers la paroi (voir figure 1).

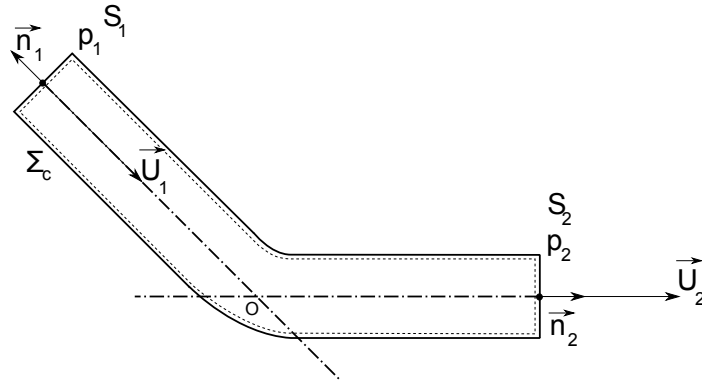


FIGURE 1 – Massif d'ancrage du coude

Le théorème de quantité de mouvement appliqué au domaine fluide délimité par $\Sigma = \Sigma_c + S_1 + S_2$ s'écrit :

$$\iint_{S_1} \rho \vec{U}_1 (-U_1) dS_1 + \iint_{S_2} \rho \vec{U}_2 (-U_2) dS_2 = \iint_{\Sigma_c} -p \vec{n} d\Sigma_c + \iint_{S_1} -p_1 \vec{n}_1 dS_1 + \iint_{S_2} -p_2 \vec{n}_2 dS_2$$

soit

$$\vec{R} = -(p_1 + \rho U_1^2) S_1 \vec{n}_1 - (p_2 + \rho U_2^2) S_2 \vec{n}_2$$

Ici le débit est conservé : $U_1 = U_2$ et $S_1 = S_2$. Le théorème de Bernoulli appliqué entre les points 1 et 2 amène :

$$p_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho U_1^2 = p_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho U_2^2$$

avec $U_1 = U_2 = U$ et en négligeant les effets de pesanteur on obtient $p_1 \approx p_2 \approx p$ d'où

$$\vec{R} = -(p + \rho U^2)S(\vec{n}_1 + \vec{n}_2)$$

ou en module $R = \sqrt{2 - \sqrt{2}} (p + \rho U^2)S$.

Application numérique :

D'après le théorème de Bernoulli entre la surface libre du réservoir et le point 2, on peut écrire

$$p = p_A + \rho g(z_A - z_B) - \frac{1}{2}\rho U^2$$

d'où $R = 109 \text{ MN}$.

3. Effort sur l'auget

Dans un référentiel lié à l'auget supposé galiléen, le mouvement est stationnaire et le théorème de Bernoulli s'écrit sous la forme

$$p + \frac{1}{2}\rho U^2 = \text{cte}$$

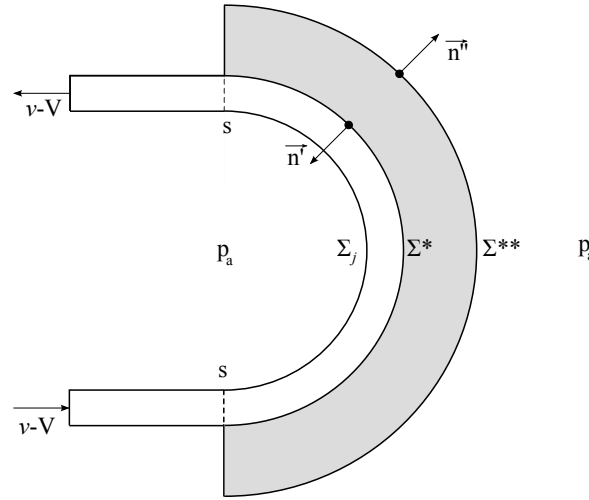


FIGURE 2 – Auget de la turbine Pelton

Dans ce cas, la vitesse absolue du jet est la même à l'entrée et à la sortie de l'auget et a pour valeur $v - V$. On cherche alors

$$\vec{F} = \int_{\Sigma^*} -p \vec{n} d\Sigma^* + \int_{\Sigma^{**}} -p_a \vec{n} d\Sigma^{**}$$

avec $\Sigma^* \approx \Sigma^{**}$ on a

$$\vec{F} \approx \int_{\Sigma^*} (p - p_a) \vec{n} d\Sigma^*$$

Le théorème de la quantité de mouvement appliqué au volume de fluide délimité par la surface fermée $\Sigma = \Sigma_j + \Sigma^* + s$ avec Σ_j la surface libre du jet, Σ^* la surface interne de l'auget et s la section d'entrée et de sortie du jet, on obtient :

$$\int_{\Sigma} \rho \vec{U} (\vec{U} \cdot \vec{n}) d\Sigma = -\vec{F}$$

soit en projetant sur l'axe horizontal,

$$F = 2 \rho s (v - V)^2$$

4. Vitesse de l'auget

La puissance fournie à l'auget est $P = FV$ soit

$$P = 2 \rho s (v - V)^2 V$$

Cette puissance est maximale pour $\frac{dP}{dV} = 0$ soit pour $V = \frac{v}{3}$. Dans ce cas,

$$P = \rho s \left(\frac{2v}{3} \right)^3 \text{ et } F = \frac{3P}{v}$$

Application numérique : $P = 809 \text{ MW}$ et $F = 12,6 \text{ MN}$.

Partie 2 Mécanique du solide

On se propose d'étudier à présent le comportement du barrage poids. On étudiera cette structure dans une configuration simplifiée.

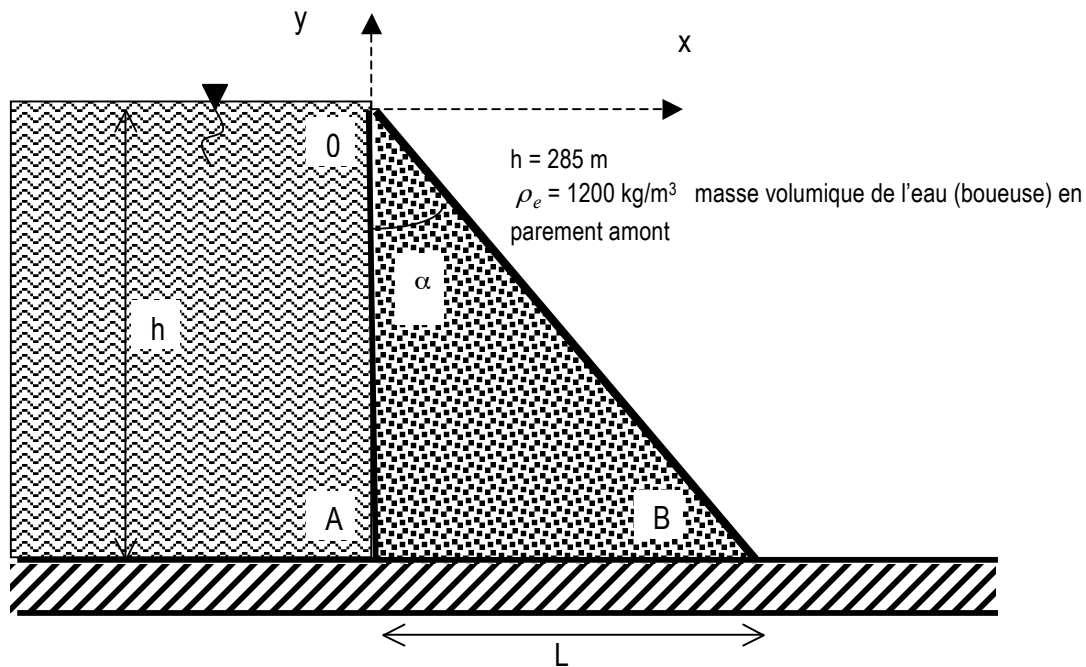


Figure 4 : Barrage poids dans sa configuration simplifiée pour le dimensionnement

Le barrage est constitué d'un béton dont le comportement est supposé homogène, élastique linéaire et isotrope.

E, module d'Young = 10 000 MPa
 ν , coefficient de Poisson = 0,3
 ρ_b masse volumique = 2500 kg/m³

Partie 2.1 Résolution « mécanique des milieux continus »

2.1.1 Tenseur des contraintes

On suppose le barrage suffisamment long pour ramener l'étude à une section courante transversale (plan (x,y)) dont on supposera la déformation plane.

2.1.1.1 Ecrire la condition de déformation plane en tout point

$$\varepsilon_{zz}, \varepsilon_{zx} \text{ et } \varepsilon_{zy} = 0, \quad \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx}$$

2.1.1.2 En utilisant les relations de Hooke

$$\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \quad \varepsilon_{zz} = \frac{(1+\nu)}{E} \cdot \sigma_{zz} - \frac{\nu}{E} \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) = 0$$

Soit

$$\sigma_{zz} = \nu \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$$

Soit

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$$

2.1.2 Conditions aux limites

2.1.2.1 Définir le vecteur contrainte, sur le parement amont, en fonction de l'ordonnée du point.

$$\{T_{OA}\} = \begin{Bmatrix} -\gamma \cdot y \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

2.1.2.2 Définir dans le repère (x,y) le vecteur contrainte, sur le parement aval, notée $\{T_{OB}\}$.

$$\{T_{OB}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

2.1.2.3 Vecteur contraintes sur les parements :

$$\{T_{OA}\} = \begin{Bmatrix} -\rho_e \cdot g \cdot y \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\sigma_{xx} \\ -\sigma_{xy} \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ sur OA}$$

$$\{T_{OB}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \cdot \cos \alpha + \sigma_{xy} \cdot \sin \alpha \\ \sigma_{xy} \cdot \cos \alpha + \sigma_{yy} \cdot \sin \alpha \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ sur OB}$$

2.1.3 Relations d'équilibre

En supposant une solution en contraintes de la forme :

$$\sigma_{xx} = a_0 + a_1 x + a_2 y$$

$$\sigma_{yy} = b_0 + b_1 x + b_2 y$$

$$\sigma_{xy} = c_0 + c_1 x + c_2 y$$

2.1.3.1 Appliquer les relations d'équilibre :

$$a_1 + c_2 = 0$$

$$c_1 + b_2 - \rho_b \cdot g = 0 \quad \text{en tout point (x,y) du barrage}$$

2.1.3.2 définir tous les paramètres des composantes du tenseur des contraintes.

$$\sigma_{xx} = a_0 + a_1 x + a_2 y$$

$$\sigma_{yy} = b_0 + b_1 x + b_2 y$$

$$\sigma_{xy} = c_0 + (\rho_b \cdot g - b_2) x - a_1 \cdot y$$

$$\text{Pour } x = 0 \text{ et } \forall y \quad \sigma_{xx} = a_0 + a_2 y = \rho_e \cdot g \cdot y \quad a_0 = 0 \quad a_2 = \rho_e \cdot g$$

$$\sigma_{xy} = c_0 - a_1 \cdot y = 0 \quad c_0 = a_1 = 0$$

$$\text{Pour } x = -tg\alpha \cdot y \text{ et } \forall y \quad \sigma_{xx} = \rho_e \cdot g \cdot y$$

$$\sigma_{yy} = b_0 - b_1 \cdot tg\alpha \cdot y + b_2 y$$

$$\sigma_{xy} = -(\rho_b \cdot g - b_2) \cdot tg\alpha \cdot y$$

$$(\rho_e \cdot g \cdot \cos \alpha - (\rho_b \cdot g - b_2) \cdot tg\alpha \cdot \sin \alpha) y = 0 \quad \text{soit} \quad b_2 = \rho_b \cdot g - \rho_e \cdot g \frac{1}{tg^2 \alpha}$$

$$b_0 \cdot \sin \alpha + (b_2 \cdot \sin \alpha - (\rho_b \cdot g - b_2) \cdot tg\alpha \cdot \cos \alpha - b_1 \cdot tg\alpha \cdot \sin \alpha) \cdot y = 0$$

$$\text{Soit} \quad b_0 = 0 \quad b_1 = \frac{1}{tg\alpha} (2b_2 - \rho_b \cdot g) = \frac{1}{tg\alpha} (\rho_b \cdot g - \frac{2 \cdot \rho_e \cdot g}{tg^2 \alpha})$$

$$\text{Soit pour } \alpha = \frac{\pi}{4} \text{ et en posant :} \quad w_e = \rho_e \cdot g \quad w_b = \rho_b \cdot g \quad w_{eb} = w_b - 2 \cdot w_e \text{ et}$$

$$\sigma_{xx} = w_e \cdot y$$

$$\sigma_{yy} = w_{eb} \cdot x + (w_b - w_e) y$$

$$\sigma_{xy} = w_e \cdot x$$

2.1.4 Tenseur des déformations

Déterminer les composantes du tenseur des déformations pour $\nu = 0,5$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{(1+\nu)}{E} \cdot \sigma_{xx} - \frac{\nu}{E} \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) = \frac{(1+\nu)}{E} \cdot \sigma_{xx} - \frac{\nu}{E} \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}))$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{(1+\nu)}{E} \cdot \sigma_{xx} - \frac{\nu}{E} \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})) = -\frac{3}{4E} \cdot w_{eb} \cdot (x + y)$$

$$\varepsilon_{yy} = +\frac{3}{4E} \cdot w_{eb} \cdot (x + y)$$

$$\varepsilon_{xy} = +\frac{3}{2E} \cdot w_e \cdot x$$

2.1.5 Déplacements

En considérant un tenseur des déformations linéarisé et des composantes du déplacement u et v selon respectivement x et y, sous la forme suivante :

2.1.5.1 Déterminer les paramètres de ces composantes du déplacement.

$$u(x, y) = a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + e \cdot y + f$$

$$\varepsilon_{xx} = 2a \cdot x + c \cdot y + d = -\frac{3}{4E} \cdot w_{eb} \cdot (x + y) \quad \forall x, y \quad \text{soit} \quad a = -\frac{3}{8E} \cdot w_{eb} \quad d = 0 \quad c = -\frac{3}{4E} \cdot w_{eb}$$

$$v(x, y) = \alpha \cdot x^2 + \beta \cdot y^2 + \gamma \cdot x \cdot y + \delta \cdot x + \mu \cdot y + \eta$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} (2b \cdot x + c \cdot x + e + 2\alpha \cdot x + \gamma \cdot y + \delta) = \frac{3}{2E} \cdot w_e \cdot x \quad \forall x, y \quad \text{soit} \quad e + \delta = 0$$

$$\alpha = \frac{3}{8E} (4w_e + w_{eb})$$

$$\varepsilon_{yy} = 2\beta \cdot y + \gamma \cdot x + \varepsilon = \frac{3}{4E} \cdot w_{eb} \cdot (x + y) \quad \forall x, y \quad \text{soit} \quad \gamma = \frac{3}{4E} \cdot w_{eb} \quad \varepsilon = 0 \quad \beta = \frac{3}{8E} \cdot w_{eb}$$

Il reste 4 paramètres donnés par les conditions aux limites :

$$u(0, -h) = v(0, -h) = 0 \quad e = -\delta = \frac{3h}{8E} (w_{eb} - 4w_e)$$

$$v(h, -h) = 0 \quad f = \frac{3h^2}{2E} \cdot w_e \quad \text{remarque } v=0 \text{ en principe sur } y=-h$$

2.1.5.2 Calculer les déplacements au sommet du barrage

$$u = \frac{3h^2}{2E} \cdot w_e \quad v = -\frac{3h^2}{8E} \cdot w_{eb}$$

Application numérique :

$$u = 0.146m \quad v = 0.040m$$

Partie 2.2 Résolution « résistance des matériaux »

On se propose maintenant d'étudier le comportement du barrage à l'aide de la théorie des poutres, en assimilant le barrage à une poutre droite d'axe y , de section variable, simplement encastrée au niveau du contact avec le sol.

2.2.1 Hypothèses

2.2.1.1 Rappeler les hypothèses de la théorie des poutres.
Commenter ces hypothèses dans ce cas.

Hypothèse de Bernoulli : section plan reste plane.

Hypothèse restrictive par rapport à la partie 2.1

2.2.1.2 Exprimer les charges s'exerçant sur le barrage.

Charges s'exerçant sur le barrage (pour 1 ml de barrage) :

- Poids propre du barrage : charge répartie linéique :

$$\vec{p}(y) = -S(y) \cdot g \cdot \rho_b \cdot \vec{y} = -\frac{h-y}{h} L \cdot g \cdot \rho_b \cdot \vec{y}$$

- Poussée de l'eau sur le parement amont : $\vec{q}(y) = (h-y) \cdot g \cdot \rho_e \cdot \vec{x}$
- Réaction du sol à l'encastrement : $\vec{R}_A = X_A \cdot \vec{x} + Y_A \cdot \vec{y} + M_A \cdot \vec{z}$

2.2.1.3 Expliciter le moment quadratique de la section du barrage.

Soit $I(y)$, le moment quadratique de la section du barrage, pour 1 ml de barrage :

$$I(y) = \frac{1}{12} \cdot \left(L \frac{h-y}{h} \right)^3 = \frac{1}{12} \cdot L^3 \cdot \frac{(h-y)^3}{h^3}$$

2.2.2 Efforts de cohésion

2.2.2.1 Exprimer les efforts de cohésion dans le barrage.

$$\vec{N}(y) = N(y) \cdot \vec{y} = \frac{1}{2} (h-y) \left(-\frac{h-y}{h} L \cdot g \cdot \rho_b \right) \cdot \vec{y} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{(h-y)^2}{h} L \cdot g \cdot \rho_b \cdot \vec{y}$$

$$\vec{V}(y) = V(y) \cdot \vec{x} = \frac{1}{2} (h-y) (h-y) \cdot g \cdot \rho_e \cdot \vec{x} = \frac{1}{2} (h-y)^2 \cdot g \cdot \rho_e \cdot \vec{x}$$

$$\vec{M}(y) = M(y) \cdot \vec{z} = -\frac{1}{3} (h-y) \cdot \frac{1}{2} (h-y)^2 \cdot g \cdot \rho_e \cdot \vec{z} = -\frac{1}{6} (h-y)^3 \cdot g \cdot \rho_e \cdot \vec{z}$$

2.2.2.2 Tracer les diagrammes correspondants. Commenter.

Voir dernière feuille

Pas linéaires car charges linéairement réparties

2.2.3 Calculer les déplacements au sommet du barrage.

Soient u et v les déplacements en tête de barrage, suivant respectivement $\vec{x}$ et $\vec{y}$.

Déplacement horizontal :

$$M(y) = -E \cdot I(y) \cdot u''(y) \Leftrightarrow u''(y) = \frac{M(y)}{E \cdot I(y)} = \frac{\frac{1}{6} (h-y)^3 \cdot g \cdot \rho_e}{E \cdot \frac{1}{12} \cdot L^3 \cdot \frac{(h-y)^3}{h^3}} = 2 \frac{h^3}{L^3} \cdot \frac{g \cdot \rho_e}{E}$$

On intègre deux fois cette expression :

$$u'(y) = -2 \frac{h^3}{L^3} \cdot \frac{g \cdot \rho_e}{E} \cdot y + C_1$$

$$u(y) = \frac{h^3}{L^3} \cdot \frac{g \cdot \rho_e}{E} \cdot y^2 + C_1 \cdot y + C_2$$

On calcule les constantes C_1 et C_2 avec les conditions aux limites : $u(0) = u'(0) = 0$ soit $C_1 = C_2 = 0$

$$\text{D'où : } u(y) = \frac{h^3}{L^3} \cdot \frac{g \cdot \rho_e}{E} \cdot y^2$$

Et en tête de barrage :

$$u = u(h) = \frac{h^5}{L^3} \cdot \frac{g \cdot \rho_e}{E} \quad ; \quad \text{A.N. : } u = 95,6 \text{ mm avec } g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$$

Déplacement vertical :

$$v = \int_0^h \varepsilon(y) \cdot dy$$

Or $\varepsilon(y) = \frac{1}{E} \cdot \frac{N(y)}{S(y)}$ avec $S(y)$, aire de la section transversale du barrage à la position y

$$S(y) = L \cdot \frac{h-y}{h}$$

$$\text{D'où : } \varepsilon(y) = \frac{1}{E} \cdot \frac{-\frac{1}{2} \cdot \frac{(h-y)^2}{h} L \cdot g \cdot \rho_b}{L \cdot \frac{h-y}{h}} = -\frac{(h-y) \cdot g \cdot \rho_b}{E}$$

$$\text{Et : } v = \int_0^h \left[-\frac{(h-y) \cdot g \cdot \rho_b}{E} \right] \cdot dy = -\frac{g \cdot \rho_b}{E} \int_0^h (h-y) \cdot dy = -\frac{g \cdot \rho_b}{E} \left[-\frac{(h-y)^2}{2} \right]_0^h$$

$$v = -\frac{g \cdot \rho_b}{E} \cdot \frac{h^2}{2} \quad ; \quad \text{A.N. : } v = -99,6 \text{ mm avec } g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$$

2.2.4 Comparer ces résultats aux déplacements obtenus par la résolution « mécanique des milieux continus ».

Commenter ces deux études en se basant sur les hypothèses de calcul.

Cisaillement pas pris en compte pour calcul des déplacements avec méthode rdm.

Partie 2.3 Résolution par la méthode des éléments finis

2.3.1 Résultat avec un seul élément linéaire

2.3.1.1 Définir cet élément : caractéristiques du champ de déplacement, du champ de contrainte, conditions aux limites conformes à celles définies précédemment.

Elément fini T3 (triangulaire à 3 nœuds). Champ de déplacement linéaire, et champ de contrainte constant dans la structure
 u et $v = 0$ en A $v=0$ en B

2.3.1.2 Comment traitera-t-on la valeur de 0,5 pour le coefficient de Poisson ?

Prendre une valeur proche de 0,5 (0,49), éventuellement faire une étude de sensibilité

2.3.1.3 Pour la pression hydrostatique de l'eau et les forces de gravité appliquées au barrage, on obtient les déplacements suivants au sommet du barrage :
 $u = 96 \text{ mm}$

$$v = -50 \text{ mm}$$

Commenter ces résultats par rapport aux résultats de la mécanique des milieux continus obtenus précédemment.

Hypothèse restrictive, structure rigidifiée par rapport à la MMC, « flèche » moins importante

Commenter ces résultats par rapport aux résultats de la résistance des matériaux obtenus précédemment.

Justifier qualitativement ces écarts

2.3.1.4 Que représentent les résultats en contraintes ?

Valeur moyenne constante dans la structure

2.3.2 Résultat avec 400 éléments quadratiques

2.3.2.1 Définir ces éléments : caractéristiques du champ de déplacement, du champ de contrainte

Structure triangulaire, donc éléments T6 (triangulaires à 6 nœuds), champ de déplacement quadratique et champ de contrainte linéaire par morceaux dans la structure

2.3.2.2 Les déplacements au sommet du barrage sont :

$$u = 306 \text{ mm}$$

$$v = -18 \text{ mm}$$

Commenter ces résultats par rapport aux résultats précédents.

Hypothèses moins restrictives que la MMC, plus de souplesse. Déplacements plus importants

Justifier qualitativement ces écarts, notamment à partir des isovaleurs des déplacements verticaux (voir figure 5)

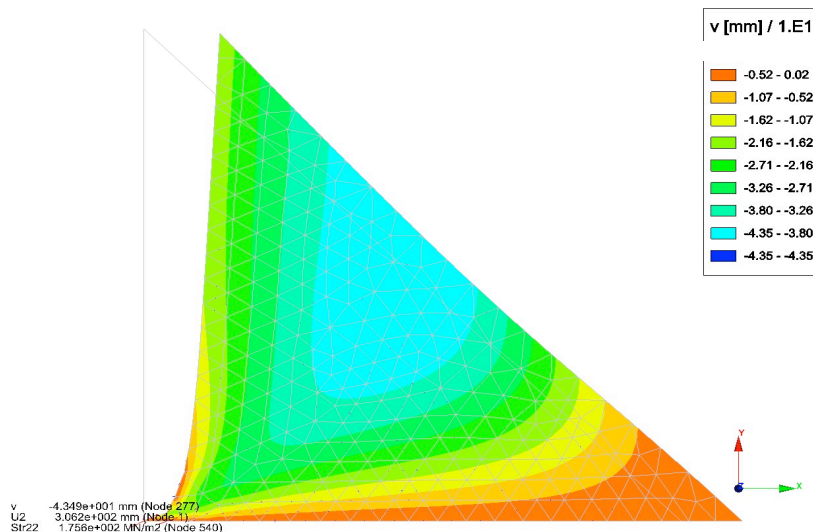


Figure 5 - Isovaleurs des déplacements verticaux

Il apparaît que les déplacements verticaux ne sont pas linéaires ni même quadratiques

2.3.2.3 Comment interpréter les contraintes principales au point A, fournies par le calcul éléments finis

(voir figure 6), sachant que s_1 (contrainte principale majeure) = 176 MN/m²,

s_2 (contrainte principale mineure) = 41 MN/m².

Commenter cet état de contrainte par rapport aux hypothèses de la résistance des matériaux.

Contrainte de traction, représentant une valeur moyenne dans l'élément, donc fonction de la taille de l'élément. Compte tenu de l'inclinaison fort cisaillement dans le plan xoz. Très différents du champ de contrainte RDM (traction verticale).

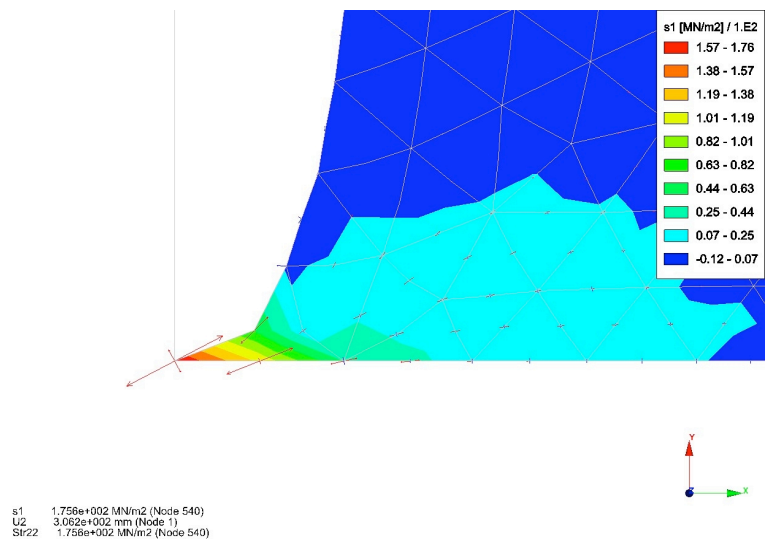
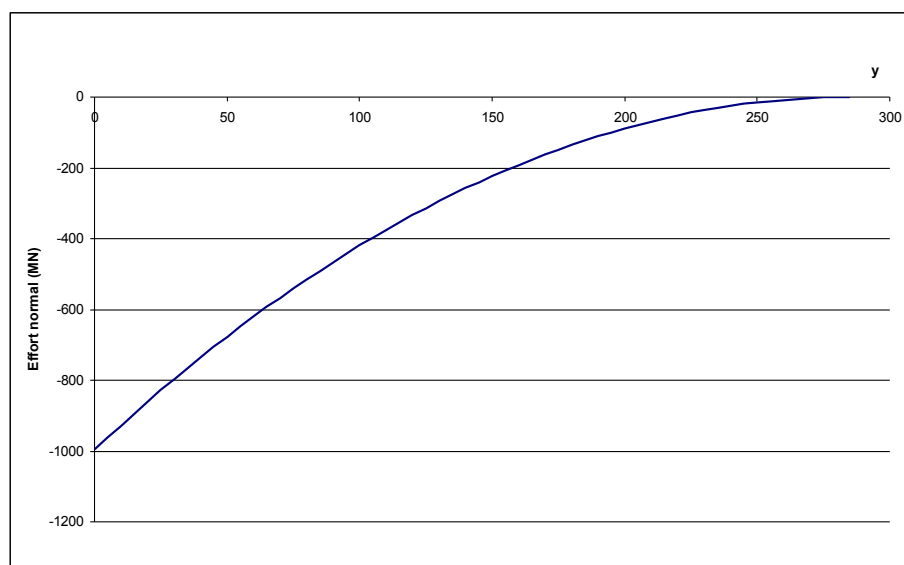
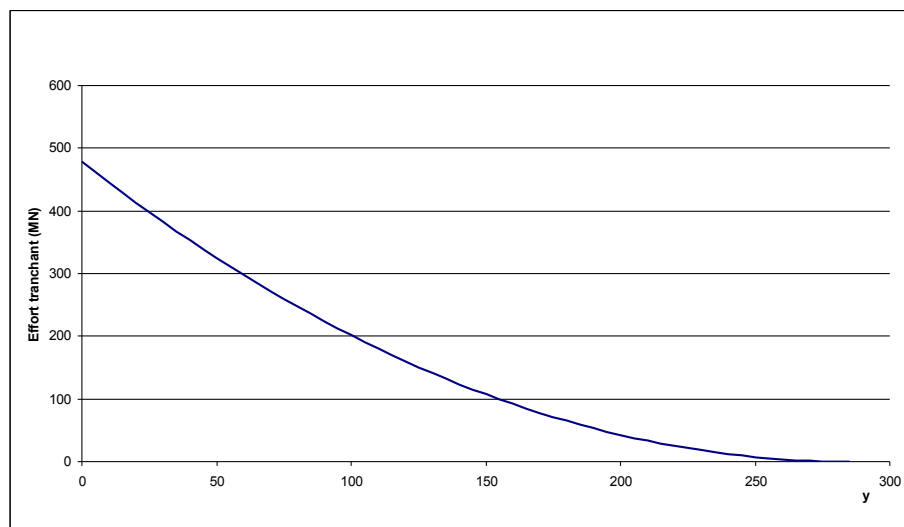


Figure 6 - Contraintes principales en pied de barrage

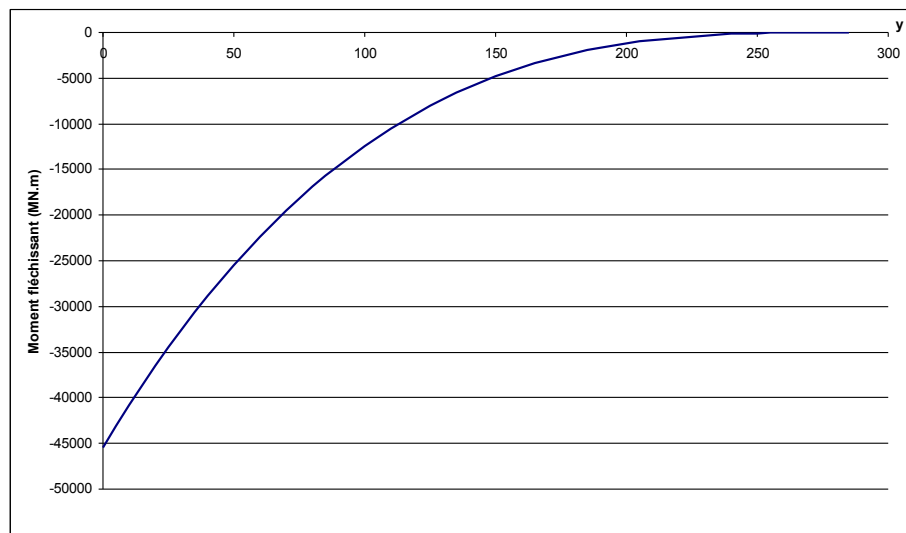
Diagrammes :



$N_{\max} = -996$ MN



$V_{\max} = 478$ MN



$$M_{\max} = -45418 \text{ MN.m}$$

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

Partie 1. Mécanique des fluides

Cette partie comportait deux exercices indépendants, le premier abordant des questions d'hydraulique, le second concernant l'étude d'une conduite forcée alimentant une turbine Pelton. Si le premier exercice a été abordé par une majorité de candidats (60%), le second n'a été traité correctement que par une petite minorité de candidats (4%).

Concernant le premier exercice, seuls 40% des candidats ont réussi correctement à traiter cet exercice pourtant très classique. Ce taux demeure très insuffisant. Seuls 2% des candidats sont parvenus aux derniers résultats du second exercice.

Enfin, comme les années précédentes, on encourage les candidats à tenter de traiter la totalité de l'épreuve car les sujets sont progressifs. Tous les candidats doivent réussir sur les premières questions.

Partie 2. Modélisation mécanique (solide)

Il s'agissait, dans cette partie 2, de traiter le comportement mécanique du barrage, ouvrage servant de support à la partie 1, lorsqu'il est soumis classiquement à une pression hydrostatique. Le premier modèle mécanique proposé faisait référence à la Mécanique des Milieux Continus (MMC). Le deuxième modèle exploitait les résultats de la Résistance Des Matériaux (RDM). Il était demandé aux candidats de développer ces deux méthodes, de comparer les résultats respectifs, puis de commenter ces derniers en regard des hypothèses restrictives spécifiques à chacune de ces méthodes.

Si chaque question de MMC et de RDM a été traitée à au moins 50% par au moins un candidat, on constate une très forte disparité dans les notes (0-14,5 pour la RDM, 0-11,6 pour la MMC). D'une manière générale, la RDM, méthode plus classique que la MMC dans les programmes de formation en génie civil, a été mieux traitée. La MMC constituait une nouveauté pour les candidats. Elle en a déstabilisé plus de la moitié. Toutefois, les résultats de cette épreuve sont meilleurs que ceux de l'an passé grâce à la partie 1 plus traditionnelle, même s'il est estimé que les candidats auraient pu être plus performants.

Partie 3. Partie modélisation numérique

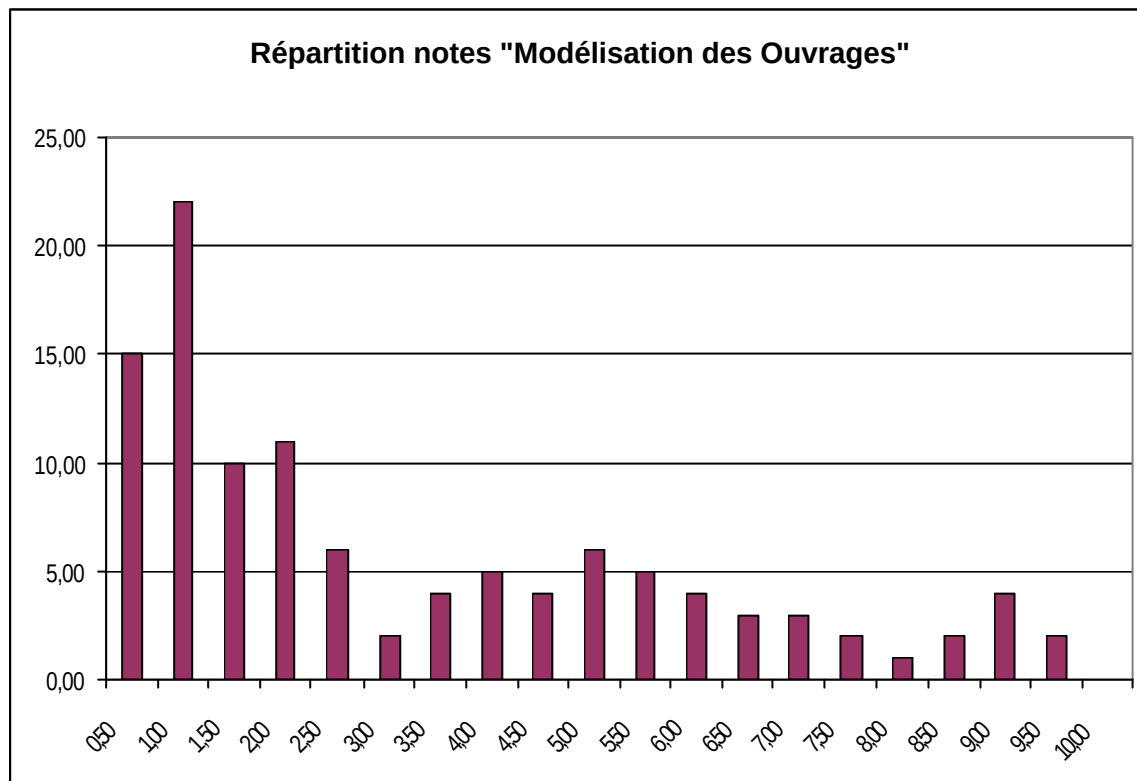
Comme dans les deux éditions précédentes, une partie de l'épreuve était consacrée à la modélisation numérique. Comme précédemment, les questions portaient à la fois sur des considérations générales de la méthode des éléments finis et sur des particularités de l'ouvrage traité (barrage).

On regrettera que cette partie n'ait été abordée que par 15% des candidats, soit un net recul par rapport à l'an passé (45%). On retombe ainsi au score de la session de 2009. Comme l'an passé, 8 candidats ont montré qu'ils maîtrisaient à la fois les principes de modélisation et les méthodes numériques. Ces candidats se sont nettement démarqués des autres dans la notation de l'épreuve de Modélisation des Ouvrages.

On peut penser que les candidats « nouveaux » de cette année, à savoir ceux correspondant à l'augmentation des effectifs (100% par rapport à l'an passé), étaient peu familiers avec les techniques de modélisation numérique.

Comme les années précédentes, 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.

Répartition des notes de l'épreuve.



AGRÉGATION DE GÉNIE CIVIL

Épreuve « Qualité des ambiances »

Session 2011

Partie « Acoustique »

Acoustique du bâtiment et environnementale

Réflexion et transmission acoustique par des parois

Dans l'ensemble de ce problème, on choisira la convention temporelle en $\exp(+j\omega t)$ et on considérera une propagation unidimensionnelle suivant l'axe x .

Partie n°1 : Rappels sur la notion d'onde plane

- (a) Soit une onde plane harmonique élémentaire (onde de pression) de pulsation ω , de nombre d'onde k , d'amplitude A se propageant dans une direction x à la célérité du son dans l'air c , dans un milieu infini de masse volumique ρ . **Donner** l'expression de la pression p en notation complexe.

$$p(x,t) = A \exp j(\omega t - kx)$$

- (b) En utilisant l'équation d'Euler $-\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial x}$, **donner** l'expression de la vitesse acoustique v .

Par application directe de la formule donnée dans l'énoncé :

$$\begin{aligned} -\rho \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{\partial p}{\partial x} = -jkA \exp j(\omega t - kx) \\ \Rightarrow \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{jkA}{\rho} \exp j(\omega t - kx) \\ \Rightarrow v(x,t) &= \frac{jkA}{j\omega\rho} \exp j(\omega t - kx) \\ \Rightarrow v(x,t) &= \frac{A}{\rho c} \exp j(\omega t - kx) = \frac{p(x,t)}{\rho c} \end{aligned}$$

- (c) **En déduire** que l'impédance acoustique spécifique Z d'une onde plane (rapport de la pression acoustique sur la vitesse acoustique) vaut $Z=\rho c$. **Le résultat est direct, d'après les expressions obtenues aux questions (a) et (b) :**

$$Z = \frac{p(x,t)}{v(x,t)} = \frac{A \exp j(\omega t - kx)}{\frac{A}{\rho c} \exp j(\omega t - kx)} = \rho c$$

- (d) Sachant que l'intensité acoustique d'une onde plane harmonique est définie par $I = \frac{1}{2} \text{Re}[p \times v^*]$, $\text{Re}[\cdot]$ désignant la partie réelle et $*$ le conjugué d'un nombre complexe, **exprimer** l'intensité acoustique en fonction de l'impédance spécifique Z et de l'amplitude de la pression A . **Il suffit d'appliquer l'expression de l'intensité acoustique donnée dans l'énoncé, en reprenant les expressions obtenues aux questions (a), (b) et (c) :**

$$I = \frac{1}{2} \text{Re}[p \times v^*] \\ = \frac{1}{2} \text{Re}\left[p(x,t) \times \frac{p^*(x,t)}{rc}\right] = \frac{1}{2rc} |p(x,t)|^2 = \frac{1}{2Z} |A|^2$$

Note : Il n'est pas précisé que l'amplitude A est réelle. Si c'est effectivement le cas, l'intensité acoustique s'écrit $I = \frac{1}{2Z} A^2$ (cette solution est acceptable à ce stade).

Partie n°2 : Réflexion et transmission à l'interface de deux milieux (figure A1)

- (e) Soit une onde plane élémentaire se propageant perpendiculairement à la surface S (immobile, en $x=0$) séparant deux milieux de propagation semi-infinis (notés 1 et 2), d'impédances acoustiques spécifiques respectives $Z_1=r_1c_1$ et $Z_2=r_2c_2$. **Donner** les expressions des pressions et des vitesses incidentes, réfléchies et transmises à l'interface.

Notations :

1. la pression incidente (d'amplitude A_i) sera notée p_i (p indice i) ;
2. la pression réfléchie (d'amplitude A_r), sera notée p_r (p indice r) ;
3. la pression transmise (d'amplitude A_t) sera notée p_t (p indice t) ;
4. la vitesse incidente sera notée v_i (v indice i) ;
5. la vitesse réfléchie, sera notée v_r (v indice r) ;
6. la vitesse transmise sera notée v_t (v indice t) ;
7. le nombre d'onde dans le milieu 1, sera notée k_1 (k indice 1) ;
8. le nombre d'onde dans le milieu 2, sera notée k_2 (k indice 2) ;

D'après (a) et (b), la pression et la vitesse incidentes (se propageant vers les x positifs, dans le milieu 1) :

$$p_i(x,t) = A_i \exp j(\omega t - k_1 x) \quad \text{et} \quad v_i(x,t) = \frac{A_i}{Z_1} \exp j(\omega t - k_1 x) = \frac{p_i(x,t)}{Z_1}$$

La pression et la vitesse réfléchies (se propageant vers les x négatifs, dans le milieu 1) : **attention au signe pour la vitesse réfléchie** ;

$$p_r(x,t) = A_r \exp j(\omega t + k_1 x) \quad \text{et} \quad v_r(x,t) = -\frac{A_r}{Z_1} \exp j(\omega t + k_1 x) = -\frac{p_r(x,t)}{Z_1}$$

La pression et la vitesse transmises (se propageant vers les x positifs, dans le milieu 2) :

$$p_t(x, t) = A_t \exp j(\nu t - k_2 x) \quad \text{et} \quad v_t(x, t) = \frac{A_t}{Z_2} \exp j(\nu t - k_2 x) = \frac{p_t(x, t)}{Z_2}$$

(f) **En écrivant les équations de continuité** de la pression et de la vitesse acoustique à l'interface S (en $x=0$), **exprimer** les amplitudes A_r et A_t en fonction de A_i .

Équations de continuité à l'interface (en $x=0$):

- Continuité de la pression : $p_i + p_r = p_t$ (C1)

- Continuité de la vitesse : $v_i + v_r = v_t$ (C2)

Note : compte tenue du signe (négatif) de la vitesse réfléchie, la relation (C2) est bien cohérente. Certains candidats ayant considéré un signe positif pour la vitesse réfléchie, auront considéré une autre relation de continuité $v_i - v_r = v_t$ pour retomber sur une solution logique. Bien que la démarche soit biaisée, on peut considérer cette autre solution comme acceptable à cette seule question.

En appliquant (C1) en $x=0$:

$$A_i \exp \nu t + A_r \exp \nu t = A_t \exp \nu t \Rightarrow A_i + A_r = A_t$$

En appliquant (C2) en $x=0$:

$$\frac{A_i}{Z_1} - \frac{A_r}{Z_1} = \frac{A_t}{Z_2}$$

En combinant ces deux dernières relations, il vient immédiatement :

$$A_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} A_i$$

et

$$A_r = \left(\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} - 1 \right) A_i = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} A_i$$

(g) **Montrer** que les coefficients (en amplitude de pression) de transmission $T_p = A_t/A_i$ et de réflexion $R_p = A_r/A_i$, à l'interface, s'écrivent :

$$T_p = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{A}) \quad \text{et} \quad R_p = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{B})$$

D'après (f), ces deux relations sont immédiates.

(h) En utilisant la réponse à la question (d), **exprimer** les coefficients (en énergie) de transmission $T_E = I_t/I_i$ et de réflexion $R_E = -I_r/I_i$ à l'interface, en fonction des impédances spécifiques Z_1 et Z_2 .

On écrit les intensités des ondes incidentes, réfléchies et transmises :

- $$I_i = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[p_i \times v_i^*] = \frac{1}{2Z_1} |A_i|^2$$
- $$I_r = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[p_r \times v_r^*] = -\frac{1}{2Z_1} |A_r|^2$$

Note : là encore, il ne fallait pas se tromper de signe pour l'intensité de l'onde réfléchi (puisque la vitesse réfléchi est négative). L'intensité étant négative, l'expression $R_E = -I_r/I_i$ est bien cohérente. Les candidats qui se sont trompés de signe pour la vitesse réfléchi auront eu « tendance » à corriger cette relation en $R_E = I_r/I_i$ pour que la suite soit cohérente. Bien que la démarche soit biaisée, on peut considérer cette autre solution comme acceptable à cette seule question.

- $$I_t = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[p_t \times v_t^*] = \frac{1}{2Z_2} |A_t|^2$$

On exprime le coefficient de transmission en énergie :

$$T_E = \frac{\frac{1}{2Z_2} |A_t|^2}{\frac{1}{2Z_1} |A_i|^2} = \frac{Z_1}{Z_2} \frac{|A_t|^2}{|A_i|^2} = \frac{Z_1}{Z_2} T_p^2 = \frac{Z_1}{Z_2} \left(\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

On exprime le coefficient de réflexion en énergie (voir note plus haut) :

$$R_E = \frac{\frac{1}{2Z_1} |A_r|^2}{\frac{1}{2Z_1} |A_i|^2} = \frac{|A_r|^2}{|A_i|^2} = R_p^2 = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

(i) Application : **évaluer** les coefficients de transmission et de réflexion, en pression et en énergie, lorsque $Z_1 \gg Z_2$ et $Z_1 \ll Z_2$. **Commenter** les résultats.

Premier cas : $Z_1 \gg Z_2$

$$\begin{cases} T_p = 0 \\ R_p = -1 \\ T_E = 0 \\ R_E = 1 \end{cases}$$

Commentaire : pas de transmission, **tout est réfléchi** (avec changement de signe à la réflexion).

Second cas : $Z_1 \ll Z_2$

$$\begin{cases} T_p = 2 \\ R_p = 1 \\ T_E = 0 \\ R_E = 1 \end{cases}$$

Commentaire : **tout est réfléchi** (sans changement de signe). Le résultat surprenant viendrait du coefficient de transmission en pression qui vaut 2, mais comme l'énergie n'est pas transmise, cela reste cohérent.

Partie n°3 : Propagation à travers une surface rigide (figure A2)

On s'intéresse maintenant à la transmission acoustique à travers une surface S infiniment rigide (sans compression), de masse surfacique m , à l'interface entre deux milieux semi-infinis (notés 1 et 2) de même nature ($Z_1=Z_2=Z$). La position de la surface S au cours du temps t est notée $x(t)$. Dans ce cas simple, les équations de continuité de la vitesse acoustique et de la pression acoustique s'expriment respectivement :

$$v_i + v_r = v_t = \dot{x} \quad (\text{C}) \quad \text{et} \quad p_i + p_r - p_t = m \ddot{x} \quad (\text{D})$$

(j) **Établir** la relation simple entre $\dot{x}$ et p_t .

Le résultat est immédiat (reprenant la réponse à la question (e)) :

$$\dot{x} = v_t = \frac{p_t}{Z}$$

En déduire la relation entre $\ddot{x}$ et p_t pour une onde harmonique.

Il suffit de dériver la relation précédente par rapport au temps :

$$\ddot{x} = \frac{d\dot{x}}{dt} = \frac{1}{Z} \frac{dp_t}{dt} = \frac{j\omega}{Z} p_t$$

Résoudre le système d'équations (C) et (D). **En déduire** l'expression de la pression transmise en fonction de la pression incidente.

(C) donne $p_i - p_r = p_t$

(D) donne $p_i + p_r - p_t = \frac{j\omega}{Z} p_t$

En combinant ces deux relations, il vient simplement :

$$2p_i - \left[2 + m \frac{j\omega}{Z} \right] p_t = 0 \quad \text{ou} \quad p_t = \frac{2}{\left[2 + m \frac{j\omega}{Z} \right]} p_i$$

(k) **En déduire les coefficients de transmission en amplitude de pression** $T_p = A_t/A_i$ **et en énergie** $T_E = I_t/I_i$.

En utilisant cette dernière relation, l'expression du coefficient de transmission en amplitude de pression est immédiate :

$$T_p = \frac{A_t}{A_i} = \frac{2}{2 + m \frac{j\omega}{Z}} = \frac{1}{1 + m \frac{j\omega}{2Z}}$$

Le coefficient de transmission en énergie est obtenu en calculant les intensités des pressions incidente et transmise (en reprenant les résultats de la question (h)) :

$$I_i = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [p_i \times v_i^*] = \frac{1}{2Z} |A_i|^2$$

$$I_t = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [p_t \times v_t^*] = \frac{1}{2Z} |A_t|^2$$

ce qui donne immédiatement :

$$T_E = \frac{I_t}{I_i} = \frac{|A_t|^2}{|A_i|^2} = \frac{1}{1 + \frac{m^2 \omega^2}{4Z^2}}$$

- (l) En considérant l'approximation $m\omega \gg 2Z$, **simplifier** l'expression du coefficient de transmission en énergie et **représenter** l'allure de ce coefficient en décibels (dB) en fonction de la pulsation ω . **Discuter** les performances de la surface rigide (qui peut être assimilée à un mur par exemple) en fonction de la fréquence. De la même façon, discuter les performances de la surface rigide en fonction de la masse surfacique m .

Si $m\omega \gg 2Z$ alors $\frac{m^2 \omega^2}{4Z^2} \gg 1$; Le coefficient de transmission en énergie s'écrit alors :

$$T_E = \frac{1}{1 + \frac{m^2 \omega^2}{4Z^2}} \approx \frac{1}{\frac{m^2 \omega^2}{4Z^2}} = \frac{4Z^2}{m^2 \omega^2}$$

L'allure de ce coefficient de transmission (en décibel) est donc de la forme $-10 \log v^2 = -20 \log v$ et présente donc une décroissance en -6dB par doublement de fréquence/pulsation (i.e. l'isolement augmente lorsque la fréquence augmente). Les performances de la surface en fonction de la masse surfacique suivent le même comportement (décroissance de -6dB par doublement de masse (i.e. l'isolement est d'autant plus important que la masse est élevée)).

- (m) Applications numériques : $r = 1.204 \text{ kg/m}^3$ et $c = 343.4 \text{ m/s}$ (à 20°C). **Calculer** la valeur du coefficient de transmission en énergie (en dB) à 100 Hz et 1000 Hz, pour un mur en béton de masse surfacique 200 kg/m^2 .

AN : -43.6 dB (environ -44 dB) à 100 Hz et -63.6 dB (environ -64 dB) à 1000 Hz

Partie n°4 : Propagation à travers un double vitrage (figure A3)

On s'intéresse enfin à la transmission acoustique d'une onde plane harmonique à travers un double vitrage, modélisé par deux surfaces en verre S_0 et S_L , de masse surfacique m , distantes d'une longueur L . L'espace entre les deux surfaces est rempli par un gaz d'impédance $Z_L = r_L c_L$. Le milieu semi-infini, de part et d'autre des surfaces en verre, est défini par une impédance $Z = rc$ (air). On note $x_0(t)$ le déplacement de la surface en S_0 et $x_L(t)$ le déplacement de la surface S_L . Le nombre d'onde est noté k_L entre les deux surfaces et k de part et d'autre.

- (n) En s'inspirant de la relation (C) donnée plus haut et des résultats de la question (j), **montrer** que les équations de continuité sur les surfaces S_0 et S_L s'écrivent :

$$\begin{cases} p_i - p_r = j v Z x_0 \\ p_1 - p_2 = j v Z_L x_0 \\ p_t = j v Z x_L \\ p_1 \exp(-jk_L L) - p_2 \exp(+jk_L L) = j v Z_L x_L \end{cases} \quad (E)$$

Les relations sont pratiquement immédiates : en s'inspirant de la relation (C), on a les relations de continuité suivantes pour la vitesse :

$$v_i + v_r = \dot{x}_0 \text{ à l'interface en } x=0, \text{ ce qui donne } p_i - p_r = Z \dot{x}_0 = j \omega Z x_0$$

$$v_1 + v_2 = \dot{x}_0 \text{ à l'interface en } x=0, \text{ ce qui donne } p_1 - p_2 = Z_L \dot{x}_0 = j \omega Z_L x_0$$

$$v_t = \dot{x}_L \text{ à l'interface en } x=L, \text{ ce qui donne } p_t = Z_L \dot{x}_L = j \omega Z_L x_L$$

$$v_1 + v_2 = \dot{x}_L \text{ à l'interface en } x=L, \text{ ce qui donne } p_1 \exp(-jk_L L) - p_2 \exp(+jk_L L) = Z_L \dot{x}_L$$

- (o) En s'inspirant de la relation (D) donnée plus haut, **montrer** que les équations de continuité pour la pression sur les surfaces S_0 et S_L s'écrivent :

$$\begin{cases} p_i + p_r - p_1 - p_2 = -m v^2 x_0 \\ p_1 \exp(-jk_L L) + p_2 \exp(+jk_L L) - p_t = -m v^2 x_L \end{cases} \quad (F)$$

Les relations sont pratiquement immédiates : en s'inspirant de la relation (D), on a les relations de continuité suivantes pour la pression :

$$p_i + p_r - p_1 - p_2 = -m \ddot{x}_0 \text{ à l'interface en } x=0, \text{ ce qui donne } p_i + p_r - p_1 - p_2 = -m v^2 x_0$$

$$p_1 \exp(-jk_L L) + p_2 \exp(+jk_L L) - p_t = m \ddot{x}_L \text{ en } x=L, \text{ soit } p_1 \exp(-jk_L L) + p_2 \exp(+jk_L L) - p_t = m v^2 x_L$$

On montre que le coefficient de transmission en amplitude de pression $T_p = A_t/A_i$ s'exprime par (il n'est pas demandé au candidat de retrouver cette expression) :

$$T_p = \frac{Z Z_L}{(Z + j m v) Z_L \cos(k_L L) + j \sin(k_L L) \times [(Z_L^2 + Z^2 - m^2 v^2)/2 + j m v Z]} \quad (G)$$

et que par ailleurs, le coefficient de transmission en énergie $T_E = I_t/I_i$ s'exprime par (il n'est pas demandé au candidat de retrouver cette expression) :

$$T_E = |T_p|^2 \quad (H)$$

(p) Applications à des cas particuliers :

1. L'espace entre les deux surfaces tend vers 0 (simple vitrage, $L \rightarrow 0$) ; **en déduire** la nouvelle expression du coefficient de transmission en énergie. **Comparer** avec l'expression obtenue à la question (j) et **discuter**.

Lorsque L tend vers 0, la relation (G) s'écrit simplement :

$$T_p = \frac{Z Z_L}{(Z + j m v) Z_L} = \frac{1}{1 + \frac{j m v}{Z}}$$

Soit, pour le coefficient de transmission en énergie (relation (H)) :

$$T_E = \frac{1}{1 + \frac{m^2 v^2}{Z^2}}$$

En comparant avec la relation obtenue à la question (k) $T_E = \frac{1}{1 + \frac{m^2 w^2}{4Z^2}}$, on voit

immédiatement que le double vitrage se comporte comme un simple vitrage de masse surfacique double, ce qui est logique.

2. L'espace entre les deux surfaces contient le même gaz qu'à l'extérieur (double vitrage avec de l'air, $Z=Z_L$) ; **en déduire** la nouvelle expression du coefficient de transmission en énergie.

Le calcul du module du coefficient de transmission en énergie de pression (à partir de la relation (G)) donne dans ce cas :

$$T_E = \left[1 + \frac{m^2 v^2}{Z^2} \cos^2 kL \right]^{-1}$$

3. Applications numériques : **calculer** les coefficients de transmission en énergie pour les deux cas précédents, à 100 Hz et 1000 Hz. $L=1$ cm, $m=2$ kg/m², $r=1.204$ kg/m³ ; $c=343.4$ m/s (à 20°C). **Comparer** et **discuter** les résultats.

Cas 1 : $T_E = -10.1$ dB à 100 Hz et -29.7 dB à 1000 Hz

Cas 2 : $T_E = -9.9$ dB à 100 Hz et -34.7 dB à 1000 Hz

Comme attendu, l'atténuation apportée par le double vitrage est meilleure qu'en simple vitrage, mais son efficacité est surtout vérifiée en « haute » fréquence.

Épreuve « Qualité des ambiances »

Session 2011

Partie « Thermique »

Une paroi, utilisée pour absorber de la chaleur et stocker de l'énergie solaire, est constituée d'un matériau à changement de phase (MCP) d'épaisseur e contenu dans une enveloppe métallique séparant le MCP des ambiances intérieures et extérieures.

Le MCP est une paraffine qui change de phase, solide vers liquide ou liquide vers solide, à la température T_f en absorbant ou cédant une quantité de chaleur L . En effet, lorsque la température du matériau est inférieure à T_f , le MCP est solide et, lorsque la température du matériau est supérieure à T_f , le MCP est liquide. Dans le MCP, les phases solide et liquide sont séparées par une interface supposée verticale (voir figure 1). Un mouvement dans la phase liquide induit un échange convectif entre, d'un côté, l'enveloppe métallique et le liquide et, de l'autre côté, entre les phases solide et liquide. Cet échange convectif est caractérisé par un coefficient h_m ; on supposera de plus que la phase liquide est à température homogène T_m .

La surface extérieure de la paroi est soumise à un flux solaire E . Les propriétés radiatives d'absorption de la paroi en courte et grande longueur d'onde sont données ci-après. L'environnement sera supposé se comporter comme un corps noir à la température intérieure et extérieure T_{int} et T_{ext} .

Hypothèses:

- Régime permanent,
- Transferts de chaleur par conduction unidirectionnels
- Résistance thermique et capacité calorifique de l'enveloppe négligeables
- L'environnement se comporte comme un corps noir

Données du problème:

- Température de changement de phase du MCP: $T_f = 30^\circ\text{C}$
- Chaleur latente de changement de phase du MCP: $L = 2000\text{J/kg}$
- Conductivité thermique du MCP solide: $k_{MCP} = 0,2\text{W/mK}$
- Masse volumique du MCP liquide: $\rho_{MCP} = 900\text{kg/m}^3$
- Capacité calorifique massique du MCP liquide: $C_{MCP} = 1000\text{J/kgK}$
- Coefficient d'échange convectif dans le MCP en phase liquide: $h_m = 10\text{W/m}^2\text{K}$

- Coefficient d'absorption courte longueur d'onde ($\lambda < 2,5\mu\text{m}$) de l'enveloppe métallique: $\alpha_{\text{CLO}}=0,6$
- Coefficient d'absorption grande longueur d'onde ($\lambda > 2,5\mu\text{m}$) de l'enveloppe métallique: $\alpha_{\text{GLO}}=0,8$
- Coefficient d'échange convectif intérieur: $h_{\text{int}}=5\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
- Coefficient d'échange convectif extérieur: $h_{\text{ext}}=25\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
- Température extérieure: $T_{\text{ext}}=25^\circ\text{C}$
- Température intérieure: $T_{\text{int}}=20^\circ\text{C}$
- Flux solaire normal à la paroi: $E=800\text{W}/\text{m}^2$
- Constante de Stefan-Boltzmann: $\sigma=5,67.10^{-8}\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$

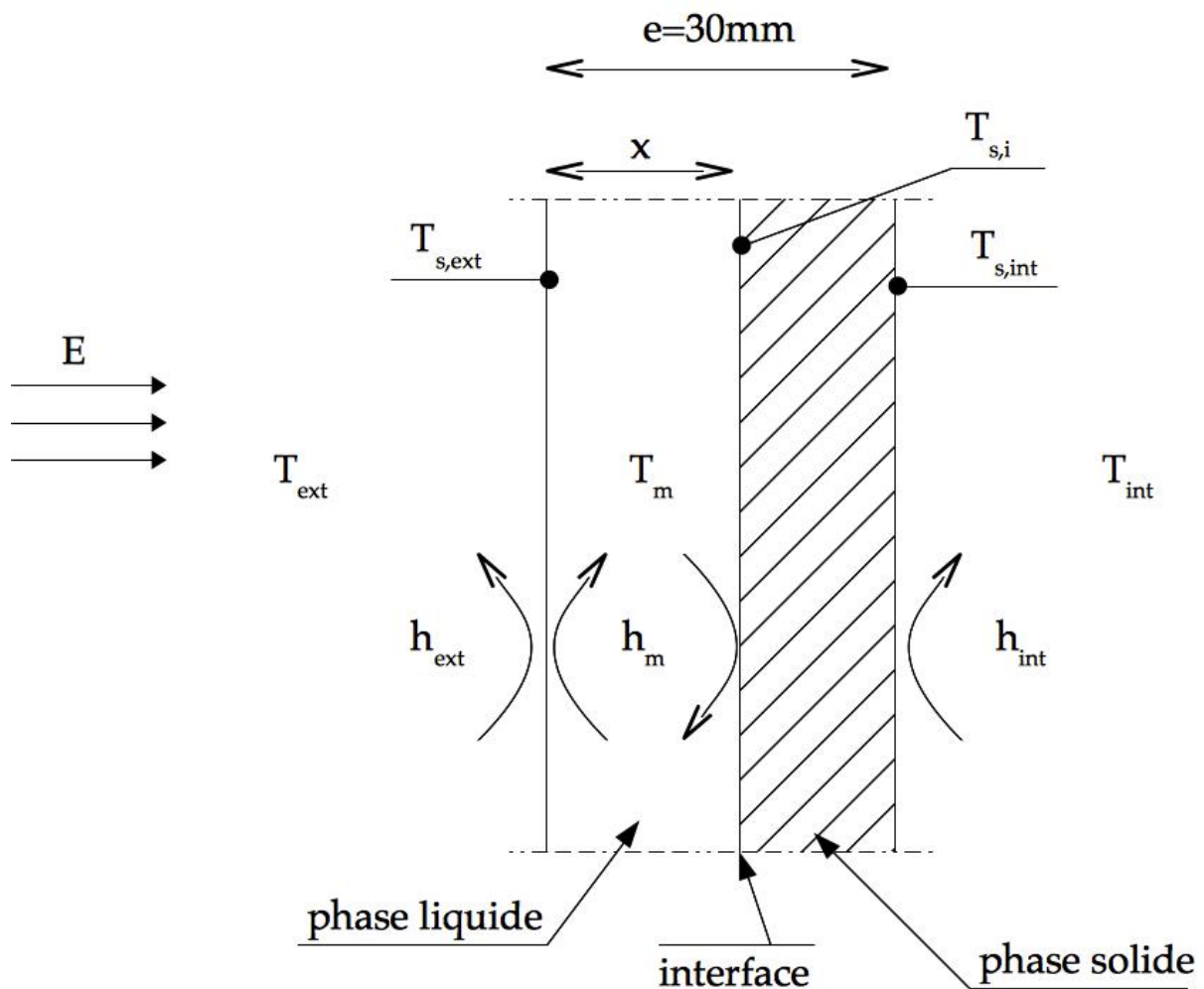


Figure 1: Schéma de la paroi étudiée

Partie A: Dans cette partie, la paroi n'est pas soumise à l'ensoleillement

1°) Justifier qualitativement le fait que le matériau soit entièrement en phase solide.

Éléments de correction:

$T_{ext} < T_f$ et $T_{int} < T_f$: la température dans la paroi est donc $< T_f$ et il n'y pas de phase liquide possible

2°) Expliquer quels sont les différents phénomènes de transfert de chaleur mis en jeu entre la paroi et son environnement.

Éléments de correction:

- échanges convectifs entre la paroi et l'air
- échanges radiatifs grande longueur d'onde entre la paroi et l'environnement

3°) Donner l'expression analytique de la densité de flux net radiatif $\varphi_{r,int}$ (en W/m²) sortant de la paroi et échangé avec l'environnement, exprimer celui-ci sous la forme:

$$\varphi_{r,int} = h_{r,int} (T_{s,int} - T_{int})$$

Donner l'expression de $h_{r,int}$.

Éléments de correction:

La surface étant grise le flux net radiatif s'écrit:

$$\varphi_{r,int} = \sigma \varepsilon (T_{s,int}^4 - T_{int}^4) = h_{r,int} (T_{s,int} - T_{int})$$

Le coefficient d'échange radiatif peut alors s'écrire sous la forme:

$$h_{r,int} = \sigma \varepsilon (T_{s,int}^2 + T_{int}^2) (T_{s,int} + T_{int})$$

4°) En supposant que $T_{s,int} \approx T_{int}$ (en Kelvin), calculer $h_{r,int}$.

Éléments de correction:

Application numérique de l'expression précédente:

$$h_{r,int} = 4,6 W / m^2 K$$

5°) En utilisant la même méthodologie que précédemment, donner la valeur numérique de $h_{r,ext}$.

Éléments de correction:

Avec la même méthodologie que dans les deux question précédentes:

$$h_{r,ext} = \sigma \varepsilon (T_{s,ext}^2 + T_{ext}^2) (T_{s,ext} + T_{ext})$$

$$h_{r,ext} = 4,8 W / m^2 K$$

Dans la suite du problème (Parties A, B et C), on prendra $h_{r,ext} = h_{r,int} = h_r = 5 W / m^2 K$.

6°) Donner l'expression analytique de la densité de flux conductif φ_1 (en W / m^2) traversant la paroi de l'extérieur vers l'intérieur. Donner sa valeur numérique.

Éléments de correction:

L'analogie électrique doit être utilisée pour répondre à cette question. Les échanges radiatif et convectif à la paroi (intérieure ou extérieure) peuvent être représentés par deux résistances en parallèle, chaque résistance étant égale à $1/h$.

$$\varphi_1 = \frac{T_{ext} - T_{int}}{\frac{1}{h_r + h_{ext}} + \frac{e}{\lambda_{mcp}} + \frac{1}{h_r + h_{int}}} = 17,6 W / m^2$$

7°) Donner les valeurs de $T_{s,int}$ et $T_{s,ext}$.

Éléments de correction:

En utilisant l'analogie électrique, il est possible de déterminer les températures de surface:

$$T_{s,ext} = T_{ext} - \frac{\varphi_1}{h_r + h_{ext}} = 24,4^\circ C$$

$$T_{s,int} = T_{int} + \frac{\varphi_1}{h_r + h_{int}} = 21,8^\circ C$$

8°) Evaluer l'erreur commise sur $T_{s,int}$ et $T_{s,ext}$ lorsque l'on néglige la résistance thermique de la coque métallique. L'épaisseur de la tôle métallique est de 2mm et sa conductivité 100W/mK.

Éléments de correction:

Avec la résistance supplémentaire et en prenant en compte la coque métallique:

$$\Delta\varphi_1 = 1,2 \cdot 10^{-3} W / m^2$$

et:

$$\Delta T_{s,int} = -4 \cdot 10^{-5} ^\circ C$$

$$\Delta T_{s,ext} = 10^{-4} ^\circ C$$

Partie B: Dans cette partie, l'ensoleillement n'est pas nul et il existe donc une phase liquide dans la paroi

9°) Expliquer les phénomènes de transfert de chaleur dans la paroi.

Éléments de correction:

- Transfert de chaleur par conduction dans la phase solide
- Transfert de chaleur par convection dans la phase liquide

10°) Donner les conditions de continuité à l'interface liquide/solide. Quelle est la température à l'interface?

Éléments de correction:

Conditions de continuité à l'interface sont:

- Continuité de la température
- Continuité du flux

De plus, à l'interface, on a $T = T_f$.

11°) Donner l'expression analytique de la densité de flux de chaleur φ_2 (en W/m^2) traversant l'interface vers la phase solide en fonction de T_{ext} et $T_{s,i}$. Donner sa valeur numérique.

Éléments de correction:

Le flux solaire est absorbé au niveau de la surface de la paroi extérieur. Ce flux peut être modélisé, en analogie électrique, par un générateur de courant d'intensité αE .

$$\varphi_2 = \left(\alpha E + (T_{ext} - T_f) h_{eq} \right) \left(1 + 2 \frac{h_{eq}}{h_m} \right)^{-1} = 47,1 W / m^2$$

$$h_{eq} = h_r + h_{ext}$$

12°) Calculer la valeur de T_m .

Éléments de correction:

$$T_m = T_f + \frac{\varphi_2}{h_m} = 34,7^\circ C$$

13°) Calculer la valeur de l'épaisseur de la phase liquide x .

Éléments de correction:

$$x = e - \lambda \left(\frac{T_f - T_{\text{int}}}{\varphi_2} - \frac{1}{h_{eq}} \right) = 7,5 \text{ mm}$$

Partie C: Dans cette partie, la paroi n'est pas soumise à l'ensoleillement et le régime est instationnaire

14°) On suppose que l'ensemble de la paroi est en fusion à la température $T_m=50^\circ C$. Calculer le temps nécessaire à la paroi pour atteindre le début de la solidification.

Éléments de correction:

C'est le cas du corps à température uniforme qui échange par convection et rayonnement. Ces transferts de chaleur vers l'extérieur provoquent la diminution de la température du matériau à changement de phase.

$$T_m(t) = (T_m(t=0) - T_\infty)e^{-t/\tau} + T_\infty$$

$$\tau = \frac{\rho_{MCP} C_{MCP} e}{R_{int} + R_{ext}}$$

$$T_\infty = \frac{T_{int} R_{int} + T_{ext} R_{ext}}{R_{int} + R_{ext}}$$

$$R_{int} = \frac{1}{\frac{1}{h_m} + \frac{1}{h_r + h_{int}}}$$

$$R_{ext} = \frac{1}{\frac{1}{h_m} + \frac{1}{h_r + h_{ext}}}$$

$$t = 1,35\tau = 2915s$$

Rapport sur l'épreuve de qualité des ambiances

Partie « Acoustique »

Seul 50% des candidats ont abordé le sujet d'acoustique, sachant par ailleurs qu'une grande partie de ces candidats s'est limité aux deux premières parties du problème, représentant un peu moins de la moitié des points du sujet. Néanmoins, un certain nombre de candidats ont abordé l'ensemble des parties, et ont finalement obtenu une note autour de la moyenne.

L'énoncé ne comportait aucun piège. Par ailleurs, les solutions ne demandaient que très peu de lignes de développement, la solution étant souvent directe et bien orientée dès l'énoncé.

Dans le détail :

- o La partie 1 du sujet était essentiellement un rappel théorique sur la notion d'onde plane, dont la seule « complexité » était de rappeler l'expression générale de la pression acoustique pour une onde plane progressive, en notation complexe, afin d'en déduire les expressions de la vitesse acoustique et de l'intensité acoustique. Cette partie a été globalement réussie par l'ensemble des candidats ayant abordé le sujet d'acoustique ;
- o La seconde partie était destinée à développer le cas des ondes réfléchies et transmises à l'interface entre deux milieux (interface immobile), en se basant essentiellement sur les expressions obtenues à la première partie. Un certain nombre de candidats s'est trompé sur les signes de la vitesse acoustique et de l'intensité acoustique de l'onde réfléchie (onde retour), ainsi que sur l'équation de continuité de la vitesse. La plupart a su toutefois retrouver sur les bonnes expressions ;
- o La troisième partie était une extension de la seconde partie (dont elle reprenait un certain nombre de résultats), considérant une surface rigide à l'interface entre deux milieux (application au simple vitrage), surface pouvant être assujettie à un déplacement. L'objectif de cette partie était de déterminer les expressions des coefficients de transmission et de réflexion en pression et en énergie. Cette partie a été peu traitée ;
- o Enfin, la quatrième partie était une application au cas du double vitrage. Il est dommage que très peu de candidats aient abordé cette partie, alors que l'énoncé donnait clairement les pistes pour trouver les solutions, qui, par ailleurs, étaient données. La dernière question ne nécessitait aucun développement, mais juste une « application numérique » de l'expression du coefficient de transmission en énergie donnée dans l'énoncé, suivi d'une discussion. Il est regrettable que très peu de candidats aient abordée cette partie, alors qu'elle permettait d'obtenir des points sans difficulté.

Partie « Thermique »

Le sujet de thermique a été abordé par environ 80% des candidats. Même s'il ne présentait pas de difficultés particulières, peu de candidats ont réussi à dépasser la partie A. D'un point de vue général, les réponses n'ont pas été à la hauteur des attentes des correcteurs.

La partie A traite tout d'abord des échanges en grande longueur d'onde entre les surfaces et l'environnement extérieur/intérieur. Nombre de candidats n'ont pas compris que les surfaces sont grises et ce que cela implique sur les transferts radiatifs. Le traitement des échanges dans la paroi a été sujet à de nombreuses erreurs notamment au niveau des échanges radiatifs/convectifs à la paroi (voir question 6). Il est vivement conseillé aux candidats de réaliser un schéma avant d'écrire de nombreuses équations.

Dans la partie B, la surface extérieure de la paroi est soumise à un ensoleillement. Dans ce cas, une partie du flux solaire est absorbée correspondant à aE , a étant le coefficient d'absorption en courte longueur d'onde. Cette notion physique simple ne semble pas l'être pour tout le monde !

La partie C n'a quasiment pas été traitée par les candidats.

Sujet 2011 – Géotechnique et environnement Eléments de correction

La géologie du site

1) *A quelle famille de roche appartiennent les calcaires ? Quel est leur constituant principal ? Quelle différence faites-vous entre calcaires et marnes ? Décrire un test simple permettant de mettre en évidence une roche calcaire*

Un calcaire est une roche sédimentaire carbonatée contenant au moins 50% de calcite, pouvant être accompagné d'un peu de dolomite, d'aragonite... Les calcaires sont de faible dureté (on peut les rayer au couteau acier), et font effervescence (dégagement bouillonnant de gaz carbonique) à froid sous l'action d'un acide dilué.

Une marne est constituée d'un mélange de calcaire et d'argile (35 et 65%), formant la transition entre calcaires argileux (ou calcaires marneux, 5 à 35 % argile) et les argiles calcaireuses (ou marnes argileuses, 65 à 95 % d'argile) .

2) *Décrire les conditions usuelles de formation des roches calcaires*

Les calcaires peuvent se former en milieu continental (tufière, stalactites, stalagmites), lacustre, ou le plus souvent en milieu océanique par sédimentation. . . .

3) *Décrire le phénomène de karstification des massifs calcaires. Quels types de problèmes ce phénomène peut il poser pour la réalisation des ouvrages de génie civil ?*

La karstification consiste en l'ouverture de cavités souterraines due à l'érosion des massifs calcaires. Cette érosion s'initialise dans les fissures qui s'élargissent, puis finissent par créer de grosses cavités (aussi rivières souterraines, ...). La karstification pose problème lorsqu'elle est proche, ou remonte vers la surface : création d'effondrement « karstiques », aussi effondrement des cavités par apport de charges (idem carrières souterraines, ...)

Nature et caractéristiques des matériaux

4) *Donner les expressions générales des contraintes verticales et horizontales au point M situé à la profondeur z, en fonction de la profondeur z_w de la nappe ? Tracer dans le plan de Mohr, les représentations des états de contraintes totale et effective résultants.*

Introduire le coefficient de poussée des terres au repos K_0 , tracer des cercles (états de contraintes dans le plan de Mohr), n'importe quel cercle qui est dans le critère (non tangent) en contraintes effectives, le cercle en contrainte totale étant décalé de la pression u vers des pressions supérieures.

Le diamètre du cercle dépend de K_0

5) *Déterminer le poids volumique du sol γ et la profondeur de la nappe z_w sachant qu'à la profondeur $z = 4,5\text{m}$ la contrainte verticale effective et la contrainte horizontale totale valent respectivement 60,5 kPa et 55,3 kPa.*

On prendra pour valeur du coefficient de poussée la valeur 0,5. Tracer dans la représentation de Mohr les cercles correspondants en contrainte totale et effective.

$$\sigma'_v = 60,5 \text{ kPa}$$

$$\sigma_H = 55,3 \text{ kPa}$$

$K_0 = 0,5$, coefficient de poussée des terres au repos.

On obtient un système 2*2 à résoudre avec les équations établies à la question précédente.

$$4,5 * \gamma + z_w * 10 = 105,5$$

$$2,3 * \gamma - z_w * 5 = 32,8$$

D'où $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ et $z_w = 2 \text{ m}$

6) Un échantillon de matériau a été prélevé à cette profondeur de 4,5 m. Le poids spécifique des grains est égal à $26,5 \text{ kN/m}^3$. On mesure son poids volumique sec $\gamma_d = 16,8 \text{ kN/m}^3$. Son poids volumique total γ a été déterminé à la question précédente (prendre $19,5 \text{ kN/m}^3$ si question 5 non traitée). Déterminer l'indice des vides, l'état de saturation de l'échantillon, et sa teneur en eau.

L'indice des vides e est donné par $e = V_v/V_s$ où V_v volume des vides et V_s volume des grains de sol, on a $e = (\gamma_s - \gamma_d)/\gamma_s = (26,5 - 16,8) / 26,5 = 0,58$

$$e = 0,58$$

L'état de saturation de l'échantillon est défini par son degré de saturation $S_r = V_w/V_v$ avec V_w volume des vides occupé par l'eau.

$$w = 13,1 \% \text{ (avec } \gamma = 19) \text{ ou } w = 16\% \text{ (avec } \gamma = 19,5),$$

$$S_r = 73,7 \%$$

Un forage avec essai pressiométrique tous les 1,5 m puis tous les 1m en profondeur a été réalisé pour effectuer la reconnaissance en profondeur. Les résultats du forage sont donnés figure 2.

L'essai réalisé à 4,5 m de profondeur a donné les résultats fournis tableau 1.

p désigne la pression lue au manomètre supposé à 1m au dessus du terrain naturel (TN).

DV_{30} et DV_{60} sont les volumes injectés respectivement à 30s et 60s durant chaque palier de pression.

La courbe d'étalonnage de la sonde est donnée tableau 2. On considérera un volume initial de la sonde $V_s = 530 \text{ cm}^3$.

Tableau 1 : essai pressiométrique à 4,5m

N° palier	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p \text{ (kPa)}$	50	100	150	200	300	400	500	650	800	950
$DV_{30} \text{ (cm}^3\text{)}$	5	50	85	95	120	135	160	200	370	500
$DV_{60} \text{ (cm}^3\text{)}$	40	75	90	105	125	140	180	250	450	800

Tableau 2 : Etalonnage de la sonde

N° palier	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p \text{ (kPa)}$	30	60	90	120	150	180	210			
$DV \text{ (cm}^3\text{)}$	30	65	110	170	270	430	780			

7) Décrire le principe de l'essai pressiométrique. On s'aidera d'un schéma explicatif clair et on précisera en particulier les modalités et les objectifs des opérations d'étalonnage et de calibrage de la garde.

L'essai pressiométrique consiste à introduire dans le sol un appareil d'essai (la sonde

pressiométrique) constitué d'une cellule de mesure placée entre deux cellules de garde. Cette sonde pressiométrique est reliée en surface à un contrôleur pression volume qui permet de maintenir une pression donnée dans la cellule de mesure en injectant le volume de liquide nécessaire. L'essai consiste à appliquer au sol par l'intermédiaire de la cellule de mesure des paliers successifs de pression de 1 min chacun, en mesurant V30 et V60, les volumes qu'il est nécessaire d'injecter dans la cellule de mesure pour maintenir la pression souhaitée à 30 s et 60 s respectivement. La sonde est préalablement calibrée et étalonnée (détermination de l'inertie de la cellule).

On représente la variation de volume en fonction de la pression de palier, ce qui donne une courbe brute. Cette courbe brute est ensuite corrigée en fonction de l'étalonnage et du calibrage de la sonde, mais aussi en tenant compte de la hauteur de la colonne d'eau entre le manomètre en surface et le milieu de la sonde de mesure.

8) *Réaliser le dépouillement de l'essai fait à 4,5m et en déduire les caractéristiques pressiométriques du sol dont la nomenclature sera précisée.*

Pression limite nette p_l

Pression de fluage p_f

Module pressiométrique EM

On en déduit $\Delta V_{LM} = V_s + 2 \cdot \Delta V_o = 530 + 2 \times 100 = 730 \text{ cm}^3$.

Sur la courbe pressio-volume corrigée en fonction de l'étalonnage de la hauteur de la colonne d'eau, on lit un ordre de grandeur de $p_l = 780 \text{ kPa}$ pour cette valeur de volume.

Le module pressiométrique est donné par :

$EM = 2 \cdot (1 + 0,33) \cdot (530 + (100 + 150)/2) \times (430 - 140)/(150 - 100) = 10,1 \text{ MPa}$.

9) *Afin de mesurer la perméabilité des marnes très altérées, un essai de perméabilité à l'eau de type Lefranc est réalisé. Donner les différents essais de perméabilité existants. Décrire les quatre types d'essai Lefranc et leur mode de réalisation. Donner un ordre de grandeur de la perméabilité des sols : sable, argile, marne ...*

Essais Lugeon,

Essais à l'anneau, au double anneau, pour sol en surface...

Essais Lefranc

Essai à charge variable

Essai à charge contrainte (fixe)

Essai par pompage

Essai par injection

Sols perméables, sables 10^{-3} à 10^{-6} , unité m/s

Sols imperméables, argiles 10^{-8} à 10^{-10} , voir 10^{-12} m/s (argiles compactées pour noyau de barrage)

Marnes sont un matériau à perméabilité intermédiaire plutôt perméable, donc de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-7} , en fonction de leur fracturation

10) *Un essai Lefranc est réalisé entre 2 et 4m de profondeur dans un forage de 116mm de diamètre. Le niveau de l'eau dans le forage est positionné en $t = 10$ minutes, valeur initiale de l'essai à 3.7m de profondeur par rapport au TN.*

Le tableau 3 donne l'évolution de la profondeur du niveau de l'eau dans le forage en fonction du temps.

Préciser le type d'essai réalisé. Quelle est la perméabilité mesurée des marnes altérées ?

Tableau 3 Résultat d'essai de perméabilité.

<i>T (min)</i>	0	10	11	12	14	18	25	40	55
<i>Profondeur (m)</i>	2	3.70	3.69	3.68	3.65	3.59	3.45	3.00	2.16

Il s'agit d'un essai Lefranc de type charge variable car le niveau de l'eau change. Si on représente le temps par rapport à l'origine de la remontée de la nappe ($t_0=10\text{mn}$) en fonction de la variation de la charge hydraulique (avec $Dh_0=0,3\text{m}$) en diagramme semi log , on obtient une droite dont la pente vaut S / mkB , S section de la lanterne ($S = 0,01 \text{ m}^2$), B diamètre de la lanterne ($B=0,116\text{m}$), L longueur de la lanterne ($L = 2\text{m}$), m coefficient de forme $m = (2\pi L/B) / \ln(2L/B)$
On obtient une perméabilité $k = 1.9 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$

Le projet, conception et vérification

Appui d'ouvrage sur fondation superficielle

On se propose d'étudier l'appui de l'ouvrage considéré.

11) Décrire les dispositions constructives possibles à mettre en œuvre pour réaliser l'appui en supposant que la nappe se trouve à 2 m de profondeur par rapport au TN.

Pb : l'eau car il faut terrasser jusqu'au niveau de fond de fouille pour mettre la fondation, légèrement plus bas pour mettre en place un gros béton...

Solution : pompage par puits afin de baisser le niveau de la nappe pour les travaux, batardeau avec ou sans pompage pendant la phase travaux en fonction de la perméabilité des sols et niveau de fonçage des batardeaux

12) On suppose dans ce qui suit que $p_l = 780 \text{ kPa}$, et $E_m = 10 \text{ MPa}$ pour l'essai à 4.5m de profondeur. Déterminer la contrainte ultime q_u sous une semelle de 3m de largeur et de 10m de longueur soumise à une charge verticale centrée. En déduire la contrainte de référence aux états limites ultimes $q(ELU)$ et aux états limites de service $q(ELS)$

$$Q(ELU) = 0.5 * q_u$$

$$Q(ELS) = 0.33 * q_u$$

Compte tenu des caractéristiques pressiométriques obtenues, on peut proposer d'assimiler les marnes très altérées à des argiles B : classe de sol Argiles B :

Même si les pressions limites mesurées sont un peu faibles (0.5 à 0.9 MPa).

En utilisant la méthodologie du fascicule 62 fournie, avec utilisation du pressiomètre, on obtient

$$q_u = 1.02 * 0.67 = 0.68 \text{ MPa}$$

$$q(ELU) = 0.5 * 680 = 340 \text{ kPa}$$

$$q(ELS) = 0.33 * 680 = 220 \text{ kPa}$$

13) On étudie la réalisation de la semelle de fondation de l'appui à 4m de profondeur à l'abri d'un batardeau en palplanches, dont la profondeur de mise en place par rapport au TN est préfixée à 7m (voir figure 3)

Montrer en écrivant l'équilibre des forces de poussée et butée éventuelles à long terme du rideau la nécessité de butonage du batardeau. En quoi consiste le butonage, préciser son mode de réalisation en fonction du phasage des travaux. Que ce passe-t-il si le niveau d'eau monte au PHEC durant les travaux ?

$$\text{Coefficient actif (de poussée)} : k_a = \tan^2(\pi/4 - f/2)$$

$$\text{Coefficient passif (de butée)} : k_p = \tan^2(\pi/4 + f/2),$$

On effectue le batardeau au complet, tout le tour de la fouille sans excaver.

On excave ensuite en faisant pour des profondeurs prévues le butonnage (cadre) d'un rideau sur l'autre.

La configuration la plus défavorable pour l'écran est obtenue en posant que compte tenu du butonnage à l'avancement d'un écran en support sur l'autre et par symétrie, le déplacement est nul et donc qu'un état mixte entre l'état au repos K_0 et l'état en poussée avec K_a est mobilisé.

Si état k_0 , la cohésion n'apporte pas son effet positif ($- 2 \text{ racine } K_a$).

La butée de pied sera difficilement mobilisable compte tenu des faibles déplacements attendus.

14) On considère la nappe au niveau PHEC (figure 3), dans lequel la zone de l'appui est inondée, avec 1m au dessus du TN.

On admet avoir mis en œuvre les dispositions constructives nécessaires pour assurer la stabilité mécanique du batardeau dans cette configuration géométrique.

Dessiner le réseau d'écoulement à proximité du rideau de palplanches dans une configuration d'écoulement plan correspondant au centre de la fouille.

Estimer le débit potentiel attendu par ml de rideau dans le batardeau.

On trace le réseau des équipotentielle et lignes de courant sur le graphique fourni en respectant la règle de forme (maillage carré !).

Le débit est donné par $Q = k \frac{a}{b} \frac{nq}{nh} (H_0 + H_1)$

$a=b$ par construction (maillage carré)

nq nombre tubes de courant par exemple $nq = 4$

nh nombre d'intervalles entre équipotentielles, $nh = 8$ pour respecter maillage carré

$H_0 + H_1 = 5 \text{ m}$

$k = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$

Il vient $Q = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s/ml}$ de batardeau soit 18 l/h .

15) Vérifier la stabilité au soulèvement du fond de fouille en négligeant le frottement du sol sur le rideau de palplanche. Afin d'assurer la stabilité de cette fouille pendant les travaux, quelles solutions peut on envisager ? Proposer au moins une solution à mettre en œuvre en urgence si l'instabilité se déclare en phase chantier.

L'instabilité est causé par la pression hydraulique sous le bouchon si le sol est trop imperméable, ou par le gradient hydraulique trop fort si il y a écoulement et création du phénomène de Renard La stabilité peut être assurée si le poids du « bouchon » W est supérieur à la pression U ,

soit $(W = \gamma H_1 S) > (U = \gamma_w H_2 S)$;

$H_1 = 3 \text{ m}$

$H_2 = 8 \text{ m}$

On constate l'instabilité. Solutions :

Augmenter le poids

Pompage en dessous pour baisser la pression

Injection pour baisser la perméabilité si arrivée d'eau trop forte, si poids suffisant

16) En considérant que la semelle fondée à 4m puisse être réalisée (question 12), elle reprendra l'appui central d'un ouvrage à deux travées symétriques de 40m de longueur totale. Le tassement maximal sous les culées a été estimé à 6mm.

Calculer les tassements attendus sous cette semelle pour une charge totale verticale centrée de 200kPa.

Cette solution de fondation superficielle est elle admissible vis-à-vis des tassements différentiels ?

En utilisant la méthode de calcul des tassements donnés en annexe à partir du Fascicule 62, et de la méthode pressiométrique :

On estime un tassement de $s = 30 \text{ mm}$.

Le tassement différentiel $\Delta s = 30 - 6 = 24$ mm est supérieur au millième de la portée communément admise pour limite pour les ouvrages d'art. La solution de fondation superficielle n'est donc pas admissible vis-à-vis du tassement différentiel entre appuis.

Appui d'ouvrage sur fondations profondes

On considère dans ce qui suit que l'appui de l'ouvrage est fondé sur pieux forés.

17) Décrire les méthodes constructives pour la réalisation de pieux forés. Dans le cas particulier d'une stabilisation dite « à la boue », de quoi est composée la boue de forage et quels sont ces rôles principaux ?

Pieux forés stabilisés par tubage (tubés), le tubage peut être laissé ou enlevé (ce qui est réalisé pour faibles profondeurs), pieux forés stabilisés à la boue « mélange ciment bentonite eau », Ces pieux appartiennent à la famille de mise en œuvre sans refoulement : le sol est excavé et devra être évacué.

Le rôle de la boue est la tenue de la paroi du pieu pendant la réalisation : paroi latérale mais fond de trou (pointe) ; le sol ne doit pas être trop perméable, sinon risque de perte de boue, voir de non stabilisation. Un second rôle est l'évacuation du curage de la pointe lors du percement ; la boue est en circuit ; elle peut évacuer les « cutting du dispositif de creusement ».

Le système tubage et boue peut être associé si sol trop perméable.

Pour des creusements dans les nappes des conditions environnementales peuvent être imposées pour « non pollution » imposant le tubage.

18) Pour un pieu de 1m de diamètre dont la pointe est établie à 11m de profondeur au droit du forage décrit figure 2 :

Calculer l'effort mobilisable par la pointe

Calculer l'effort mobilisable par frottement latéral (on négligera le frottement du sol sur le pieu jusqu'à la profondeur de 2m

Calculer les charges limites du pieu en compression et en traction

Calculer les charges de fluage du pieu en compression et en traction

La nomenclature des efforts était volontairement pas donnée et était à rechercher dans les documents fournis.

Calcul de Q_{pu} , l'effort mobilisable par la pointe :

A 11m de profondeur $p_{le}^* = 5$ MPa

Dans les marnes et marno calcaires $k_p = 1.8$

Donc $Q_u = 0.785 * 1.8 * 5 = 7$ MPa

Calcul de Q_{su} , l'effort mobilisable par frottement latéral :

De 2 à 6m : classe de pieu Q1 (argile B) ; $p_l = 0.7$ à 0.9 MPa ; $q_s = 30$ kPa

De 6 à 8m : classe de pieu Q1 (Argile C) ; $p_l > 2.7$ MPa ; $q_s = 50$ kPa

De 8 à 11m : classe pieu Q1 (Marne B) ; $p_l = 5$ MPa ; $q_s = 160$ kPa

$Q_{su} = 3.14 (4*30 + 2*50 + 3*160) = 1700$ kPa = 1.7 MPa

Charges limites Q_u et Q_{tu} , les charges limites du pieu en compression et en traction

$Q_u = Q_{pu} + Q_{su} = 7 + 1.7 = 8.7$ MPa

$Q_{tu} = Q_{su} = 1.7$ MPa ; la pointe n'est pas mobilisable en traction

Charges de fluage Q_c et Q_{tc} , charges de fluage du pieu en compression et en traction (sans refoulement du sol, pieux forés)

$Q_c = 0.5 * Q_{pu} + 0.7 * Q_{su} = 0.5 * 7 + 0.7 * 1.7 = 4.7$ MPa

$Q_{tc} = 0.7 Q_{su} = 0.7 * 1.7 = 1.2$ MPa

19) L'appui est réalisé sur pieux de 1m de diamètre. Ces pieux ont été équipés pour pouvoir effectuer une auscultation par la méthode sonique par transparence.
Décrire cette méthode d'auscultation et l'équipement du pieu nécessaire à la mise en œuvre de cette méthode.

Pour un diamètre de pieu de 1m, 3 tubes doivent équiper la cage d'armature, tout le long du pieu. Ces tubes métalliques sont parallèles entre eux, creux et bouchés pendant bétonnage pour ne pas être rempli de béton.

Ces tubes sont remplis d'eau avant essais.

On descend une sonde émettrice dans un des tubes et on mesure dans une sonde réceptrice au même niveau le signal reçu. Les tubes doivent être bien parallèles et les sondes remontées simultanément.

Si défaut dans le béton (vide généralement, ou sol, ou boue résiduelle, ...), on constate une anomalie en terme de temps de réponse.

Afin de tester toutes les zones, on réalise les mesures entre tous les couples de tubes.

20) Les figures 4 à 6 représentent les résultats types de ce type d'auscultation sonique par transparence.

Commenter ces résultats en précisant quels types d'information ils fournissent.

Calculer la vitesse de propagation du son dans le béton en se basant sur les mesures effectuées entre 7 et 10m de profondeur et en considérant une distance de mesure entre sonde de 350 mm

Comment peut-on expliquer l'allure des courbes dans les zones hachurées ?

Quelles sont les conséquences pour la capacité portante attendue du pieu, quelle méthode de réparation proposeriez-vous ?

Vitesse = distance / temps de propagation (donné sur les graphiques (en 10^{-6} sec)) :

$$V = 0.35 \text{ m} / 110 \cdot 10^{-6} \text{ s} \approx 3200 \text{ m/s}$$

Les perturbations identifiées par un ralentissement des ondes sonores indiquent une pollution du béton.

Les zones identifiées sont à la pointe du pieu ; il y aura donc perte de portance en pointe, très préjudiciable car, comme les calculs l'ont montrés question 19, la grande partie de la capacité portante du pieu est amenée par sa pointe.

De gros problèmes potentiels pour la stabilité de l'appui. Il faut « réparer ».

Il faut aller injecter à la base du pieu : forage dans le pieu existant jusque la pointe (en utilisant un prétubage prévisionnel ou ceux utilisés pour les mesures soniques), puis injection basse pression.

Ce type de problème est à éviter car de gros surcoût en perspective.

ANNEXES

Calcul de la pression limite nette équivalente

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

2.1. - Fondations superficielles

2.1.1. - Terrain homogène

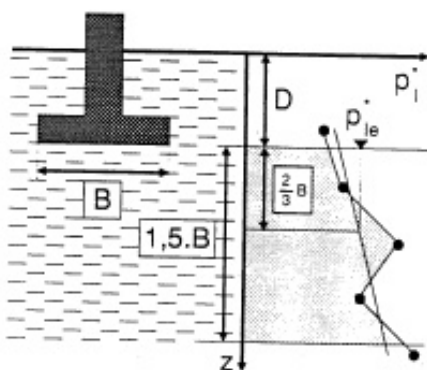
Le terrain est constitué sous la fondation, jusqu'à une profondeur d'au moins $1,5 \cdot B$, d'un même sol, ou de sols de même type et de caractéristiques comparables.

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 :

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



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.

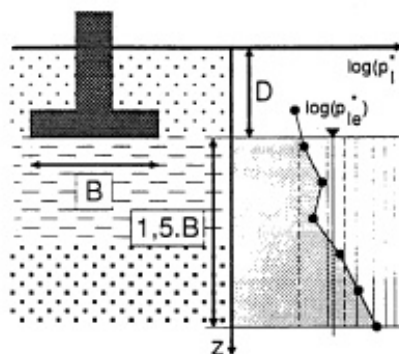
Pour le calcul de p_{le}^* , après avoir éventuellement éliminé les valeurs singulières (dûes, par exemple, à la présence de blocs ou concrétions), on procède à une moyenne géométrique sur la tranche de sol $[D; D + 1,5 \cdot B]$:

$$p_{le}^* = \sqrt[n]{p_{i1}^* \cdot p_{i2}^* \cdot \dots \cdot p_{in}^*}$$

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

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

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



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

Composition de Géotechnique et Environnement

Rapport du jury – session 2010-2011

Les membres du jury proposaient aux candidats une problématique permettant des développements des fondamentaux de la mécanique des sols en direction de l'identification et la caractérisation des matériaux géotechniques, en direction de l'interaction sol-structures, des techniques de réalisation des ouvrages.

Sur la base d'un projet de réalisation des appuis d'un ouvrage d'art, la composition traitait des aspects relatifs :

- *à la connaissance de la géologie du site,*
- *à la reconnaissance géotechnique et à l'interprétation des données résultantes,*
- *à la compréhension des 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 aux contrôles de bonne réalisation.*

Le sujet, organisé en 20 questions, était rédigé pour que les différentes parties puissent être traitées de manière relativement indépendante.

Le nombre de candidats ayant composé est de 98, sur 106 candidats ayant composé sur le sujet global de géotechnique et qualité des ambiances. Les candidats ont été notés sur 10 points.

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

- l'importance de rédiger sa copie, 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 encore attirée sur l'avantage qu'ils trouvent à procéder à une lecture attentive et complète du sujet :

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

La partie 1 comportait 3 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 que de façon fragmentaire :

- la famille des roches sédimentaires à laquelle appartiennent les calcaires est, pour certains, inconnue, le mode de formation mal explicité, et le phénomène de karstification du à l'érosion rarement abordé.

La partie 2 comportait 7 questions liées à la nature et aux caractéristiques des matériaux.

- L'expression des contraintes dans les sols n'est malheureusement bien formulée que par 30% des candidats; la notion d'état des terres au repos (état K_0) est mal définie et la représentation dans le plan de Mohr très peu abordée, ou fautive (questions 4, 5).

- les notions d'indice des vides et de degré de saturation, sont maîtrisées par la majorité des candidats (question 6).
- l'essai pressiométrique est généralement connu des candidats (question 7). Le passage à l'interprétation de l'essai fourni a eu un succès plus réduit (question 8).
- Très peu de candidats ont connaissance des essais de perméabilité (question 9). Les ordres de grandeurs de la perméabilité des sols sont assez bien cernés et ordonnés, pour ceux ayant répondu. L'exploitation des données de l'essai Lefranc a été peu abordée et avec peu de résultats satisfaisants (question 9).

Partie 3 : le projet, conception et vérification

La partie 3 comportait 10 questions ayant trait à l'appui intermédiaire de l'ouvrage : procédés de construction-réalisation, en fondations superficielles puis fondations profondes.

Cette partie du problème a été assez largement traitée en comparaison des années précédentes : les questions faisant appel aux connaissances des procédés de construction, que les candidats connaissent assez bien mais explicitent de manière trop succincte et peu précise, ont été traitées par environ 80% des candidats. Certains candidats semblent avoir passé beaucoup de temps, peut être trop, sur ces questions.

- la question 11 consistait à proposer un schéma constructif permettant de mettre hors d'eau le fond de fouille. Il s'agissait de proposer un phasage réaliste de réalisation d'un batardeau en rideau de palplanches avec un possible butonnage. Des schémas clairs et commentés précisant le déroulement des étapes constructives étaient des éléments de compréhension appréciables. Notons qu'un candidat ayant lu l'intégralité du sujet avait tous les éléments de réponse à cette question.
- La question 12 traitait de l'exploitation de l'essai pressiométrique pour évaluer la capacité portante du sol. La « méthodologie Fascicule 62 » était fournie en document annexe. Seuls 7 candidats ont traité cette question.
- La question 13 qui concernait la stabilité du rideau du batardeau et la question 14 qui envisageait l'aspect écoulement hydraulique ont été traitées partiellement. La stabilité du fond de fouille (question 15) n'a pas été abordée correctement.
- Le calcul du tassement (question 16) a été traité par 6 candidats et n'a pas été traité correctement.
- La question 17 qui portait sur la technique de réalisation des pieux a été bien traitée et de manière large. Un soin particulier doit être mis sur la réalisation des schémas explicatifs.
- La question 18 traitait de la stabilité des pieux. Cette question a été peu abordée.
- Les questions 19 et 20 traitaient du contrôle de bonne réalisation des pieux et du bon « remplissage » du béton. La méthode d'auscultation par la méthode sonique est connue du tiers des candidats ; l'exploitation par les candidats ayant traité la question des profils de mesure fournis est satisfaisante, la zone « critique » étant identifiée. Les solutions proposées sont peu réalistes.

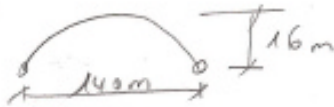
Finalement, on observe que les candidats qui ont réussi l'épreuve disposaient des connaissances des fondamentaux de la géotechnique et ont composé sur l'ensemble de l'épreuve en ayant traité de façon satisfaisante les questions concernant la partie réalisation et contrôles.

Éléments de correction : Projet A

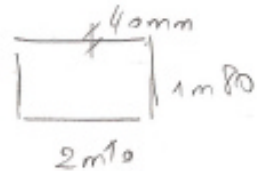
B1 – Etudes Techniques

B1-1 : étude des sollicitations dans un arc

• Calculs préalables



Section



Poids propre d'un arc

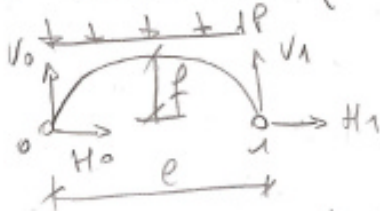
$$1.06 \times [2 \times (2.10 + 1.80)] \times 0.04 \times 78.5 = 26 \text{ kN/ml}$$

Combinaisons

$$\text{ELS } G+Q : 47.5 + 26.0 + 29.0 = 102.5 \text{ kN/ml}$$

$$\text{ELU } 1.35G + 1.5Q : 1.35(47.5 + 26.0) + 1.5 \times 29.0 = 143 \text{ kN/ml}$$

• Reactions en pied d'arc



$$\begin{aligned} \sum M_0 = 0 &= V_1 l - p l \times \frac{l}{2} \\ \sum M_1 = 0 &= -V_0 l + p l \times \frac{l}{2} \end{aligned} \quad \left. \begin{aligned} V_0 &= V_1 \\ &= \frac{p l}{2} \end{aligned} \right\}$$

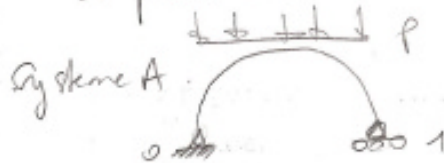
d'où ELS $V_0 = V_1 = 102.5 \times \frac{14.3}{2} = 737.5 \text{ kN}$

ELU $V_0 = V_1 = 143 \times \frac{14.3}{2} = 1021.0 \text{ kN}$

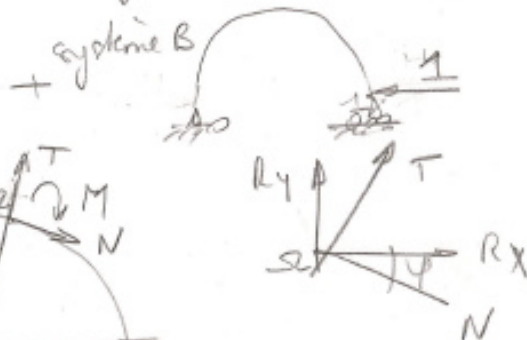
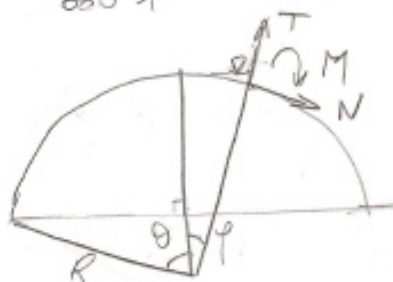
et $H_0 = H_1 = H$ à déterminer car $H_0 + H_1 = 0$.

• Moment le long de l'arc

L'arc bi-articulé est un système de degré d'hyperstatisme 1.
Il peut être ramené à 2 systèmes isostatiques :



Repères



• Resolution système A



(2)

$$R_x = H_0 = 0$$

$$R_y = V_0 - p R (\theta + \varphi)$$

on $V_0 + V_1 = 2 p R \theta$ et $V_0 = V_1$ donc $V_0 = p R \theta$

d'où $R_y = -p R \varphi$

En chaque point Ω , on a :

$$N_{\Omega}^1 = R_x \cos \varphi - R_y \sin \varphi = p R \varphi \sin \varphi$$

$$T_{\Omega}^1 = R_x \sin \varphi - R_y \cos \varphi = -p R \varphi \cos \varphi$$

$$\begin{aligned} \text{et } M_{\Omega}^1 &= V_0 R (\sin \theta + \sin \varphi) - \int_0^{\varphi} p R d\psi R (\sin \varphi - \sin \psi) \\ &= p R^2 \theta (\sin \theta + \sin \varphi) - p R^2 [\varphi \sin \varphi + \cos \varphi]_{\theta}^{\varphi} \end{aligned}$$

$$= p R^2 \theta (\sin \theta + \sin \varphi) - p R^2 (\varphi \sin \varphi + \cos \varphi - (\theta \sin \theta + \cos \theta))$$

$$= p R^2 (\theta \sin \theta + \sin \varphi - \varphi \sin \varphi - \cos \varphi - \theta \sin \theta + \cos \theta)$$

$$M_{\Omega} = p R^2 (\theta \sin \theta - \varphi \sin \varphi - \cos \varphi + \cos \theta)$$

• Resolution système B

$$R_x = -1$$

$$R_y = 0$$

$$V_0 = V_1 = 0$$

$$N_{\Omega}^2 = -\cos \varphi$$

$$T_{\Omega}^2 = -\sin \varphi$$

$$M_{\Omega}^2 = R (\cos \varphi - \cos \theta)$$



• le déplacement horizontal du point 1 système A vaut :

$$u_{1A} = \int_{-\theta}^{+\theta} \frac{m \times M_{\Omega}^1}{EI} R d\varphi = 0$$

$$u_{1A} = \frac{R}{EI} \int_{-\theta}^{+\theta} R (\cos \varphi - \cos \theta) \times p R^2 (\theta \sin \theta - \varphi \sin \varphi - \cos \varphi + \cos \theta)$$

$$= \frac{p R^4}{EI} \int_{-\theta}^{+\theta} \theta \cos \varphi \cos \theta - \varphi \cos \varphi \sin \varphi - \cos^2 \varphi + \cos \varphi \cos \theta - \theta \cos \theta \sin \theta + \varphi \sin \varphi \cos \theta + \cos \theta \cos \varphi - \cos^2 \theta$$

$$u_{1A} = \frac{p R^4}{EI} \frac{1}{4} (9 - 4\theta^2) \sin 2\theta - 10\theta \cos 2\theta - 8\theta \quad (3)$$

le déplacement horizontal du point 1 système B vaut

$$u_{1B} = \int_{-\theta}^{\theta} \frac{m \times \Delta r}{EI} R d\varphi$$

$$u_{1B} = \frac{R}{EI} \int_{-\theta}^{\theta} R^2 (\cos \varphi - \cos \theta)^2 d\varphi = \frac{R^3}{EI} \int_{-\theta}^{\theta} (\cos \varphi - \cos \theta)^2 d\varphi$$

$$= \frac{R^3}{EI} \left(0 - \frac{3}{2} \sin 2\theta + 2\theta \cos^2 \theta \right)$$

et $u_{1A} + Q u_{1B} = 0$ ou $Q = \frac{u_{1A}}{u_{1B}}$

$$Q = p R \frac{(9 - 4\theta^2) \sin 2\theta - 10\theta \cos 2\theta - 8\theta}{4\theta - \frac{3}{2} \sin 2\theta + 2\theta \cos^2 \theta}$$

$$Q = p R \left(\frac{(9 - 4\theta^2) \sin 2\theta - 10\theta \cos 2\theta - 8\theta}{4\theta - 6 \sin 2\theta + 8\theta \cos^2 \theta} \right)$$

Avec $l = 140m$ $f = 16m$



donc $R = 161m$

$\theta = 0,45 rad$

$$Q = p \times 161 \times \frac{0,0182}{0,0189} = \underline{22,13 kN}$$

et $N(\varphi) = N_A + N_B = p R^2 (\theta \sin \theta - \varphi \sin \varphi - \cos \varphi + \cos \theta) + Q R (\cos \varphi - \cos \theta)$

Alors pour $\varphi = 0$, soit à la clé.

$$N = p R^2 (\theta \sin \theta - 1 + \cos \theta) + Q R (1 - \cos \theta)$$

Partie B1-2 : étude du tirant

- le point de moment positif maximum a les sollicitations suivantes.

$$M_{Ed} = 8885 \text{ kN.m}$$

$$N_{Ed} = -30479 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 420 \text{ kN}$$

- Inertie $I = 0,0698 \text{ m}^4$

$$J = J' = 0,575 \text{ m}$$

$$W_{xe} = 0,1213 \text{ m}^3$$

$$\text{Section } A = 0,2856 \text{ m}$$

$$W_{pl} = 0,134 \text{ m}^3$$

- Contraintes

- Normales: $\sigma_{x,Ed} = \frac{8885}{0,1213} = \pm 73,25 \text{ MPa}$
flexion

traction $\sigma_{x,Ed} = \frac{-30479}{0,2856} = -106,72 \text{ MPa}$

d'où $\sigma_{x,Ed} = -33,47 \text{ MPa}$
 $-179,97 \text{ MPa}$

Section entièrement tendue

- Tangentes

Section de lame 1 $A_s = 1 \sum h w t_w = 1 \times 2 \times 1,15 \times 0,04 = 0,092 \text{ m}^2$

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} \sqrt{3}}{A_s} = \frac{0,420 \times \sqrt{3}}{0,092} = 7,9 \text{ MPa}$$

- Vérifications réglementaires

- Au tranchant: $V_{pe,Rd} = \frac{A_s f_y \sqrt{3}}{\gamma_{No}} = \frac{0,092 \times 355 \sqrt{3}}{1} = 18,85 \text{ kN}$
Eurocode 6.1 $\gamma_{No} = 1$

$V_{0,Rd} = V_{pe,Rd} \quad \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{0,42}{18,86} = 0,022$ (à ne pas cumuler avec flexion)

- A l'effort normal (Eurocode 6.2.3)

(5)

$$N_{t,Rd} = \min \left(\frac{A_{fy}}{\gamma_{m0}} ; 0,9 \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{m2}} \right)$$

$$\frac{A_{fy}}{\gamma_{m0}} = \frac{0,2856 \times 355}{1} = 101 \text{ MN}$$

$$0,9 \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{m2}} = \frac{0,9 \times 0,2856 \times 510}{1,25} = 104$$

} 101 MN

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{30,479}{101} = 0,302$$

- A la flexion

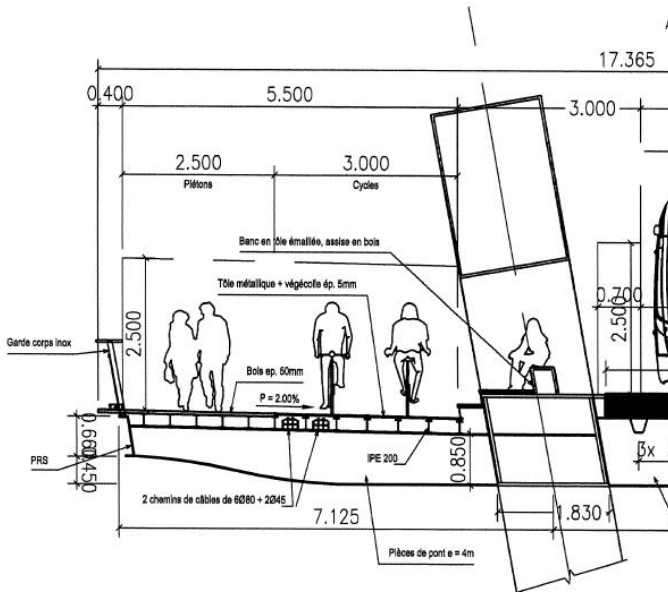
$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_u}{\gamma_{m0}} = \frac{0,1339 \times 355}{1} = 47,53 \text{ MN.m}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{8,88}{47,53} = 0,1868$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = 0,302 + 0,1868 = 0,49 < 1$$

Partie B1-3 : étude du PRS en encorbellement

L'encorbellement est encastré sur l'ouvrage, et il fonctionne comme une console. La coupe AA présente la situation courante où l'encorbellement est le plus long :



La sollicitation de calcul sera donc calculée en prenant les actions avec leur valeur maximale. L'entraxe entre 2 pièces de pont est de 4 mètres.

Actions prises en compte :

Permanentes, en référence à l'annexe D1 :

Acier : $\gamma = 78.5 \times 1.06 = 83.2 \text{ kN/m}^3$, donnant G_a

(on prendra une hauteur constante sur les 6 m ce qui est défavorable et place en sécurité)

Platelage bois : $G_w = (0.5 \text{ kN/m}^2 \times 1.4) \times 4 = 2.8 \text{ kN/m}$

Garde corps : $G_{gc} = 1 \text{ kN/m} \times 4 = 4 \text{ kN}$

Complexe Kevigrip : $1.2 \text{ kN/m}^2 \times 4 = 4.8 \text{ kN/m}$ (poids total zone cycliste, tôle+résine de roulement)

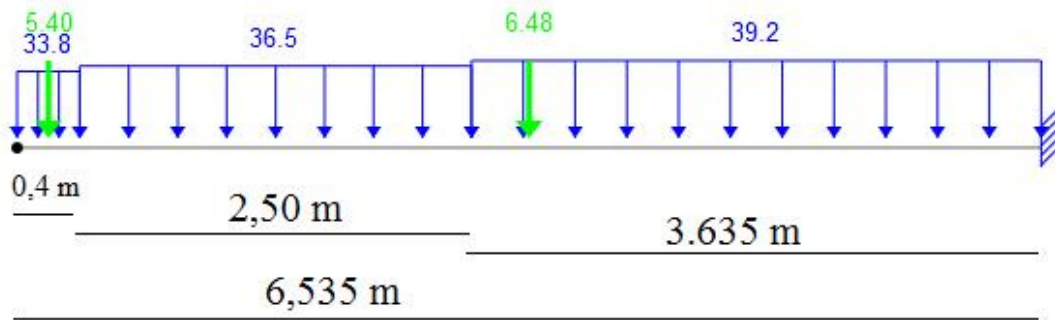
Chemins de câbles (réseaux) : $G_{ca} = 1 \times 1.2 \text{ kN/m} \times 4 = 4.8 \text{ kN}$

Solives en IPE 200, un profil tous les 50 cm, poids estimé à $G_{sol} = 0.5 \text{ kN/m}^2 \times 4 = 2 \text{ kN/m}$

Exploitation :

Charge de foule $Q = 5 \text{ kN/m}^2 \times 4 = 20 \text{ kN/m}$

On propose donc le schéma mécanique suivant, en tenant compte des dimensions fournies sur les plans et du descriptif, pour la fibre moyenne du PRS, hors poids propre dans un premier temps, à l'ELU (charges en kN/m et kN) :



Ce qui donne un moment d'encastrement de 845 kN.m, et un effort tranchant de 259 kN.

Prédimensionnement :

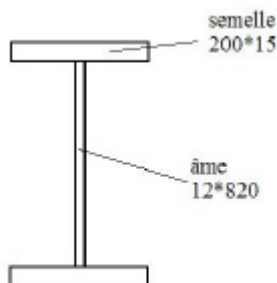
Hypothèse : $f_y = 355 \text{ MPa}$

Profilé en I de hauteur 85 cm, largeur entre $h/3$ et $h/5$, prenons $b = 20 \text{ cm}$.

Si le moment est totalement équilibré par les semelles $A_f \times f_y \times h = 845 \text{ kN.m}$ alors $A_f = 28 \text{ cm}^2$, ce qui fait une semelle de 14mm arrondis à 15 mm.

Pour l'âme, en partant sur un cisaillement à 160 MPa afin de réduire les risques de voilement, on estime $A_w \times 160 \text{ MPa} = 245 \text{ kN}$ soit 15 cm^2 ce qui donne une épaisseur d'âme trop petite. Pour des conditions de corrosion, on prendra $t_w = 12 \text{ mm}$.

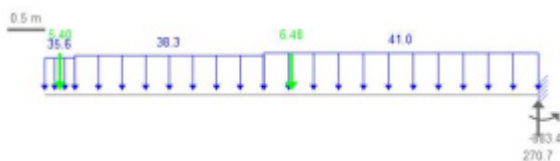
On propose en section d'encastrement :



Tous les elts sont d'épaisseur inférieure à 16 mm donc $f_y = 355 \text{ MPa}$

Soit une surface de section droite de 15840 mm^2 donnant $G_a = 1.32 \text{ kN/m}$

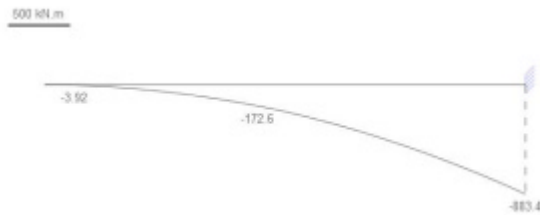
En tenant compte du poids propre, on a ainsi :



Effort tranchant V_{Ed} :



Moment fléchissant M_{Ed} :



Classification de la section : (hypothèse soudures de gorge de 6 mm)

Ame : $c = 820 - 2 \cdot 8.5 = 803$ mm, $t = t_w = 12$ mm, donc $c/t = 67$

Et $e = 0.814$, soit $83 \cdot e = 67$, classe 2.

Semelle en console : $c = 85,5$ mm, $t = t_f = 15$ mm, donc $c/t = 5.7$

Ici $9 \cdot e = 7.33$, donc la semelle est en classe 1.

Donc **SECTION de CLASSE 2**

Résistance en flexion :

Module plastique : $W_{pl} = 4522$ cm³

Moment résistant : $M_{pl,Rd} = 1605$ kN.m $>$ $M_{Ed} = 883$ kN.

Résistance au tranchant :

$A_v = 12300$ mm², $V_{pl,Rd} = 2.52$ MN $\gg V_{Ed} = 271$ kN

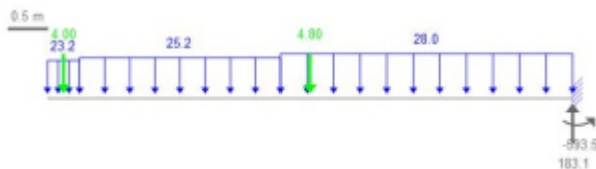
L'effort tranchant sollicitant est inférieur à la moitié de l'effort tranchant résistant de calcul, donc son effet sur le moment résistant peut-être négligé.

La stabilisation longitudinale des encorbellements par des croix de Saint André disposées entre chaque profil dispense d'une vérification au déversement.

Flèche à l'ELS :

Le moment quadratique du PRS choisi est $I = 79866$ cm⁴.

A l'ELS le schéma mécanique est (valeurs nominales pour les charges permanentes) :



La flèche de la console s'établit alors à 3.7 cm ce qui correspond à $L/353$, L étant la double longueur de porte-à-faux (critère EC3).

En retenant le critère de base de l'EC3 avec une flèche limite à $L/200$, notre choix convient.

2- Etudes de réalisation

2.1- Réalisation de la culée C0

Rédiger le quantitatif du coffrage et du béton de la culée C0

Ref	DESIGNATION										Un.	Qté.	Barème
				lg unit	lg tot	x larg =	Surf unit	Surf tot	x ht =	vol unit			
1	<u>Culée C0</u>												
1.1	<u>Plancher bas</u>												
1.1.1	Coffrage latéral			21.12									
				21.12									
				3.55									
					45.79	0.80		36.63			M2	36.632	
1.1.2	Bétonnage				21.12	3.55		74.98	0.80	59.981	M3	59.981	0.5
1.2	<u>Voiles</u>												
1.2.1	Coffrage												
		Voiles longitudinaux		21.12 x 4 =	84.48								
		abouts		0.50 x 2 =	1.00								
		Voiles transversaux		2.55 x 7 =	17.85								
		Elargissement			0.68								
					104.01	1.96		203.86			M2	203.860	
1.2.2	Bétonnage												
		Voiles longitudinaux		21.12 x 2 =	42.24	0.50	21.12						
		Voiles transversaux		2.55 x 4	10.20	0.50	5.10						
		Elargissement du voile			1.75	1.18	2.07						
								28.29	1.96	55.439	M3	55.439	1

Ref	DESIGNATION									Un.	Qté.	Barème
1.3	<u>Plancher haut</u>			lg unit	lg tot	x larg =	Surf unit	Surf tot	x ht =	vol unit		
1.3.1	Coffrage	Coffrage inférieur		6.72 6.02 5.71	18.45	2.55	47.05					
(1)		Coffrage latéral trapézoïdal	Ht moyenne Une face	$(0.84 + 0.78)/2 =$	0.81	3.55	2.88					
		Coffrage latéral		0.84 0.78	1.62	21.12	34.21	84.14			M2	84.137
1.3.2	Bétonnage	Dito (1) surface du trapèze					2.88		21.12	60.731	M3	60.731
1.4	<u>Mur garde grève</u>											
1.4.1	Coffrage	Parement intérieur	Racine($0.30^2 + 0.30^2$)	1.80 0.42 0.60 0.35	3.17							
		Parement extérieur	Racine($0.30^2 + 0.30^2$)	1.20 0.42 0.30 0.65	2.57							
		About	Partie verticale	1.80 0.65	5.75	21.12		121.41				
					2.45	0.30	0.74					
			Corbeau		0.30	0.30	0.09					
				0.30/2 =	0.15	0.30	0.05					
(5)			Triangle	0.30/2 =	0.15	0.30	0.05					

(6)			Partie horizontale		0.90	0.35	0.32						
(2)							1.23						
			Une seule face					1.23					
1.4.2	Bétonnage							122.64			M2	122.639	
		Dito (2) surface de l'about						1.23	21.12	25.978	M3	25.978	2
1.5	<u>Muret longitudinal</u>												
1.5.1	Coffrage												
		Partie basse à droite de la porte			21.12								
		déduire			-0.50								
		déduire			-0.90								
						19.72	0.93	18.34					
		Triangle	2.41/2 =		1.21	0.86	1.04						
		Partie à gauche de la porte											
		rectangle inférieur			1.58								
					0.93								
		Déduire			-0.72								
						1.79	0.50	0.90					
		trapèze supérieur											
		(0.31+0.20)/2			0.26	0.72	0.18						
(3)							20.45						
		Deux faces						40.91					
		About droite			0.93								
		About gauche			2.45								
		Tranche porte	2 x 1.79		3.94								
						7.32	0.20	1.46					
1.5.2	Bétonnage							42.37			M2	42.373	
		Dito (3) surface du muret						20.45	0.20	4.091	M3	4.091	1
1.6	<u>Muret transversal droite</u>												
1.6.1	Coffrage												
		muret de hauteur variable											
(4)			(0.87+0.93)/2		0.90	3.05	2.75						
		Une face						2.75			M2	2.745	
1.6.2	Bétonnage												
		Dito (4) surface du muret						2.75	0.20	0.549	M3	0.549	0.5

1.7	<u>Muret transversal gauche</u>										
1.7.1	Coffrage	mur de hauteur variable									
		(1.73+1.79)/2	1.76	3.05	5.37						
		Déduire la partie supérieure du mur garde grève									
		Dito (5) art 1.4.1			-0.05						
		Dito (6) art 1.4.1			-0.32						
(7)					5.01						
		Deux faces				10.02			M2	10.016	
1.7.2	Bétonnage										
		Dito (7) surface du muret				5.01	0.20	1.002	M3	1.002	1
											7
					Quantité coffrage :		502.40				
					Quantité Bétonnage		207.77				

Concevoir et calculer l'étalement du plancher de la cellule 6.72 x 2.55 m

BAREME

Actions

Charges :

Béton sur 0.81 cm 0.81 x 25 kN/m³

20.25 kN/m²

Surcharge chantier

2.00 kN/m²

Poids du coffrage

1.20 kN/m²

pser = $\frac{20.25 + 2.00 + 1.20}{1} = 23.45$ kN/m²

pu = 35.18 kN/m²

Coefficient global de sécurité : 1.5

0.5

Contreplaqués

Détermination de distance entre filières pour un panneau dokadur

Epaisseur = 27 mm

es = espacement axiale des poutrelles secondaires

es' = portée libre entre secondaire (es - largeur des secondaires)

Hypothèses sur le contreplaqué CP1

E = 4.00E+09 Pa

Sigma adm = 12 Mpa

Tau adm = 2 Mpa

Flèche adm = 1/300

Caractéristiques géométriques

I = (0.027)³/12 = 1.64E-06 m⁴

I/v = (0.027)²/6 = 1.22E-04 m³

Vérification effort tranchant

V = pu x es' / 2 =

Théorie

simplifiée :

Tau = V / S = pu x es' / (2 x S) < 2 Mpa

es' < 3.07 m

Théorie Générale

$$\text{Tau} = 1.5 \times V / S = 1.5 \times p_u \times e_s' / (2 \times S) < 2 \text{ Mpa}$$

$$e_s' < 2.05 \text{ m}$$

Vérification moment fléchissant

$$M = p_u \times (e_s')^2 / 8$$

$$\text{Sigma} = M / I / v = p_u \times (e_s')^2 / 8 \cdot I / v < 12 \text{ Mpa}$$

$$e_s' < 0.58 \text{ m}$$

Vérification flèche

$$f = 5 \cdot p_{ser} \cdot (e_s')^4 / 384 \cdot E \cdot I < e_s' / 300$$

$$e_s' < 0.42 \text{ m}$$

Pour des panneaux de 2.50 x 0.50 on choisi

Conclusion :

$$e_s' = 0.42 \text{ m}$$

$$e_s = 0.50 \text{ m}$$

2

Poutrelles Secondaire HP 20

Détermination de distance entre poutrelles primaires

hauteur = 0.200 m Largeur = 0.080 m

ep = espacement axiale des poutrelles principales

ep' = portée libre entre principale (es - largeur des principales)

Hypothèses sur les poutrelles HP20

$$E = 1.10 \times 10^{10} \text{ Pa}$$

$$\text{Sigma adm} = 10.8 \text{ Mpa}$$

$$\text{Tau adm} = 1.1 \text{ Mpa}$$

$$\text{Flèche adm} = 1/300$$

Caractéristiques géométriques

$$S = 1.00 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$I = 4.61 \times 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$I / v = 4.61 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Action sur la poutrelle secondaire

$$\begin{aligned} p_u &= 35.18 \times 0.50 = 17.59 \text{ kN/m} \\ p_{ser} &= 23.45 \times 0.50 = 11.73 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Vérification effort tranchant

Théorie simplifiée :

$$\begin{aligned} V &= p_u \times e_p' / 2 = \\ \tau &= V / S = p_u \times e_p' / (2 \times S) < 1.1 \text{ Mpa} \\ e_p' &< 1.25 \text{ m} \end{aligned}$$

Théorie Générale :

$$\tau = \frac{V S}{I_z b}$$

L'épaisseur de l'âme n'était pas donnée dans le sujet pour effectuer ce calcul.

Vérification moment fléchissant

$$\begin{aligned} M &= p_u \times (e_p')^2 / 8 \\ \sigma &= M / I_v = p_u \times (e_p')^2 / 8 \cdot I_v < 10.8 \text{ Mpa} \\ e_p' &< 1.50 \text{ m} \end{aligned}$$

Vérification flèche

$$\begin{aligned} f &= 5 \cdot p_{ser} \cdot (e_p')^4 / 384 \cdot E \cdot I < e_s' / 300 \\ e_p' &< 2.23 \text{ m} \end{aligned}$$

Conclusion :

$$\begin{aligned} e_p' &= 1.17 \text{ m} \\ e_p &= 1.25 \text{ m} \end{aligned}$$

2

Poutrelles Principales GT24

Détermination de distance entre les étais

hauteur = 0.240 m Largeur = 0.080 m

e = espacement entre les étais

Hypothèses sur les poutrelles GT24

$$\begin{aligned}
 E &= 8.77\text{E}+09 \text{ Pa} \\
 \text{Sigma adm} &= 8.7 \text{ Mpa} \\
 \text{Tau adm} &= 2.2 \text{ Mpa} \\
 \text{Flèche adm} &= 1/300
 \end{aligned}$$

Caractéristiques géométriques

$$\begin{aligned}
 S &= 1.27\text{E}-02 \text{ m}^2 \\
 I &= 8.00\text{E}-05 \text{ m}^4 \\
 I/v &= 6.48\text{E}-04 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Action sur la poutrelle secondaire

$$\begin{aligned}
 p_u &= 35.18 \times 1.25 = 43.97 \text{ kN/m} \\
 p_{ser} &= 23.45 \times 1.25 = 29.31 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Vérification effort tranchant

$$\begin{aligned}
 V &= p_u \times e / 2 = \\
 \text{Tau} &= V / S = p_u \times e / (2 \times S) < 1.1 \text{ Mpa} \\
 e &< 1.27 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Vérification moment fléchissant

$$\begin{aligned}
 M &= p_u \times (e)^2 / 8 \\
 \text{Sigma} &= M / I/v = p_u \times (e)^2 / 8 \cdot I/v < 10.8 \text{ Mpa} \\
 e &< 1.01 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Vérification flèche

$$\begin{aligned}
 f &= 5 \cdot p_{ser} \cdot (e)^4 / 384 \cdot E \cdot I < e_s' / 300 \\
 e &< 1.83 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Conclusion :

$$e = 1.00 \text{ m}$$

2

Vérification de la charge sur l'étais

$$\begin{aligned}
 \text{Un étais reprend une surface de } &1.25 \times 1.00 = 1.25 \text{ m}^2 \\
 F = p_{ser} \times 1.25 = &29.31 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Hauteur à étayer maximale (sans cale au sol) :

$$1.96 - 0.027 - 0.20 - 0.24 =$$

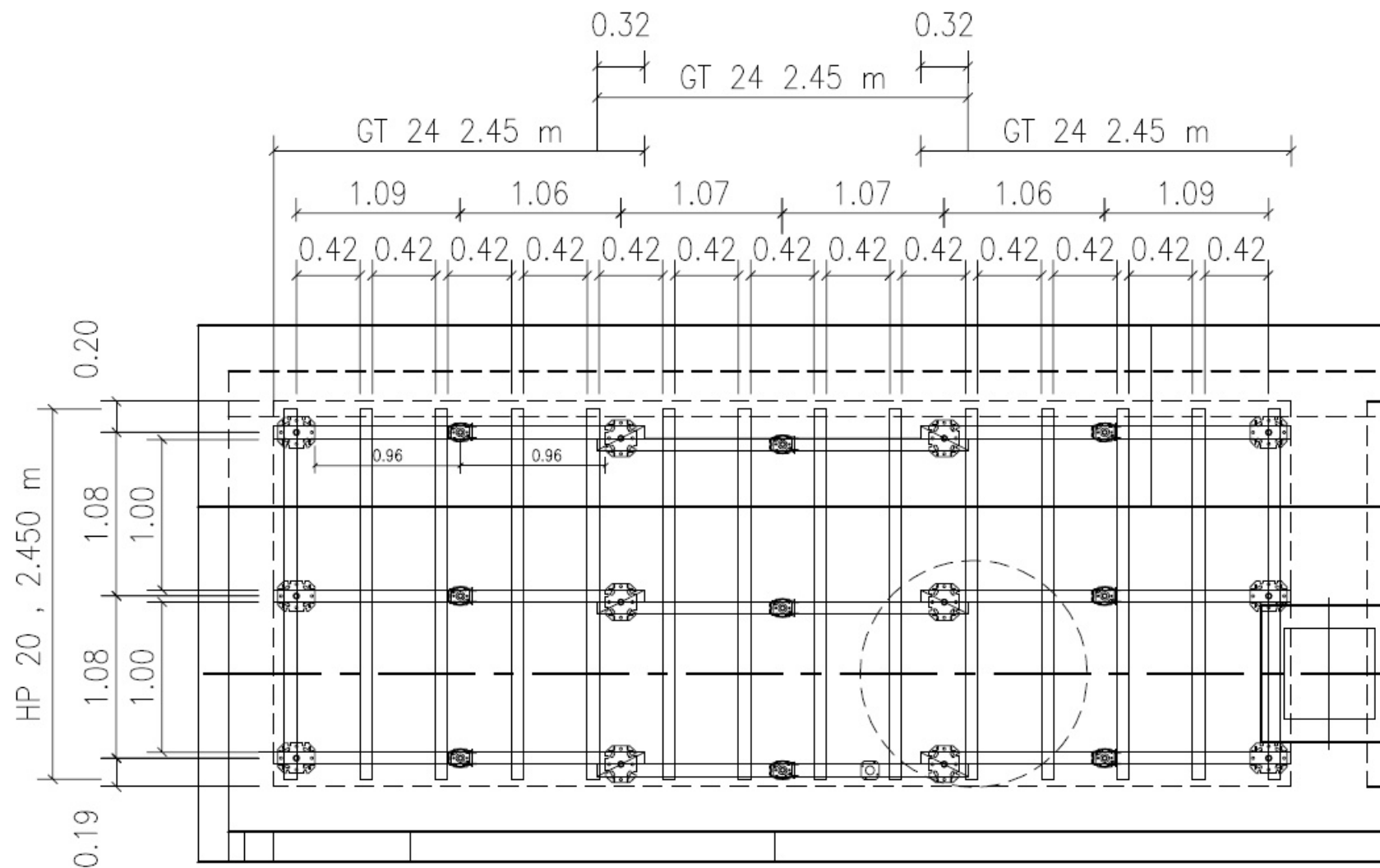
1.493 m

0.5

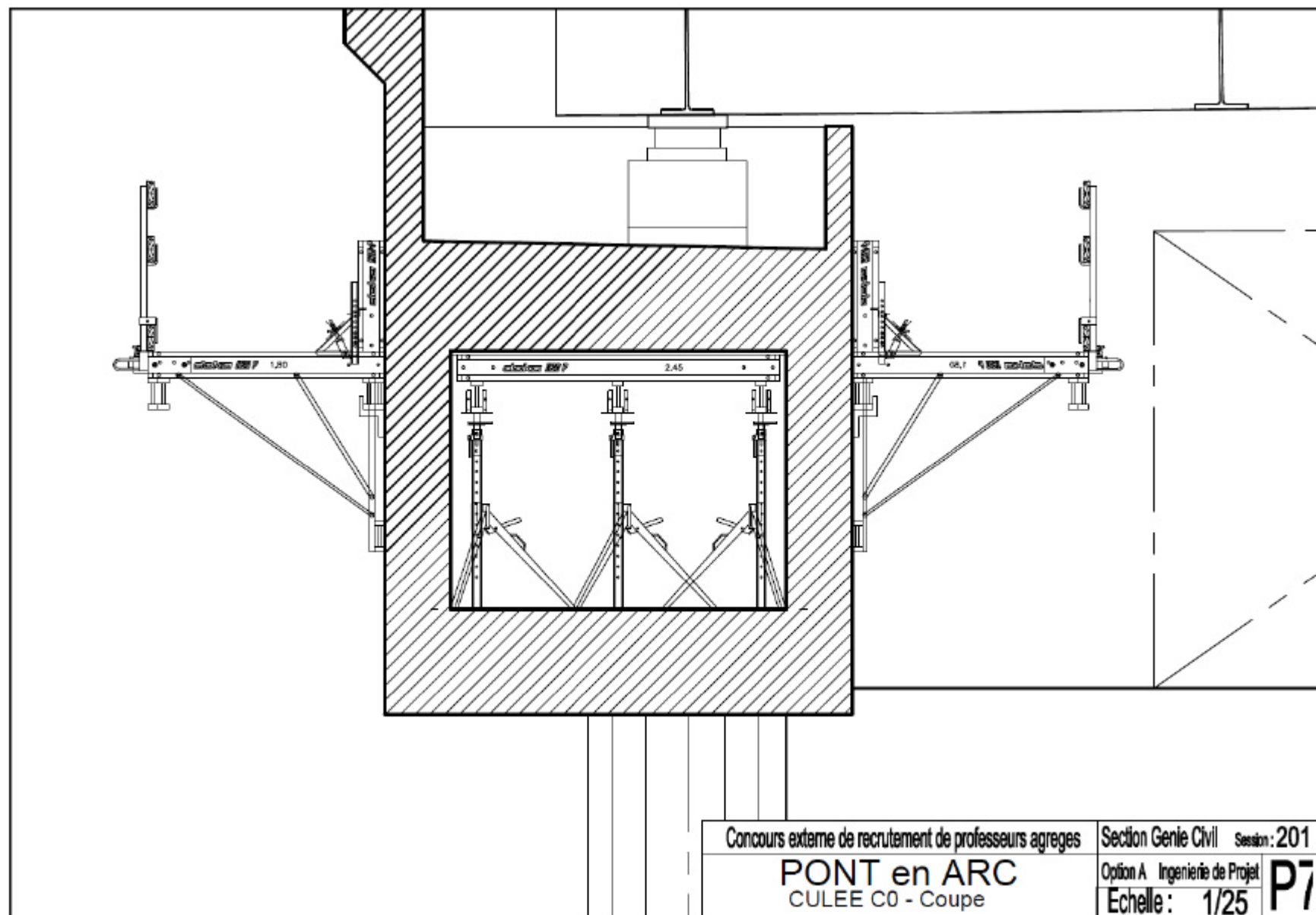
Réf Etais Droits	Développement		Masse (kg)	Charges admissibles (t) selon le développement (mm)														
	Mini	Maxi																
Gamme Fortis+	Hauteur étayée en mm		6 7,5 9,3	550	800	1000	1200	1400	1500	1700	Coefficient de sécurité retenu : 3							
JS 80	550	800		3,9	3,5													
JS 120	750	1200			3,9	3,6	3,3											
JS 175	1000	1750				3,9	3,6	3,3	3,1	2,9								
	Hauteur étayée en mm			-	1400	1500	1700	2000	2200	-	2600	-	3000	3200	3500	-	3800	4000
JS 260	1500	2600	12,5			3,9	3,5	3,3	3		2,5							
JS 300	1700	3000	14				3,9	3,7	3,5		2,9		2,3					
JS 350	2000	3500	15					3,9	3,6		3		2,5	2,1	2			
JS 400	2200	4000	17,5						3,9		3,5		3	2,7	2,2		1,8	1,5

7

On pourra choisir un étau JS 175 dont la charge admissible est de 31 kN jusqu'à 1.500 m de hauteur à étayer.



VUE EN PLAN DE L'ETAIEMENT



COUPE TRANSVERSALE DE L'ETAIEMENT

2.2- Réalisation de la pile P1

Définir le phasage de l'ensemble des travaux de réalisation de la pile P1

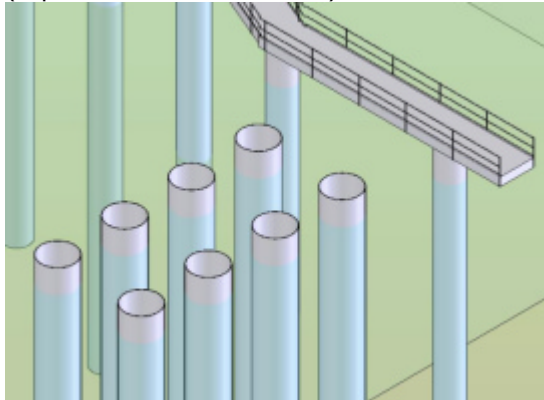
- Réalisation des estacades à l'avancement
- Forage des pieux à l'abri de chemises métalliques
- Mise en place des cages d'armatures
- Mise en place des portiques de suspension
- Bétonnage des pieux
- Réalisation hors d'eau du batardeau
- Descente du batardeau, obturation des réservations et épousillage
- Recèpage des pieux
- Ferrailage du chevêtre
- Bétonnage jusqu'à la cote -0.100 par rapport à l'arase supérieure du batardeau
- Dépose du système de suspension
- Réalisation du bossage d'appui
- Réalisation du béton d'arase du chevêtre

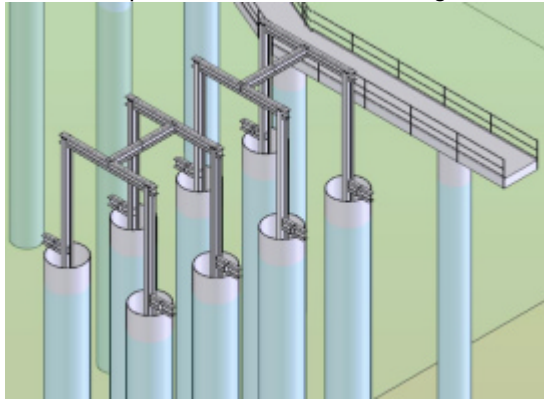
Définir le mode opératoire de réalisation du chevêtre à partir de la fin du forage des pieux.

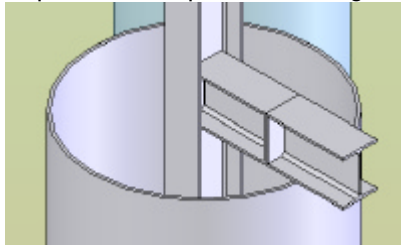
Liste chronologique détaillée des tâches à réaliser

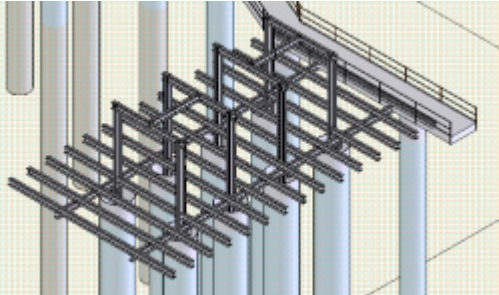
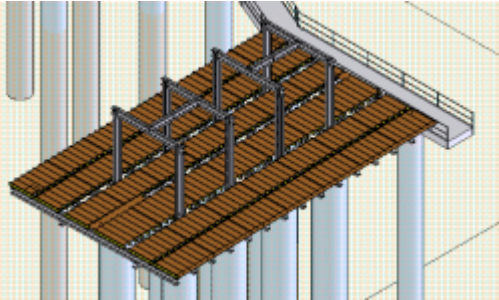
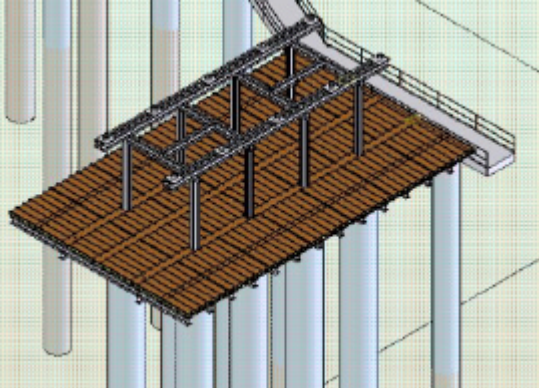
- Arase des tubes
- Ferrailage des pieux
- Mise en place des portiques de suspension
- Bétonnage des pieux
- Dépose des extensions des consoles d'appui
- Réalisation du platelage de coffrage du batardeau
- Réalisation du voile périphérique du batardeau (en 4 fois)
- Mise en place des suspentes
- Réalisation du radier du batardeau (ferrailage et bétonnage)
- Elévation du batardeau de 1.800 m
- Dépose du platelage de coffrage
- Descente du batardeau, obturation des réservations et épousillage
- Recèpage des pieux
- Ferrailage du chevêtre
- Bétonnage jusqu'à la cote -0.100 par rapport à l'arase supérieure du batardeau
- Dépose du système de suspension
- Réalisation du bossage d'appui
- Bétonnage de l'arase du chevêtre

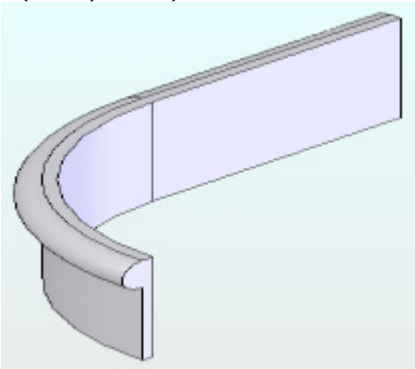
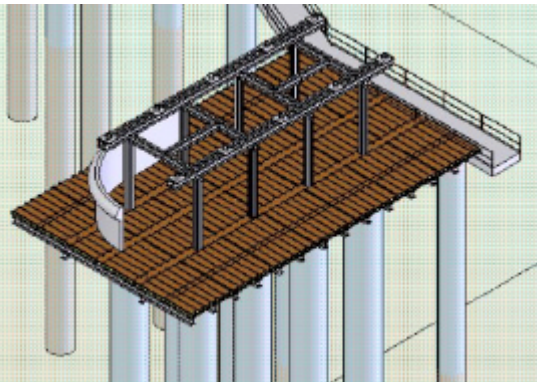
Mode opératoire

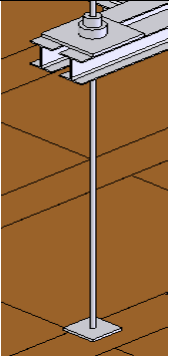
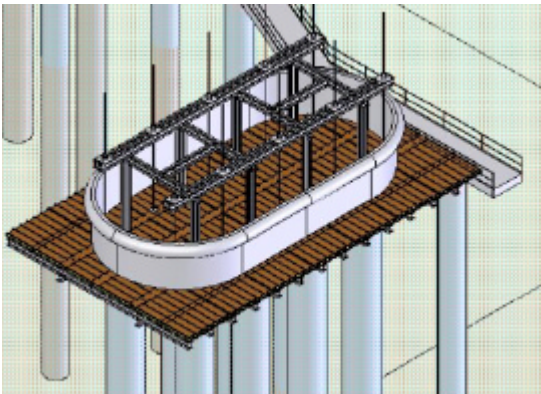
N°	Description détaillée des tâches et croquis	Matériel et matériaux nécessaires	Risques	Mesures de prévention ou contrôles
1	Arase des tubes Découpage des tubes à la cote 162.500 (supérieur de 0.250 m à RN) 	barge sur pieds  Grue sur barge Barge en fer à cheval qui encadre les pieux niveau de chantier mire gabarit de découpage chalumeau	Cote non respectée notamment sur les génératrices servant d'appui au portique de suspension Q	Utilisation d'un gabarit de découpe
			Chute dans le fleuve Brûlures et de projections lors de chute de métal fondu dans la rivière S	Gilet de sauvetage Bouée Bateau de secours EPI Etanchéité entre le tube du pieuet la barge en U
			chute de métal fondu dans la rivière E	Etanchéité entre le tube et le radeau Balayage et récupération des déchets de découpe
2	Ferraillage des pieux Mise en place de la cage 1 Suspension sur le tube de forage Mise en place de la cage 2 Aboutage des armatures principales à l'aide de deux serre-cables adaptés au diamètre des armatures Aboutage des tubes de contrôle sonique et de carottage Suspension de l'ensemble sur le tube de forage	Cages d'armatures avec suspentes serre-cables clés	Position des suspentes Enrobage des aciers Difficultés de recepage Q	Obturation des tubes de contrôle Gaines isolantes autour des armatures principales des pieux sur la hauteur de recepage Mise en place des dispositifs recépieux Les systèmes de suspension devront permettre le passage des portiques de suspension et de la goulotte de bétonnage
			Chute dans le fleuve Chocs avec les pièces en mouvement S	Gilet de sauvetage Bouée Bateau de secours Corde de guidage
			RAS E	

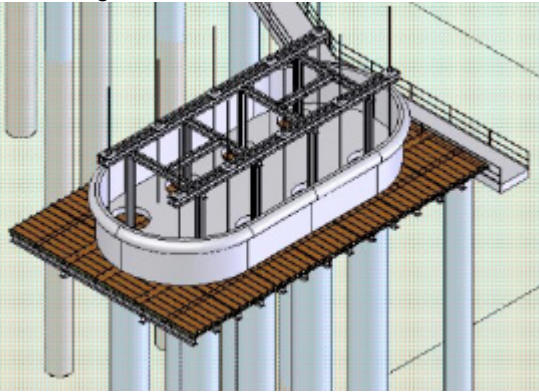
N°	Description détaillée des tâches et croquis	Matériel et matériaux nécessaires	Risques	Mesures de prévention ou contrôles
3	Mise en place des portiques de suspension (deux portiques à 4 pieds) Relever la position des tubes de forage  Tracer la position d'axes au nu extérieur des pieds de portique sur les tubes de forage Niveler les zones d'appuis des consoles (au cours de la tâche n°1), en déduire l'épaisseur des cales à souder sous les consoles sur l'aire d'assemblage	Barge sur pieds Grue Barge en fer à cheval qui encadre les pieux Portiques de suspension Station totale marqueur indélébile Cales de différentes épaisseurs Poste de soudure à l'arc	Q Position des portiques en planimétrie et altimétrie	Gaines isolantes autour des armatures principales des pieux sur la hauteur de recepage
			S Chute dans le fleuve Chocs avec les pièces en mouvement Brûlures et de projections lors de chute de métal fondu dans la rivière	
			E chute de métal fondu dans la rivière	Etanchéité entre le tube et le radeau
4	Bétonnage des pieux et recépage partiel sur béton frais  Goulotte de bétonnage Rack de stockage des tubes	Barge sur pieds Grue Barge en fer à cheval qui encadre les pieux Mat de bétonnage	Q Mauvais remplissage du pieu Délavage du béton Arase du béton	Utilisation de tube à l'extrémité du mat de bétonnage en guise de goulotte de bétonnage Utilisation d'une pige flottant sur le béton
			S	
			E Déversement de l'eau contenu dans le pieu dans la rivière Déversement de béton dans le fleuve	Pompage de l'eau au fur et à mesure du bétonnage, passage par le bassin de décantation. Fermeture de l'extrémité du tube de bétonnage

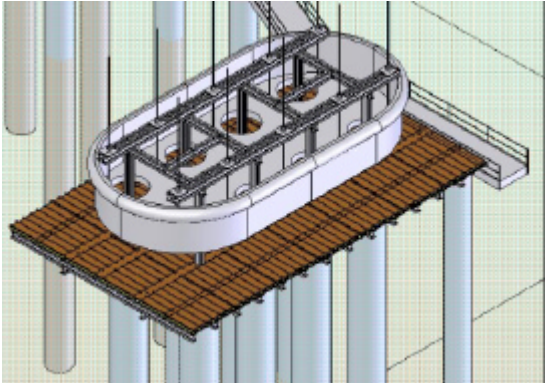
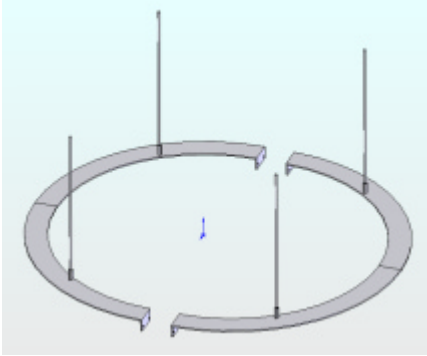
N°	Description détaillée des tâches et croquis	Matériel et matériaux nécessaires	Risques	Mesures de prévention ou contrôles
5	Dépose des extensions des consoles d'appui : Elingage des consoles Dépose des boulons d'assemblages Dépose des suspentes des cages d'armatures 	Barge sur pieds Grue Barge en fer à cheval qui encadre les pieux Clés Chalumeau	Q Résistance du béton	Prévoir les boucles de levage Test sur éprouvettes de contrôle
			S Poids des extensions de console Chocs avec les consoles en mouvements	Cordes de guidage
			E chute de métal fondu dans la rivière	Etanchéité entre le tube et le radeau

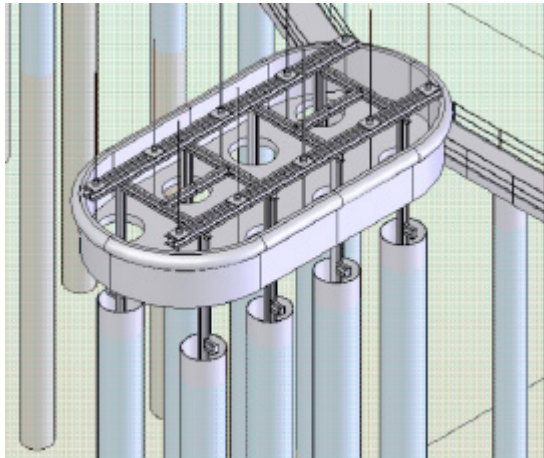
N°	Description détaillée des tâches et croquis	Matériel et matériaux nécessaires	Risques	Mesures de prévention ou contrôles
6	Réalisation du platelage de coulage du batardeau 	Barge sur pieds Grue Barges en fer à cheval qui encadre les pieux 2 Poutrelles principales HEA 800 x 21.000 m 15 poutrelles secondaires HEA 400 x 13.000 m 7 plateaux Doka 2.500 x 3.000 35 plateaux doka 2.000 x 3.000 Contre-plaqué DOKAFLEX 21 mm Gardes corps périphériques Escalier d'accès Poutres de suspension équipées des vérins	Q Défaut de position des poutres métalliques	Des butées auront été prévues au cours de la fabrication des charpentes pour assurer le bon positionnement des éléments
			S Chute dans le fleuve Chocs avec les pièces en mouvement Chute de hauteur	Cordes de guidage Echelles à crinoline avec plateforme de travail à trappe accrochées sur les traverses des portiques
	Mise en place des poutres de suspension 		E RAS	

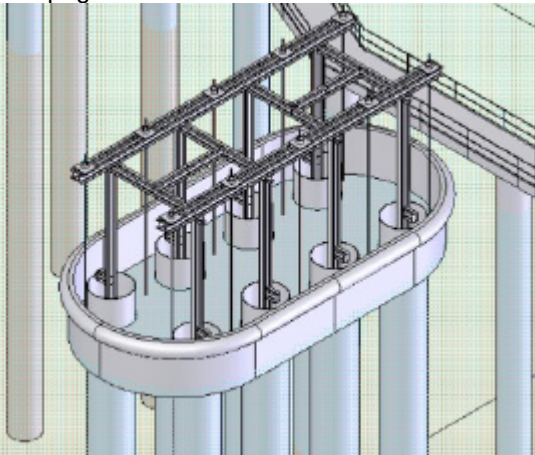
N°	Description détaillée des tâches et croquis	Matériel et matériaux nécessaires	Risques	Mesures de prévention ou contrôles
7	Réalisation du voile périphérique du batardeau (en 4 phases)  	Fond de coffrage en CTBC de 10 mm Coffrage spécifique pour le parement extérieur Banches classiques et cintrables pour le parement intérieur Lests Cages d'armatures + cales Boîtes d'attentes Béton Mât de bétonnage Aiguilles vibrantes PIR	Q Reprise de bétonnage	Joint en V
			S Chutes des banches Chutes depuis les banches Instabilité du voile après décoffrage	Lests Prise en compte de la trajectoire de chute dans le dimensionnement du platelage Passerelles et échelle d'accès La partie courbe assure la stabilité de l'élément coulé après décoffrage
			E Projection d'huile de décoffrage en rivière Projection de béton frais en rivière Projection de béton durci en rivière en phase de nettoyage	Huile biodégradable d'origine végétale Application de l'huile au rouleau Fermeture de la goulotte à chaque fin de bétonnage Nettoyage à sec Bac à gravats de proximité

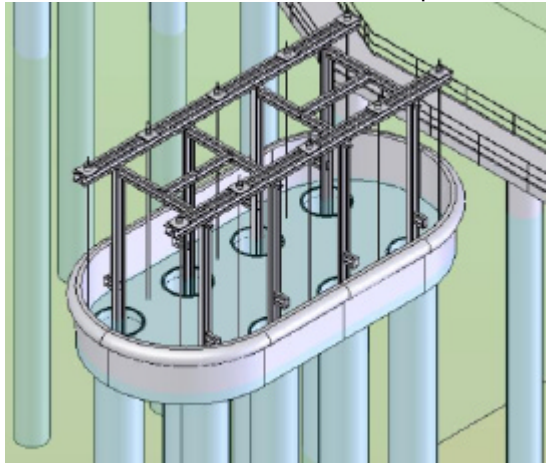
N°	Description détaillée des tâches et croquis	Matériel et matériaux nécessaires	Risques	Mesures de prévention ou contrôles
8	Mise en place des suspentes  	20 Suspentes 10 platines d'ancrage 10 plaques de tirage 10 écrous 10 coupleurs	Risque de rupture Q Réglage de la hauteur libre des tirants	Tirants neufs Un coupleur sera placé entre deux tronçons Contrôle de l'altitude de l'extrémité haute des tirants à la station totale
			S Chute de hauteur	Echelles à crinoline avec plateforme de travail à trappe accrochées sur les traverses des portiques
			E RAS	

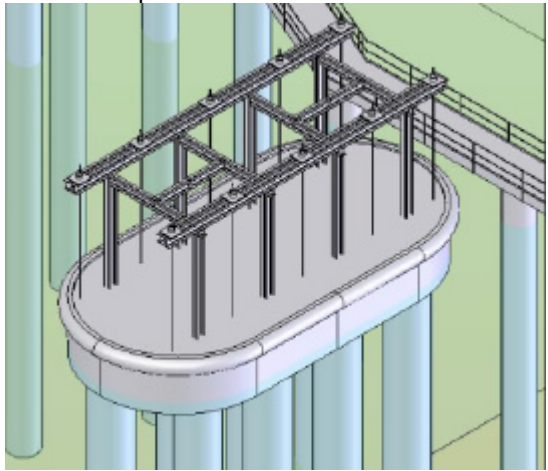
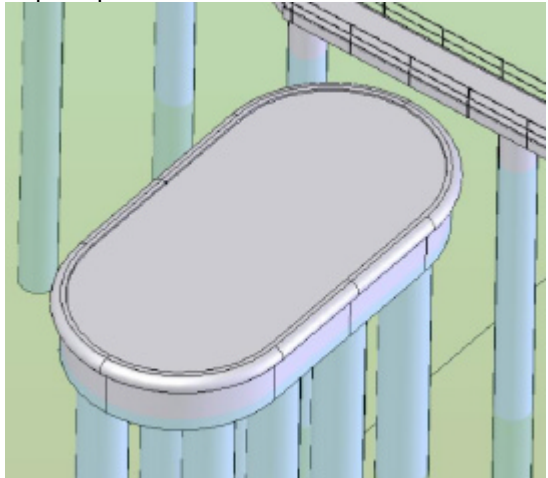
N°	Description détaillée des tâches et croquis	Matériel et matériaux nécessaires	Risques	Mesures de prévention ou contrôles
9	Réalisation du radier du batardeau Coffrage des réservations autour des pieux Ferrailage Bétonnage 	Fond de coffrage en CTBC de 10 mm Armatures coupées façonnées Distanceurs préassemblés Aiguille vibrante Béton	Q Stabilité des parements sous la poussée du béton	Mise en place de butée en pied extérieur du parement Mise en place de 3 tirants entre les deux parties droites (à la cote +0,500)
			S Chute de hauteur au passage du voile périphérique	Echelle à crinoline côté extérieur et côté intérieur
			E Chute de métal dans la rivière Projection d'huile de décoffrage en rivière Projection de béton frais en rivière	Bac à ferrailles de proximité Huile biodégradable d'origine végétale Application de l'huile au rouleau Fermeture de la goulotte à chaque fin de bétonnage

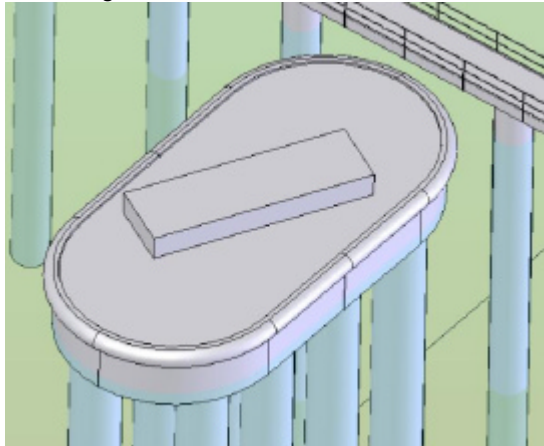
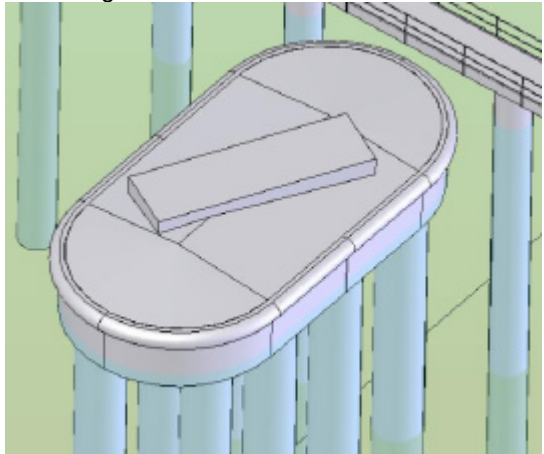
N°	Description détaillée des tâches et croquis	Matériel et matériaux nécessaires	Risques	Mesures de prévention ou contrôles
10	Elévation du batardeau de 1.800 m  Dépose de la peau de coffrage du fond du chevêtre Mise en place, sous le radier, de viroles suspendues sur des chevalets reposant sur le radier ; les tiges filetées d'assemblages sont mis en place en permettant un jeu de 100 mm 	Viroles suspendues d'étanchéité	Q Arrachement des suspentes	Test sur éprouvettes de contrôle
			S Chute de hauteur pendant le serrage des écrous de reprise	Passerelles intégrées aux poutres de suspension
			E Fuites d'huile hydraulique Déchets de contreplaqué	Mise en place du groupe hydraulique dans un bac de rétention placé sur l'un des portiques Utilisation de flexibles neufs ri des plaques réutilisables en vue de leur nettoyage sur l'aire d'installation de chantier Mise en benne DIS des panneaux abîmés ou découpés

N°	Description détaillée des tâches et croquis	Matériel et matériaux nécessaires	Risques	Mesures de prévention ou contrôles
11	Dépose du platelage de coulage Les bandes de contreplaqué entre les plateaux sont déposés pour permettre la dépose des boulons d'assemblage des raidisseurs Les plateaux coffrants sont tirés au tire fort au dessus de l'estacade pour permettre leur découplage Les poutrelles primaires et secondaires sont retirées avec la grue sur barge à pied 	Barge sur pieds Grue	Q	
			S Chute en rivière	Lors des opérations de dépose du contreplaqué entre plateau et de la dépose des boulons les ouvriers seront équipés de gilets de sauvetage et de harnais de sécurité Passerelle et escalier d'accès à l'intérieur du batardeau
			E Chute de contreplaqué en rivière Chute de boulons en rivière	Sensibilisation des ouvriers Système de fixation des boulons sur les profilés

N°	Description détaillée des tâches et croquis	Matériel et matériaux nécessaires	Risques	Mesures de prévention ou contrôles
12	Descente du batardeau, obturation des réservations et épousement Descente du batardeau jusqu'à sa cote définitive (163.100 pour le parement supérieur du voile) Serrage des viroles autour des tubes des pieux Bétonnage des anneaux entre pieux et radiers Pompage de l'eau incluse dans le batardeau 		Q	
			S Travaux en plongée	Plongeurs avec narguilé
			E	

N°	Description détaillée des tâches et croquis	Matériel et matériaux nécessaires	Risques	Mesures de prévention ou contrôles
13	Recepage des pieux Découpage des tubes au niveau du radier Recepage du béton type recépieu Eclatement du béton en blocs transportables 	Mini pelle avec BRH	Q Adhérence du béton sur les armatures	Les armatures, ainsi que les pieds de portiques ont été gainées de mousse pour supprimer cette adhérence
			S Chute en rivière	Garde corps périphérique en tête du voile périphérique
			E Fuites d'huile hydraulique Chute de béton durci en rivière	Location d'une machine neuve Benne à gravats de proximité
14	Ferrailage du chevêtre et du bossage d'appui	Plateforme de circulation sur les cages d'armatures	Q Position des armatures de brêlage	Contrôle par deux équipes de géomètres indépendantes
			S Chute dans la cage d'armatures	Mise en place de chemin d'accès avec plateforme et garde corps
			E	

N°	Description détaillée des tâches et croquis	Matériel et matériaux nécessaires	Risques	Mesures de prévention ou contrôles
15	Bétonnage jusqu'à la cote -0.100 par rapport à l'arase supérieure du batardeau 	Béton Mât de bétonnage Aiguilles vibrantes	Q	
			S Chute en rivière	Garde corps périphérique
			E	
16	Dépose du système de suspension suspente et portiques 	Chalumeau	Q Résistance du béton	Test sur éprouvettes de contrôle
			S Chute en rivière Chocs avec les pièces en mouvement	Garde corps périphérique Cordes de guidage
			E	

N°	Description détaillée des tâches et croquis	Matériel et matériaux nécessaires	Risques	Mesures de prévention ou contrôles
17	Réalisation du bossage d'appui Implantation Coffrage Bétonnage 	Banches manportables type Paschall	Q Niveau d'arase du bossage	
			S Chute de plain pied et de hauteur	Escalier d'accès pour monter sur la cage d'armature Mise en place de chemin d'accès avec plateforme et garde corps
			E Huile de décoffrage	
18	Bétonnage de l'arase du chevêtre Relevage des attentes Mise en place des armatures de peau Bétonnage 	Treillis soudé de peau	Q	
			S	
			E	

Rapport du jury Projet A

Les membres du jury rappellent aux candidats que l'épreuve de projet option A comporte deux parties : calcul de structure et étude de réalisation.

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

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

Partie B1- Etudes techniques

1.1- Etude de l'arc

Cette partie du sujet a très peu retenu l'attention des candidats alors qu'il s'agit d'un exercice de RdM assez classique. En effet, la position de la démarche de résolution du système hyperstatique (degré 1) est exécutée par seulement $\frac{1}{4}$ des candidats et moins de 5% ont une approche satisfaisante des sollicitations H et M.

Seulement 15% des candidats ont pensé à la sollicitation de poids propre de l'arc.

1.2- Tirant de l'arc

La plupart des candidats a abordé cette question.

La lecture des sollicitations n'a généralement pas posé de difficultés, sauf quelquefois sur l'interprétation du signe de l'effort normal qui était ici bien évidemment de la traction.

Les candidats traitent globalement bien la question des contraintes normales, mais beaucoup ne savent pas calculer correctement une contrainte de cisaillement. Pour la contrainte de flexion $M/(I/v)$; nombreux sont ceux qui réalisent M/I . Le calcul de contrainte de cisaillement est très souvent inexact.

La justification réglementaire en flexion composée, abordée par 20% des candidats, est souvent mal traitée.

1.3- Etude du PRS en encorbellement

Le bilan des charges et la détermination de la sollicitation de calcul est abordée par beaucoup de candidats, mais bien souvent de façon très approximative. Il est important de définir un schéma mécanique clair, coté, et dûment renseigné avant de faire des calculs !

Au-delà du résultat brut de la sollicitation, le jury a apprécié les copies où les hypothèses étaient clairement énoncées, avec une démarche cohérente et complète.

Le prédimensionnement est abordé dans la moitié des copies. Beaucoup de candidats sont très démunis et proposent un profilé qu'ils s'attachent à vérifier selon les principaux critères de l'eurocode. Cela conduit donc à des solutions quelquefois peu réalistes. La plupart des candidats oublie la vérification de flèche en service qui est en fait assez déterminante ici.

Partie B2- Etude de réalisation

1. Réalisation de la culée C0

1.4- Quantitatif

La plupart des candidats a abordé cette question.

La lecture des plans a posé des problèmes à quelques-uns d'entre eux qui n'ont pas vu les murs en retour ou les entretoises.

Un nombre non négligeable de candidats a placé un coffrage en sous face du radier.

Beaucoup n'ont pas adapté la décomposition du quantitatif au phasage de réalisation

La majorité des candidats ont bien présenté leurs calculs, dans ce cas la correction pouvait apporter des points même si le résultat final était faux. Mais tous ceux dont on ne pouvait suivre les détails du calcul ou dont les détails étaient inexistantes avec des résultats faux ne pouvaient obtenir aucun point pour cette partie.

1.5- Calcul et conception de l'étalement.

Même si d'autres modes constructifs peuvent sembler mieux adaptés que le coulage de la dalle pleine sur coffrage, les candidats doivent répondre à la question posée, à savoir la conception et le calcul de l'étalement du coffrage de la dalle pleine.

Certains candidats n'ont pas évalué correctement les charges à reprendre.

La majorité des candidats ont traité ce problème et la conception du coffrage et de l'étalement était correcte avec une peau de coffrage, des raidisseurs primaires et secondaires soutenus par des étais. Mais cette conception ne prend pas assez en compte les contraintes liées au décoffrage dans la cellule close.

Certains candidats ont préféré partir d'espacements choisis à priori qu'ils ont ensuite vérifié, mais dans ce cas soit les espacements n'étaient pas optimisés soit ils étaient faux et dans ce cas ils devaient refaire leur calcul avec une perte de temps non compatible avec ce type d'épreuve.

Cette étude était demandée dans le cadre d'une réponse à un appel d'offre et non dans le cas d'une préparation de chantier. Cela implique que la note de calcul pouvait utiliser des méthodes simplifiées (dans le sens de la sécurité) afin d'arriver le plus rapidement possible aux résultats en prenant des coefficients de sécurité importants sur les actions ou comme dans le sujet sur les contraintes admissibles des matériaux.

Pour le calcul des actions, nous souhaitons que les candidats différencient le calcul aux ELU pour la vérification des contraintes et aux ELS pour la vérification des déformations. Comme ces calculs ne sont pas règlementés, le choix des coefficients a été laissé libre (EC1, EC2 ou EC5). Dans la correction un choix de coefficient unique de sécurité a été choisi avec une valeur de 1.5.

Pour le calcul des éléments, par simplification dans le sens de la sécurité et compte tenu de la longueur des éléments, on pouvait les considérer isostatiques sur deux appuis.

Peu de candidats ont fait la vérification des contraintes de cisaillement. Le jury a accepté l'utilisation de la théorie simplifiée ou générale pour le calcul des contraintes de cisaillement.

1.6- Plans et coupes de l'étalement.

Beaucoup de candidats ont réalisé des croquis, mais leur qualité rend leur lisibilité parfois délicate.

Trop souvent, le repérage des éléments et les cotes nécessaires à leur mise en place manquent.

2. Réalisation de la pile P1

2.1 Phasage de l'ensemble des travaux.

Beaucoup de candidats ont abordé cette question, mais la contrainte des travaux en rivière n'a pas toujours été bien prise en compte.

2.2 Mode opératoire du chevêtre

Seuls 50% des candidats ont abordé cette question, mais le concept du batardeau préfabriqué suspendu n'a que rarement été compris.

La plupart des modes opératoires réalisés seraient inexploitable par les opérateurs d'un chantier.

3. Conclusions

La première partie très simple par rapport au niveau demandé à l'agrégation aurait du permettre aux candidats d'obtenir de bien meilleures notes que celles obtenues. Même lorsque les calculs semblaient corrects, ils étaient effectués sans tenir compte de la réalité et des contraintes du chantier.

Les candidats doivent être critiques et prendre du recul sur les solutions proposées.

On ne peut que renouveler notre conseil de réaliser de nombreuses visites ou suivis de chantier en développant un esprit curieux afin de bien comprendre avantages et inconvénients de chaque solution aperçue.

Eléments de correction de l'épreuve portant l'ingénierie de projet
Option B : EQUIPEMENTS ET ENERGIES

1^{ère} PARTIE : Conception du système de production/distribution d'énergie du bâtiment

1.1 Le projet doit répondre au niveau de performance permettant d'obtenir un label BBC - Effinergie. Vous préciserez les différentes exigences requises pour ce label, puis vous établirez un comparatif avec la réglementation thermique actuelle RT 2005, ainsi qu'avec les autres labels européens des bâtiments à basse consommation d'énergie (Passivhaus et Minergie).

La réglementation thermique RT 2005, fixe des exigences minimales à respecter. Les labels permettent de concevoir des bâtiments plus performants, en termes de consommation d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre. Ils répondent aux standards des Bâtiments Basse Consommation (BBC) et bâtiments Passifs. Ces exigences sont modulées en fonction du type de bâtiment, logements individuel ou collectif, tertiaire, bâtiment neuf ou ancien.

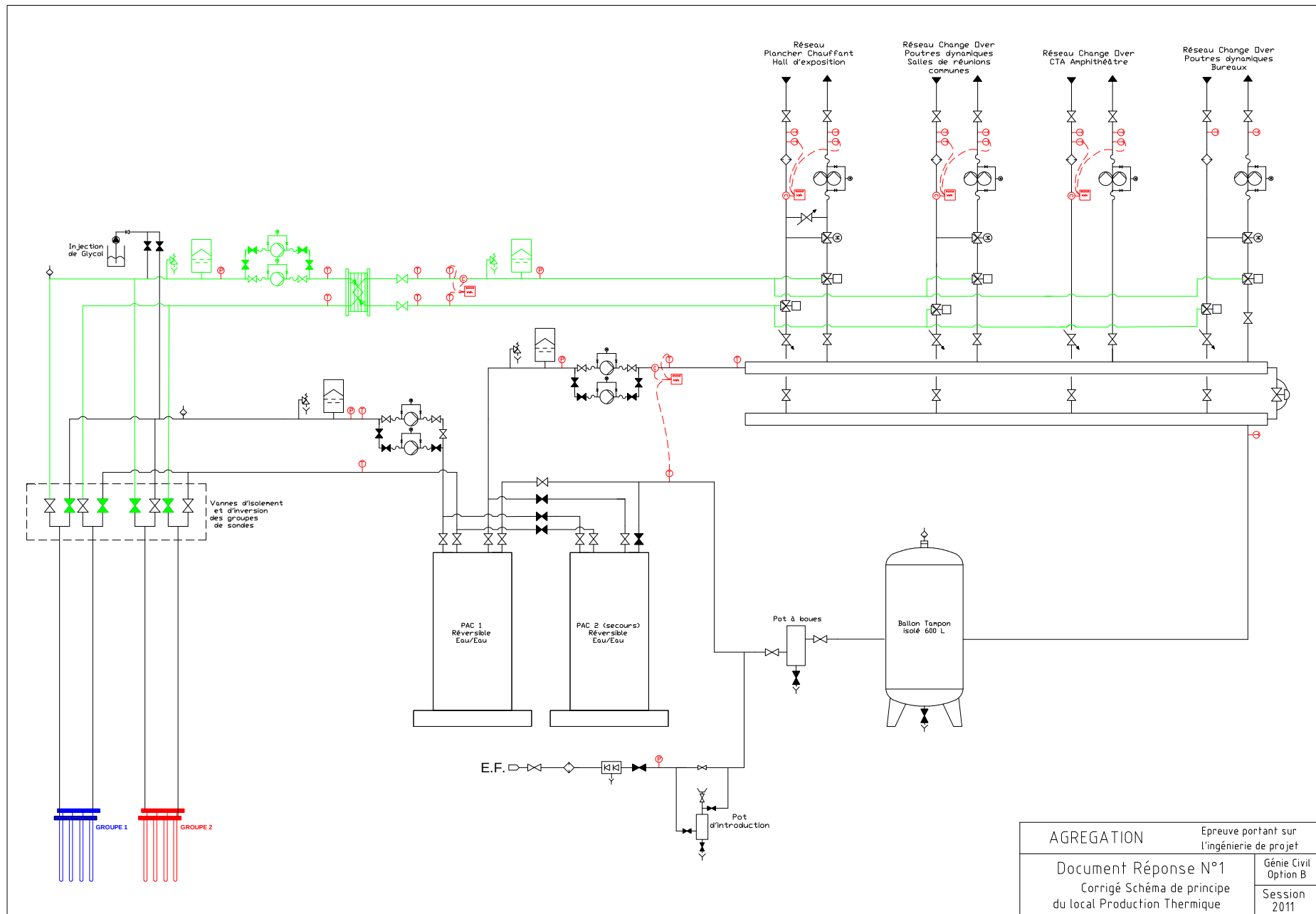
	Réglementation thermique 2005	Label BBC Effinergie	Label allemand Passivhaus	Label Suisse Minergie Standard
Consommation d'énergie en énergie primaire par année et par m ²	130 kWh _{EP} /m ² .an En zone H1, pour des combustibles fossiles	40 à 65 kWh _{EP} /m ² .an en fonction des zones climatiques (région et altitude) soit un seuil modulé de 50 kWh _{EP} /m ² .an	120 kWh _{EP} /m ² .an pour tous les usages Et 15 kWh/m ² .an en énergie utile pour le chauffage	42 kWh _{EP} /m ² .an
Surface prise en compte	Surface Hors Œuvre Net SHON	SHON	Surface HABitable SHAB	Surface de référence énergétique
Périmètre d'application	Chauffage Refroidissement ECS Auxiliaires Eclairage	Chauffage Refroidissement ECS Auxiliaires Eclairage	Chauffage Refroidissement ECS Auxiliaires Eclairage + Multimédia et Electroménager	Chauffage Refroidissement ECS
Prise en compte des ENR	La production locale d'énergie électrique (photovoltaïque, éolien ...) est déduite de la consommation en énergie primaire	La production locale d'énergie électrique (photovoltaïque, éolien ...) est déduite de la consommation en énergie primaire	Pas de déduction	La production locale d'énergie électrique par photovoltaïque, est déduite
Etanchéité à l'air	Pas de test d'étanchéité obligatoire, valeur de référence	Sous une dépression de 4 Pascals, un objectif de perméabilité inférieur ou égal à 0,6 m ³ /h.m ² en maison individuelle et 1,0 m ³ /h.m ² en collectif (débit de fuite "i4")	Sous une dépression de 50 Pascals (débit de fuite "n50"), un objectif de perméabilité inférieur ou égal à 0,6 vol/h en maison individuelle et en collectif	Pas d'exigence
Matériaux	Respect des valeurs des garde-fous	Pas d'exigence	Pas d'exigence	Les exigences imposées à la valeur U pour les parois du bâtiment sont fixées à 0,15 W/m ² K
Coûts	Pas d'exigence	Pas d'exigence	Pas d'exigence	Le surinvestissement ne doit pas excéder 10% par rapport à un bâtiment conventionnel équivalent.

Remarque 1 : Les coefficients de conversion permettant de passer de l'énergie utile à l'énergie primaire. Ils sont différents d'un pays à l'autre (en France, le Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie retient pour l'électricité une valeur de 2,58).

Remarque 2 : Lors de la rédaction du sujet de l'agrégation de la session 2011, les textes de la RT 2012 n'étaient pas encore parus. Le label BBC Effinergie a servi de base pour élaborer cette réglementation.

1.2. A partir des éléments donnés dans l'extrait du CCTP (Annexe N°1), vous devez élaborer un schéma de principe de l'ensemble de l'installation de production/distribution d'énergie pour le chauffage, le rafraîchissement et la climatisation, de la maison régionale de l'innovation (Document réponse N°1).

Ce schéma de principe devra être conforme au cahier des charges et comporter : la production d'énergie à partir des sondes géothermiques, les réseaux primaires et secondaires avec tous les éléments de sécurité, de régulation et les équipements nécessaires au bon fonctionnement des installations.



AGREGATION		Epreuve portant sur l'ingénierie de projet	
Document Réponse N°1		Génie Civil Option B	
Corrigé Schéma de principe du local Production Thermique		Session 2011	

2^{ème} PARTIE : Dimensionnement de l'installation géothermique

2.1. Performance de la Pompe A Chaleur

2.1.1. A partir des extraits du CCTP et des différents documents annexes, sélectionner le modèle de PAC adapté.

La PAC est choisie de manière à couvrir les déperditions (85 176 W d'après tableau récapitulatif). Le régime de température côté évaporateur étant légèrement différent des valeurs annoncées par le fabricant, il est possible de faire une interpolation (entre 2 et -4°C) pour sélectionner le modèle retenu, ILG 300V.

2.1.2. Tracer le cycle frigorifique de la PAC retenue sur le document réponse N°3, en précisant toutes les hypothèses manquantes. Rassembler les caractéristiques des points dans un tableau récapitulatif.

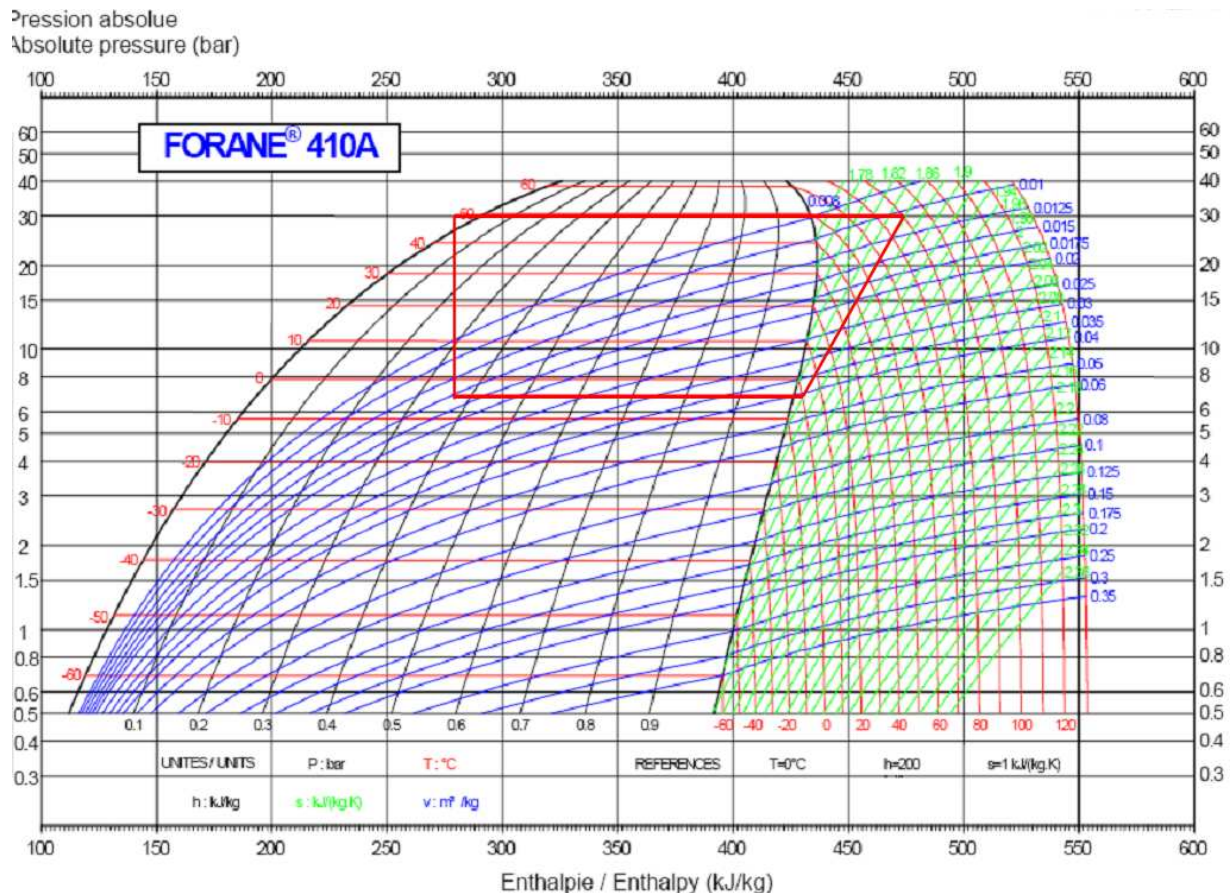
Hypothèses :

- Pincement évaporateur : 5°C (régime 0/3°C)
- Pincement condenseur : 5 °C (régime 45/40°C)
- Sous-refroidissement : 5 °C
- Compression isentropique

→ Pression de condensation $P_k = 30$ bar abs → $T_k = 50$ °C

→ Pression d'évaporation $P_o = 7$ bar abs → $T_o = -5$ °C

Point	P absolue (bar)	T (°C)	H (kJ/kg)
1	7	0	431
2	30	80	472
3	30	45	280
4	7	-5	280



2.1.3. A partir des éléments de la question précédente, évaluer le coefficient de performance réel de la PAC. Toutes les hypothèses posées seront justifiées. Comparer ce résultat à la valeur annoncée par le constructeur.

$$\text{COP cycle frigo} = P_c / P_{\text{comp}} = (472 - 280) / (472 - 431)$$
$$\text{COP cycle frigo} = 4,68$$

Si on tient compte d'un rendement isentropique = rendement volumétrique
(rendement volumétrique = $1 - 0,05 P_k/P_0$ valable pour les compresseurs à pistons, pour les compresseurs Scrolls le rendement est bien meilleur, 0,90 par hypothèse) $\eta_v = 0,90$
Si on tient compte d'un rendement électrique global : 0,8
 $P_{\text{abs élec}} = P_{\text{comp}} / 0,72$

d'où le COP réel de la PAC :

$$\text{COP réel} = P_c / P_{\text{abs élec}} = 3,37$$

A titre de comparaison, le constructeur indique $P_c = 87,8 \text{ kW}$ et $P_{\text{abs}} = 23,4 \text{ kW}$ (à T sortie 2°C légèrement différente), soit un COP de 3,75 (en raison certainement d'un sous refroidissement plus élevé, et une surchauffe plus faible).

2.1.4. Quelle valeur du COP moyen annuel peut-on attendre sur ce projet ? Argumenter votre réponse.

Le COP moyen de la PAC seule sera plus important, étant donné que le régime d'eau chaude à produire sera fonction de la température extérieure. De plus, le captage par sonde géothermique offre une température relativement constante sur l'année.

2.1.5. Vérifier si l'énergie prélevée dans le sol respecte les valeurs préconisées par le BRGM.

A partir des déperditions données du bâtiment, et des hypothèses de fonctionnement de la PAC (les puissances calorifique et électrique absorbée définissant le COP), on peut définir la puissance soutirée du sol :

Bilan énergétique simplifié sur la PAC :

$$P_f + P_{\text{abs}} = P_c \quad (P_c = D_p)$$
$$P_f = D_p - P_{\text{abs}}$$

or $\text{COP} = P_c / P_{\text{abs}} \rightarrow P_{\text{abs}} = P_c / \text{COP}$

$$P_f = D_p - D_p / \text{COP} = D_p \cdot (1 - 1/\text{COP})$$

$$P_f = D_p \cdot (1 - 1/3,75) = D_p \times 0,733$$

Le COP (3,75) est déterminé à partir des caractéristiques de la PAC (voir tableau de performances),

$$P_f = 85\,176 \cdot 0,733 = 62\,462 \text{ W}$$

A cette étape, il faut nécessairement connaître le nombre de sondes en traitant la question suivante.

2.2. Etude du réseau de Sondes Géothermiques Verticales (SGV)

2.2.1. Déterminer le nombre de sondes géothermiques nécessaires pour le mode de fonctionnement hiver.

En fonction des résultats du test de réponse thermique du terrain, et en se reportant au tableau intitulé « Calcul de la puissance soutirable et longueur de sondes », il est possible de définir la puissance maximale par mètre de sonde :

- Conductivité thermique du sol : $\lambda = 2,74 \text{ W/m.K}$,
- Pas de nappe souterraine,
- Pas de production d'eau chaude

$$\text{Soit } 49,4 \text{ W / m d'après tableau}$$

Longueur nécessaire de sonde : $L = P_f / 49,4 = 62\,462 / 49,4 = 1264,4 \text{ m}$
Soit :

$$13 \text{ sondes géothermiques verticales de } 100 \text{ m}$$

Vérification des valeurs préconisées par le BRGM :

⇒ Calcul des besoins énergétiques annuels du bâtiment :

DP = 85 176 W pour Text = -11 °C et Ti = 18 °C

DJU Dijon = 2 675 °Cj (base 18 °C).

Besoin pour le chauffage → $B = (DP \times 24 \times DJU) / (Ti - Text) = 182\,276 \text{ kWh}$

COP annuel estimé à 3,75 → Energie puisée dans le sol : $Q = B \times (1 - 1/COP) = 130\,197 \text{ kWh}$

Energie soutirée par m de sonde : (13 sondes de 100 m)

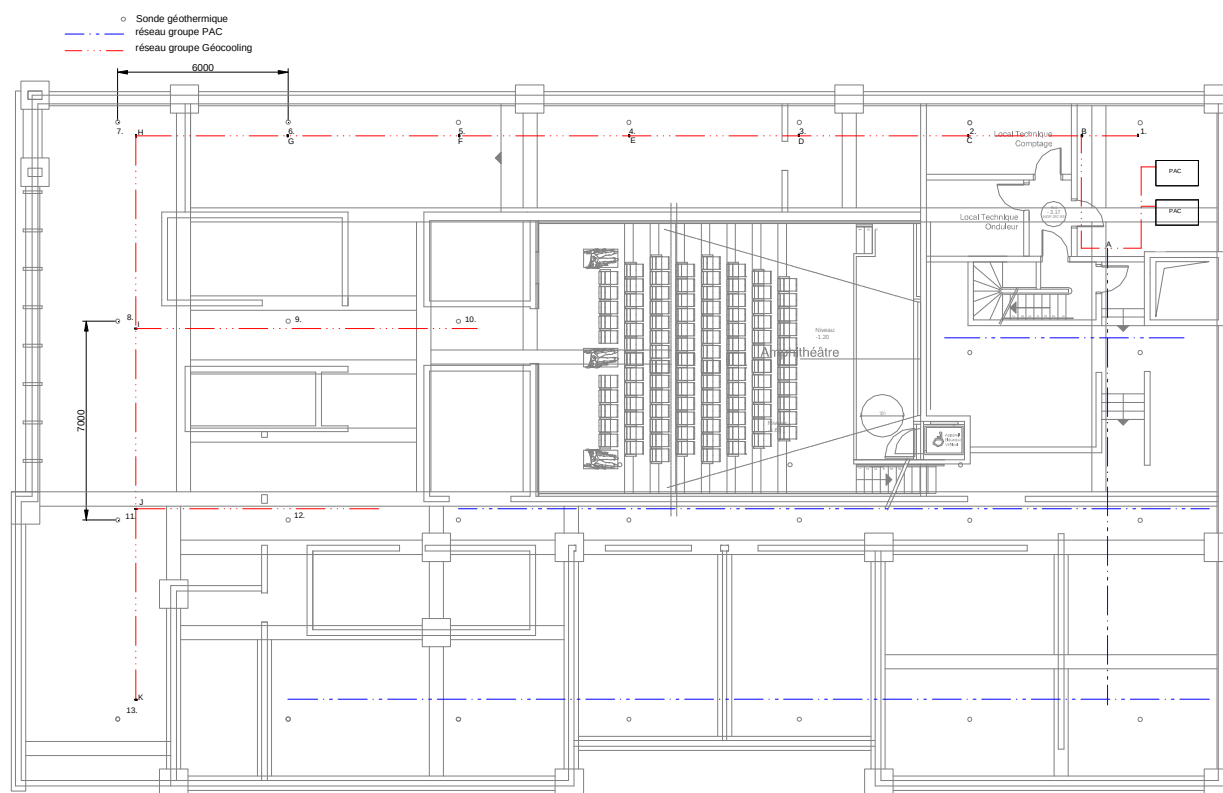
$E = Q / 13 / 100 = 100 \text{ kWh / m.an}$ (valeur limite...)

Conformément aux indications du BRGM, la limite de 100 kWh / m.an est atteinte, ceci justifiant qu'un système de réinjection des calories durant l'été soit prévu pour la régénération du sol.

Nota : Ce calcul ne tient pas compte des besoins réels du bâtiment, les apports gratuits (ensoleillement et occupation) et l'intermittence, n'étant pas estimés.

Un réseau aérien, divisé en deux parties, a pour fonction de collecter les sondes géothermiques du groupe Géocooling, d'une part, et les sondes géothermiques du groupe PAC, d'autre part. Le réseau aérien est fixé au plafond du vide sanitaire. Le bureau d'étude a déterminé la position des branches principales du réseau aérien, sur le plan du sous-sol (voir document réponse N°2).

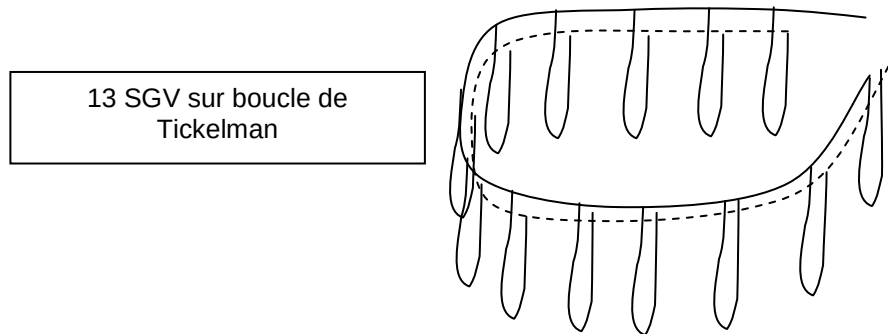
2.2.2. Compléter le schéma hydraulique du réseau primaire (Document réponse N°2) en effectuant le raccordement de toutes les sondes à ce réseau aérien (le nombre de sondes raccordées correspondra au résultat de la question précédente). Employer des couleurs différentes pour le réseau PAC et le groupe Géocooling. Proposer une analyse critique de la solution retenue.



Le candidat devait compléter la feuille réponse, en y indiquant le raccordement des 13 sondes sur le circuit rouge (groupe PAC), en notant le n° de chaque SGV et le nom de chaque tronçon distinct pour la suite du dimensionnement.

Analyse de la solution retenue :

Une disposition des 13 SGV, en périphérie du bâtiment, en formant une boucle de Tickelman serait la plus simple au point de vue équilibrage :



La solution présentée dans le sujet implique donc un équilibrage à définir à la question suivante.

2.2.3. Dimensionner l'ensemble du réseau hydraulique primaire du groupe PAC (de la sonde du groupe PAC la plus éloignée jusqu'au local technique PAC). Un tableau récapitulatif rassemblera l'ensemble des résultats (débits, diamètres, pertes de charge). L'équilibrage hydraulique de l'ensemble est attendu.

Le dimensionnement de l'ensemble du réseau hydraulique primaire de la PAC commence par la détermination du débit dans chaque tronçon :

a) Détermination du nb de sondes géothermiques verticales :

Débit dans une sonde :

$$P_{\text{unit}} = Q_m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad \rightarrow \quad Q_m = P_{\text{unit}} / C_p \cdot \Delta T$$

$$P_{\text{unit}} = P_f / \text{nb sondes} = 62\,462 / 13 = 4\,804 \text{ W}$$

$$C_p \text{ Eau glacée} : C_p = 3,68 \text{ kJ/kg.K}$$

$$Q_{m_{EG}} = 4\,804 / 3\,680 / 3 = 0,435 \text{ kg/s} = 1\,566 \text{ kg/h}$$

$$Q_{v_{EG}} = Q_{m_{EG}} / \rho = 1\,566 / 1\,050 = 1,49 \text{ m}^3/\text{h}$$

Débit de l'ensemble des 13 sondes :

$$Q_v \text{ total} = 13 \times 1,49 = 19,37 \text{ m}^3/\text{h}.$$

b) Dimensionnement, calcul de pdc

Le calcul est mené pour de l'eau glycolée (viscosité cinématique, chaleur massique indiquées dans le sujet). Les dimensions des tronçons sont à reprendre sur le plan (écartement 6 m ou 7 m).

Par hypothèse, les pdc singulières sont estimées à 15 % des pdc linéaires.

Le débit est divisé par 2 dans la sonde géothermique du fait qu'il y a 2 tubes en U (erreur de certains candidats).

Le calcul des pertes de charges linéaires est mené à l'aide de la formule de Blasius, par souci de simplicité.

Pour déterminer l'équilibrage de l'ensemble des sondes, il faut sélectionner une vanne TA, (position grande ouverte sur la sonde la plus éloignée) qui sera installée sur le retour de chaque sonde. Un calcul précis des pertes de charges à compenser est à faire, et permet de déterminer la position finale de chaque vanne TA.

3^{ème} PARTIE : Traitement d'air

3.1. A partir des indications du CCTP et des plans de la salle de réunion F du rez-de-chaussée, effectuer la conception complète de l'installation de traitement d'air de cette salle de réunion. Les dimensionnements devront être réalisés dans les conditions les plus défavorables en été et en hiver. Pour l'été, prendre comme hypothèse de départ, les conditions intérieures suivantes : $T_i = 26^\circ\text{C}$ et $\phi_i = 50\%$.

Tracer les évolutions de l'air sur les diagrammes psychrométriques fournis, et déterminer les caractéristiques des différents éléments composant l'installation de traitement d'air de la salle de réunion F (puissances, débits d'air). Sélectionner, à partir du document constructeur (Annexe N°8), les unités intérieures à installer (nombre de modules de confort, références, puissances). Tous les choix techniques effectués devront être clairement justifiés.

CAS ETE : estimation des charges enthalpiques et hydriques en été ($\theta_i = 26^\circ\text{C}$ et $\phi_i = 50\%$):

- Apports par les occupants :
 - Occupation : 30 personnes
 - Apports sensibles pour une activité modérée : 67 W/pers
 - Apports latents pour une activité modérée : 83 W/pers
 - Public mixte : Réduction de 10 %
- Apports par l'éclairage :
 - Surface au sol : 53 m^2
 - Apports sensibles pour un éclairage fluorescent à haut rendement : 9 W/m^2
- Apports par les vitrages :
 - Surface de vitrage : $7,6 \text{ m}^2$
 - Orientation : sud
 - Vitrage avec protection solaire extérieure (brise soleil horizontaux)
 - Charge solaire maximale le 21 juillet à 13h : 150 W/m^2
 - Facteur solaire : 0,4
- Apports par les parois opaques : négligeables (faible coefficient de transmission)

Nature des charges	Apports sensibles (W)	Apports latents (W)	Apports totaux (W)
Apports par les occupants	1 809	2 241	4 050
Apports par l'éclairage*	477	-	477
Apports par les vitrages	456	-	456
Total	2 742	2 241 ($9.10^{-4} \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{s}$)	4 983

Nota : * calculs effectués dans le cas le plus défavorable, avec présence d'éclairage

Détermination des différents débits dans l'installation :

Air neuf hygiénique (CCTP) : $25 \text{ m}^3/\text{h}$ par personne, soit $750 \text{ m}^3/\text{h}$ pour la salle de réunion F

D'après le CCTP, une partie de l'air est amenée par les 4 modules de confort ($120 \text{ m}^3/\text{h}$ par module) et le complément par les diffuseurs de soufflage : $750 - 480 = 270 \text{ m}^3/\text{h}$

L'air neuf est ramené aux conditions intérieures, de 26°C et 50% : $0,862 \text{ m}^3/\text{kg}$

Calcul des débits massiques :

- Air neuf dans la centrale double flux : $750 / (0,862.3600) = 0,24 \text{ kg/s}$
- Air neuf au niveau des diffuseurs : $0,09 \text{ kg/s}$
- Air neuf (air primaire) dans les modules de confort : $0,16 \text{ kg/s}$
- Air soufflé par les modules de confort avec un taux d'induction de 3 (taux d'induction ; $\tau = q_{m_{\text{air-induit}}} / q_{m_{\text{air-primaire}}}$) : $0,62 \text{ kg/s}$

Détermination de la température de sortie de la CTA, avec récupérateur rotatif :

L'air neuf des bureaux est traité par une centrale de traitement d'air avec échangeur rotatif d'efficacité 85% .

$$\varepsilon = (\theta_E - \theta_A) / (\theta_E - \theta_i)$$

ε : efficacité de l'échangeur rotatif

θ_E : température de l'air extérieur

θ_i : température de l'air intérieur

θ_A : température de l'air en sortie de l'échangeur rotatif

D'où une température sortie d'air de : $\theta_A = \theta_E - \varepsilon. (\theta_E - \theta_i) = 32 - 0,85.(32 - 26) = \underline{26,9^\circ\text{C}}$

L'air neuf soufflé par les diffuseurs peut être considéré comme une charge thermique, car il n'est pas traité par les modules de confort (en pointillé vert, limite du système).

Apport sensible de l'air neuf insufflé par les diffuseurs : $H_{sensAN} = q_{mAN} \cdot C_{p_{as}} \cdot (\theta_A - \theta_i)$

Avec q_{mAN} : débit massique d'air neuf au niveau des diffuseurs : 0,09 kg/s
 h_A : enthalpie de soufflage de l'air en sortie de CTA : 56,5 kJ/kg_{as}
 h_i : enthalpie de l'air intérieur : 53 kJ/kg_{as}

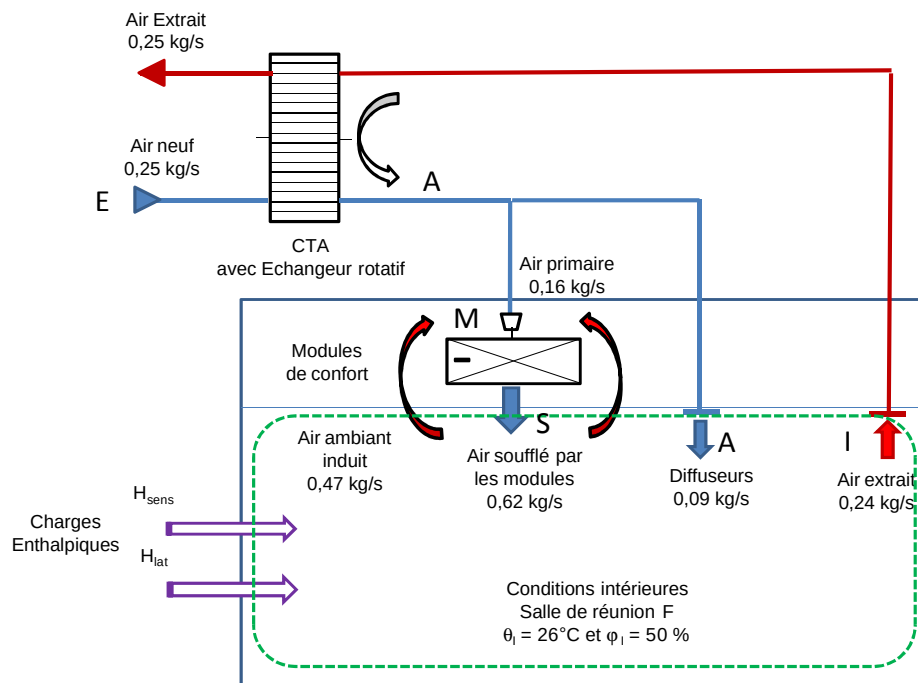
Soit, $H_{sensAN} = 90 \text{ W}$

Apport latent de l'air neuf insufflé par les diffuseurs : $M_{latAN} = q_{mAN} \cdot (r_A - r_i)$

Avec r_A : humidité absolue de soufflage de l'air en sortie de CTA : 11,3 g_{eau}/kg_{as}
 r_i : humidité absolue de l'air intérieur : 10,5 g_{eau}/kg_{as}

Soit, $M_{latAN} = 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$

Schéma simplifié de l'installation



Bilan en chaleur sensible de la salle de réunion (Méthode simplifiée) :

$$H_{sens} = q_{m_{as}} \cdot C_{p_{as}} \cdot (\theta_i - \theta_s)$$

Avec $q_{m_{as}}$: débit massique d'air soufflé au niveau des modules : 0,62 kg/s
 $C_{p_{as}}$: capacité thermique massique de l'air sec 1 kJ/kg $^\circ\text{C}$
 $\theta_i - \theta_s$: écart de soufflage en $^\circ\text{C}$

Donc, $\theta_i - \theta_s = H_{sens} / (q_{m_{as}} \cdot C_{p_{as}}) = 2,832 / 0,62 = 4,6 \text{ }^\circ\text{C}$ soit $\theta_s = 21,4 \text{ }^\circ\text{C}$

Bilan hydrique de la salle de réunion (Méthode simplifiée) :

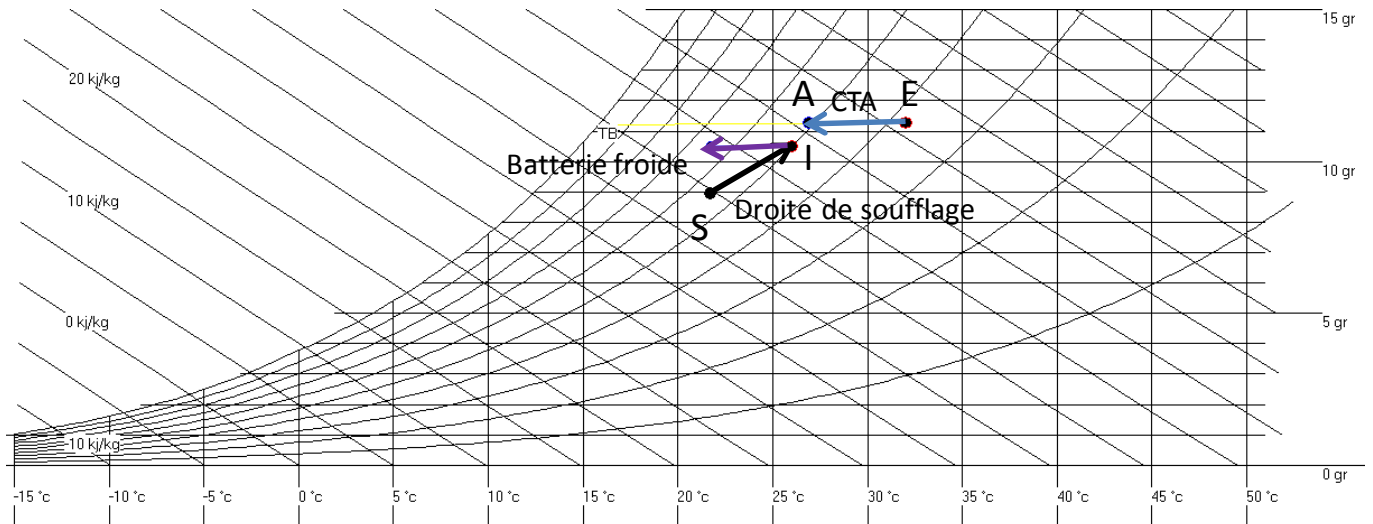
$$M_{lat} = q_{m_{as}} \cdot (r_i - r_s)$$

Avec r_i = humidité absolue de l'air intérieur : 10,5 g_{eau}/kg_{as}
 r_s = humidité absolue de l'air soufflé au niveau des modules

Donc, $r_s = r_i - M_{lat} / q_{m_{as}} = 0,0105 - 9,7 \cdot 10^{-4} / 0,62 = 0,009 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$

On peut placer le point de soufflage sur le diagramme et tracer la droite de soufflage du local.

Evolution sur le diagramme de l'air humide en été



Détermination des caractéristiques des modules de confort, puissance de la batterie froide :

- Module de confort : 4
- Régime d'eau : 14/19, soit une température moyenne de 16,5 °C (pas de condensation)
- Débit d'air par module : 33 litres/s (120 m³/h)

La capacité de refroidissement par l'air neuf entrant dans le module de confort est négligeable puisque la température de l'air primaire (26,9°C) est très proche de la température de l'air ambiant.

Pour un module, la capacité de refroidissement par l'eau est donnée par le tableau de l'annexe N°8 avec $\Delta T_m = 26 - 16,5 = 9,5$ °C et un débit primaire de 33 litres/s soit 889 W par module.

Evolution de l'air dans le module de confort :

Le module réalise un mélange de l'air neuf sortie CTA (air primaire) et de l'air repris (air induit) avant d'effectuer le refroidissement.

Point de mélange en entrée du module de confort : $\theta_M = (q_{m_{AR}} \cdot \theta_I + q_{m_{AP}} \cdot \theta_A) / q_{m_{AS}}$
 $\theta_M = (0,47 \cdot 26 + 0,16 \cdot 26,9) / 0,62 = 26,4$ °C

Avec $q_{m_{AR}}$: débit massique d'air ambiant (air induit) : 0,47 kg/s
 $q_{m_{AP}}$: débit massique d'air primaire : 0,16 kg/s
 $q_{m_{AS}}$: débit massique d'air soufflé par les modules : 0,62 kg/s

Puissance de refroidissement : $P_{BF} = q_{m_{as}} (h_I - h_B) = 0,62 \cdot (53 - 48) = 3,1$ kW pour les 4 modules, soit une puissance de 800 W/module, La puissance nécessaire correspond bien au modèle sélectionné 1200 MF qui peut fournir 889 W

CAS HIVER : estimation des charges enthalpiques et hydriques en hiver ($\theta_i = 19$ °C et $\phi_i = 50$ %):

Déperditions par transmission et infiltration des salles de réunion du RDC :

	Surfaces (m ²)	Coefficient de transmission (W/m ² °C)	Ecart de température (°C)	Déperdition par transmission (W)
Menuiseries extérieures	7,6	1	30	228
Murs extérieurs	37,5	0,155	30	174,3
Plancher bas sur VS	53	0,215	30	342
Ponts thermiques *				112
Total				860

Nota : * par hypothèse, les ponts thermiques représentent 15 % des pertes surfaciques – D'après la note de calcul donnée en annexe N°4, les pertes par infiltration peuvent être négligées.

L'étude étant menée dans les conditions les plus défavorables, les apports internes et externes ne sont pas pris en compte (sans occupation).

Déperdition par transmission de la salle de réunion F : - 860 W

Détermination de la température de sortie de la CTA, avec récupérateur rotatif :

$$\varepsilon = (\theta_E - \theta_A) / (\theta_E - \theta_I)$$

ε : efficacité de l'échangeur rotatif

θ_E : température de l'air extérieur

θ_I : température de l'air intérieur

θ_A : température de l'air en sortie de l'échangeur rotatif

D'où une température sortie d'air de : $\theta_A = \theta_E - \varepsilon \cdot (\theta_E - \theta_I) = -11 - 0,85 \cdot (-11 - 19) = \underline{14,5 \text{ } ^\circ\text{C}}$

L'air neuf soufflé par les diffuseurs peut être considéré comme une charge thermique, car il n'est pas traité par les modules de confort.

Apport sensible par l'air neuf insufflé par les diffuseurs : $H_{\text{sensAN}} = q_{\text{mAN}} \cdot C_{p\text{as}} \cdot (\theta_A - \theta_I)$

Avec q_{mAN} : débit massique d'air neuf au niveau des diffuseurs : 0,09 kg/s

h_A : enthalpie de soufflage de l'air en sortie de CTA : 18 kJ/kg_{as}

h_I : enthalpie de l'air intérieur : 36,5 kJ/kg_{as}

Soit, $H_{\text{sensAN}} = - 405 \text{ W}$

Bilan en chaleur sensible de la salle de réunion (Méthode simplifiée) :

$$H_{\text{sens}} = q_{\text{mAS}} \cdot C_{p\text{as}} \cdot (\theta_I - \theta_S)$$

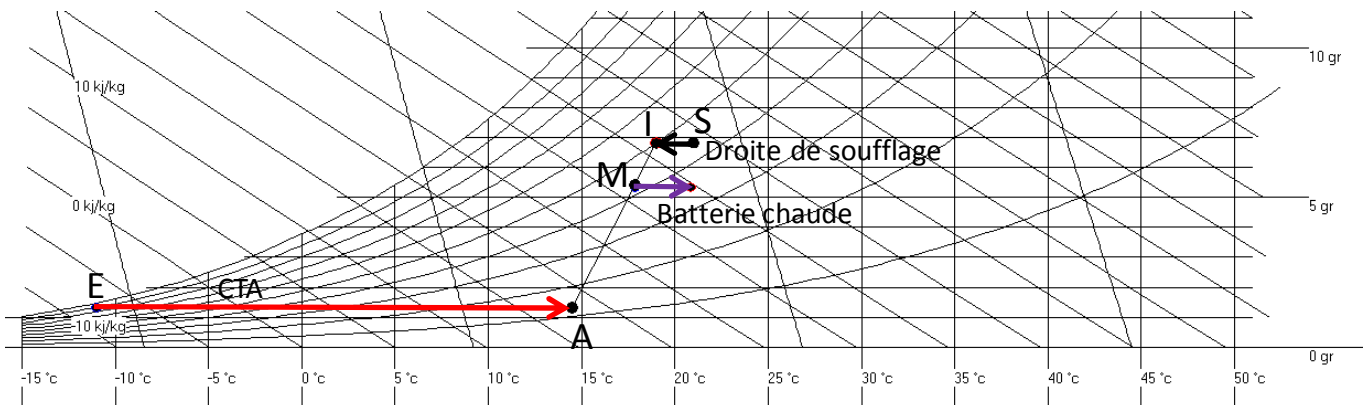
Avec q_{mas} : débit massique d'air soufflé au niveau des modules : 0,62 kg/s

$C_{p\text{as}}$: capacité thermique massique de l'air sec 1 kJ/kg $^\circ\text{C}$

$\theta_I - \theta_S$: écart de soufflage en $^\circ\text{C}$

Donc, $\theta_I - \theta_S = H_{\text{sens}} / (q_{\text{mAS}} \cdot C_{p\text{as}}) = - 1,265 / 0,62 = - 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ soit $\theta_S = 21 \text{ } ^\circ\text{C}$

Evolution de l'air sur le diagramme de l'air humide en hiver



Détermination des caractéristiques des modules de confort ; puissance de la batterie chaude :

- Module de confort : 4
- Régime d'eau : 40/35, soit une température moyenne de 32,5 $^\circ\text{C}$
- Débit d'air par module : 33 litres/s

Pour un module, la capacité de chauffage par l'eau est donnée par le tableau de l'annexe N°8, avec $\Delta T_m = 32,5 - 19 = 13,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ et un débit primaire de 33 litres/s soit 903 W par module

Evolution de l'air sur le diagramme de l'air humide dans le module de confort :

Le module réalise un mélange de l'air neuf sortie CTA et de l'air repris avant d'effectuer le refroidissement.

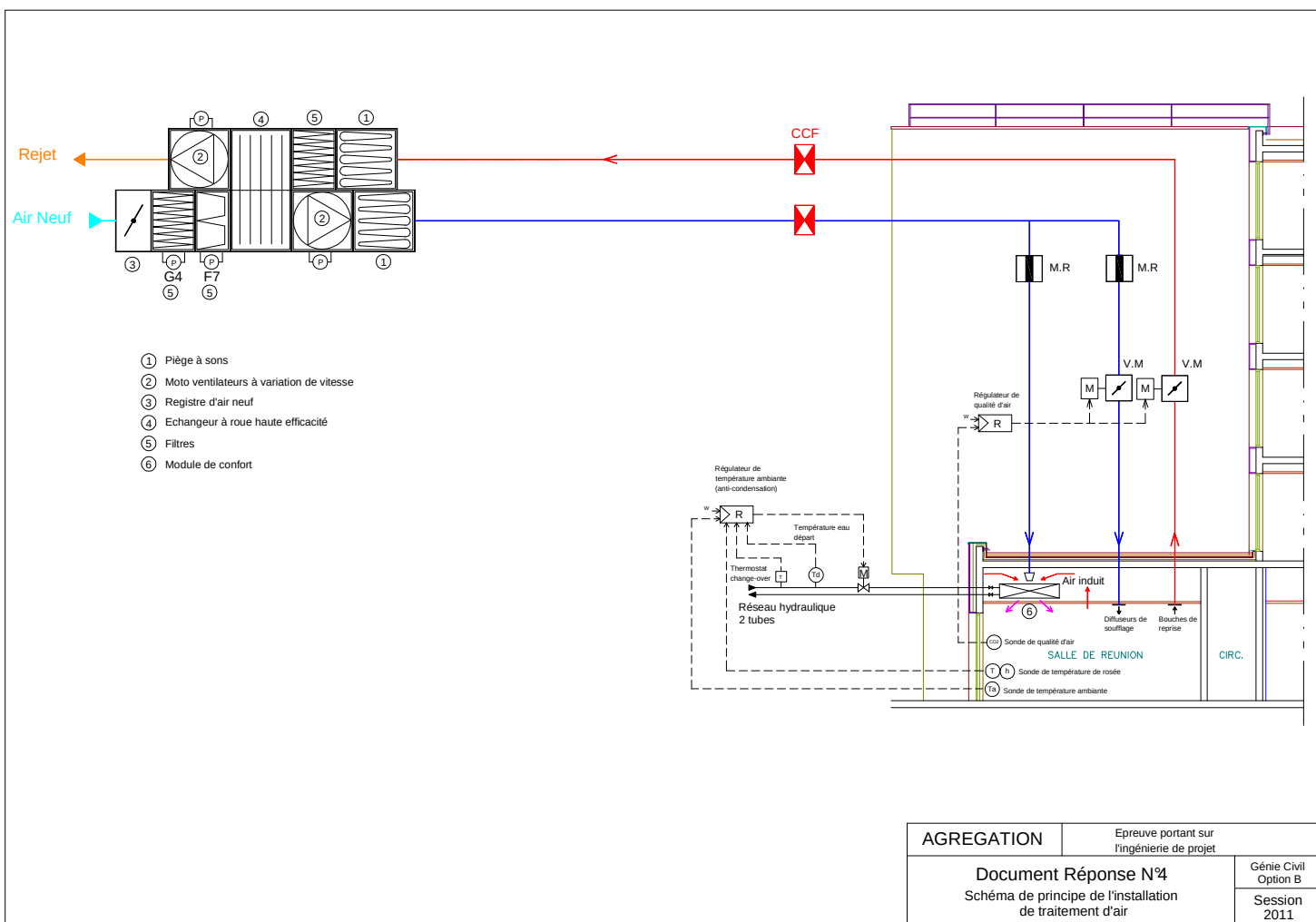
Point de mélange en entrée du module de confort : $\theta_M = (q_{m_{AR}} \cdot \theta_I + q_{m_{AP}} \cdot \theta_A) / q_{m_{AS}}$
 $\theta_M = (0,47 \cdot 19 + 0,16 \cdot 14,5) / 0,64 = 18^\circ\text{C}$

Avec $q_{m_{AR}}$: débit massique d'air ambiant : 0,47 kg/s
 $q_{m_{AP}}$: débit massique d'air primaire : 0,16 kg/s
 $q_{m_{AS}}$: débit massique d'air soufflé : 0,62 kg/s

Puissance de chauffage : $P_{BC} = q_{m_{AS}} \cdot (h_M - h_C) = 0,62 \cdot (36 - 32,5) = 2,17 \text{ kW}$ pour les 4 modules, soit une puissance de 560 W/module

La puissance nécessaire correspond bien au modèle sélectionné 1200 MF qui peut fournir 900 W. En mode chauffage, 3 modules seraient suffisants.

3.2. Réaliser un schéma de principe de l'installation depuis la CTA double flux jusqu'aux modules de confort, avec tous les éléments nécessaires pour ce type d'installation, afin de respecter les critères du CCTP et la réglementation en vigueur. Faire apparaître les différents réseaux aérauliques, hydrauliques avec tous les composants (sondes, actionneurs, régulateurs) des boucles de régulation (Document réponse N°4).

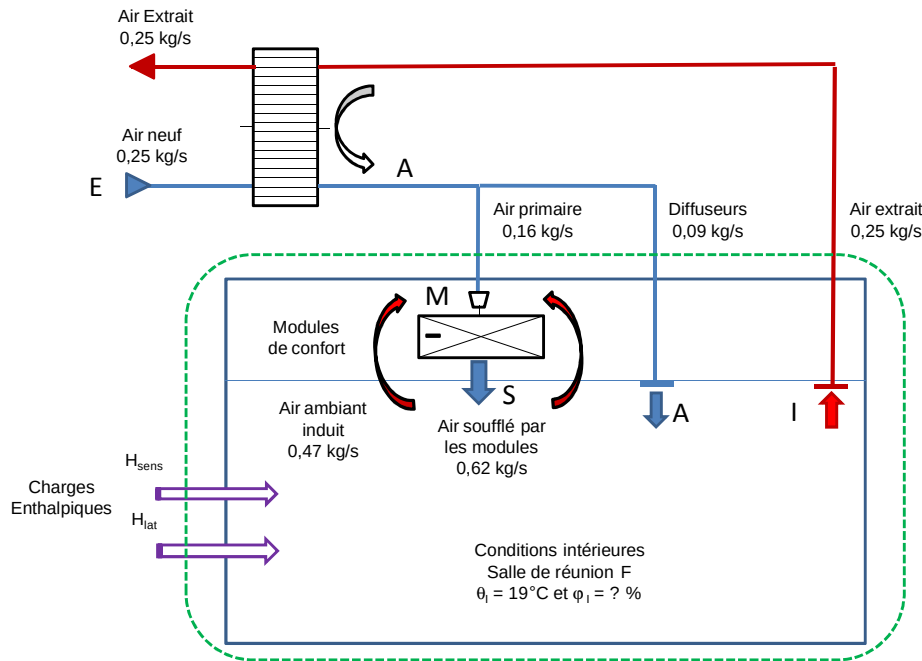


3.3. Lorsque la salle de réunion F est occupée à sa capacité maximum d'accueil en période hivernale, déterminer la valeur de l'humidité relative dans la pièce. Analyser la dérive de ce paramètre en période estivale et ses incidences sur l'installation.

Cas hiver, en occupation maximale :

Nature des charges	Apports sensibles (W)	Apports latents (W)	Apports totaux (W)
Apports par les occupants	30 x 100 x 0,9 2 700	30 x 50 x 0,9 1 350	4050
Apports par l'éclairage	477	-	477
Déperditions	- 860		- 860
Total	2 317	1 350 ($5,4 \cdot 10^{-4}$ kg _{eau} /s)	3 667

Pour déterminer le taux d'humidité de l'air dans la salle de réunion, nous allons écrire un bilan hydrique au niveau de la frontière du système (pointillés vert).



Avec qm_{AN} : débit massique d'air neuf des diffuseurs : 0,09 kg/s
 qm_{AP} : débit massique d'air primaire des modules : 0,16 kg/s

Bilan hydrique : $qm_{AP} \cdot (r_i - r_A) + qm_{AN} \cdot (r_i - r_A) = M$

$r_A = r_E$: Evolution dans l'échangeur rotatif comme dans une batterie chaude = 1,4 g/kg_{as}

$$\text{Donc } r_i = r_A + M / (qm_{AP} + qm_{AN}) = 0,0014 + 5,4 \cdot 10^{-4} / (0,09 + 0,16)$$

$$r_i = 3,56 \text{ g}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$$

Ce qui correspond à un taux d'humidité de 25 %. L'air neuf extérieur, de faible humidité relative, assure une déshumidification de l'air ambiant.

Cas été en occupation maximale :

En période estivale, la batterie froide se comporte comme une batterie froide sèche tant que la teneur en humidité du point de mélange (M) en entrée du module de confort est inférieure à la teneur en humidité du point de fin de processus théorique. Si l'humidité relative continue d'augmenter (apports par les personnes), la dérive du taux d'humidité va provoquer une condensation superficielle au niveau de la batterie froide. Pour éviter ce phénomène, les modules de confort sont équipés d'une régulation anti-condensation.

4^{ème} PARTIE : Etude de la récupération des eaux de pluie

Le maître d'ouvrage a prévu la mise en place d'une récupération d'eaux pluviales, permettant d'alimenter les toilettes (WC) de tout le bâtiment. Le stockage devant être à l'abri du gel, une première solution consiste à implanter des cuves dans le local PAC.

4.1. Analyser le choix du maître d'ouvrage, en appuyant votre réflexion sur le volume d'eau consommé par les toilettes, les données pluviométriques du site et la place nécessaire dans le local PAC pour le stockage. En déduire le volume d'eau économisé sur une année, le volume de stockage et réaliser, à l'échelle, l'implantation des cuves, sur le document réponse N°5. Proposer éventuellement d'autres solutions.

Volume des précipitations :

Total annuel : 732 mm / an
Coefficient de restitution : 0,6 (toiture plate)
Surface de toiture collectée : 1250 m²

Volume d'eau collectée : $1250 \times 0,6 \times 732 / 1000 = 549 \text{ m}^3$

Volume d'eau consommée :

360 pers * 2 fois / jour = 720 fois / jour utilisations WC

Volume par jour utilisé : $720 \times 6 \text{ litres} = 4,32 \text{ m}^3$

Volume annuel d'eau pour les WC : 47 semaines (5 sem de vacances/ an) x 5 jours /sem x 4,32 = **1015 m³**

Volume de stockage d'après les précipitations ?

- Stockage accueillant une semaine de précipitation :
au mois le plus fort (mai), il faudrait : $64/4 = 16 \text{ m}^3$
au mois le moins pluvieux (juillet) : $38/4 = 9,56 \text{ m}^3$
- Autre approche possible :
Volume de stockage = Volume d'eau consommée / jour * nb semaines autonomie
En pratique, 3 semaines d'autonomie sont généralement considérées = $4,3 \times 5 \times 3 = 64,5 \text{ m}^3$

➔ Envisager dans ce cas une cuve de stockage à un autre endroit dans le bâtiment (vide sanitaire à modifier pouvant être utilisé).

Solution retenue : 4 cuves de 2000 litres + une cuve de 1500 litres (encombrement 382 cm + 73 cm).

Autre solution possible : 5 cuves de 1500 litres.

Solution à dessiner sur document réponse n°5, en respectant l'échelle.

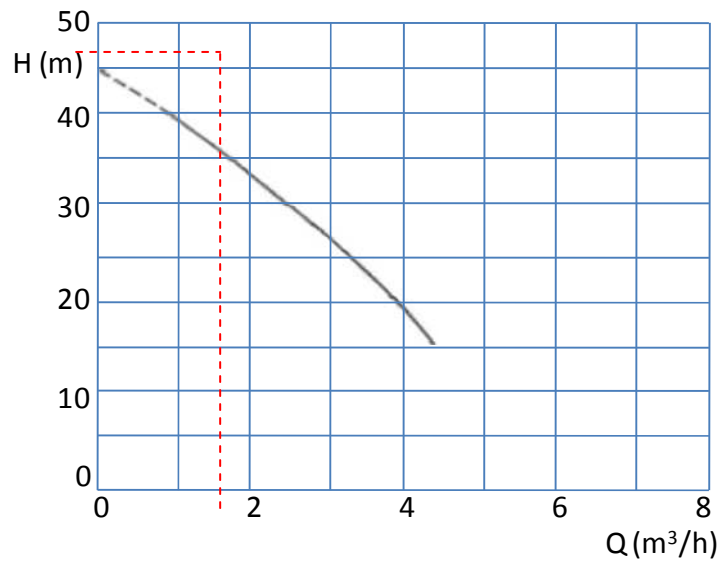
4.2. Vérifier la sélection du groupe de surpression mentionné dans le CCTP.

- Il faut pour cela définir le débit probable de l'ensemble des toilettes $Q_p = Q_b \cdot (0,8 / \sqrt{(x-1)})$

Nb appareils à alimenter : $x = 22$
Coefficient simultanéité : $0,8 / \sqrt{(22-1)} = 0,174$

 $Q_p = (22 \times 0,12) \times 0,174 = 0,46 \text{ l/s} = 1\,659 \text{ l/h} = \mathbf{1,66 \text{ m}^3/\text{h}}$
- Définir ensuite la différence d'altitude entre le groupe surpresseur et le point le plus haut à alimenter, la pression nécessaire au bon fonctionnement des toilettes est donnée dans le CCTP.
 - Différence de hauteur : (d'après coupe verticale) $\Delta h = 13,90 + 2,8 = \mathbf{16,70 \text{ m}}$
 - Pression d'alimentation des appareils : 3 bar = **31 mCE**

- Définir aussi de manière très simplifiée les pertes de charge du réseau de distribution (10 à 15 mmCE /m)
Longueur estimée à 30 m : $0,010 \times 30 = 0,30$ mCE
- **$H_m = 16,7 + 0,30 + 31 = 47,70$ mCE**
- En réunissant ces paramètres sur la courbe de pompe du groupe surpresseur, on pourra vérifier si celui-ci convient.



Le surpresseur n'est pas assez puissant pour fournir 3 bars de pression au point le plus haut ; il pourra fournir 2 bars, ce qui suffit généralement.

5^{ème} PARTIE : Etude acoustique du local technique PAC

5.1. Déterminer le niveau de bruit global réverbéré (en dBA) dans le local PAC. Les cuves de stockage d'eaux de pluie ne seront pas prises en compte pour cette étude. Les hypothèses complémentaires seront clairement exposées. Compléter le document réponse N°6.

- Différentes étapes à suivre :
 - Prendre en compte le niveau de pression mesuré par le fabricant de la PAC, en tenant compte des conditions d'essai :

■ Niveaux de pression acoustique ref 2×10^{-5} Pa $\pm$ 3 dB

Conditions de mesure :

- champ libre
- à 10 mètres de la machine, 1,50 mètre du sol
- directivité 2

Tailles	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Niveau Lp global dB(A)
120	46	34	34	28	28	29	28	35
150	47	43	41	35	29	33	25	39
200	47	28	29	31	31	33	30	38
240	47	37	37	31	31	32	31	38
300	50	46	44	38	32	36	28	42

- A partir de cet essai, déterminer le niveau de puissance à la source, puis déterminer le niveau de bruit dans le champ réverbéré obtenu dans le local PAC.

Les dimensions du local PAC sont lues sur les plans :

I (m)	4,91	Splafond	26,0 m ²
L (m)	5,30	Smur latéraux	51,05 m ²
H (m)	2,50	Ssol	26,023 m ²
V (m3)	65,06	Sbéton	77,07 m ²

<i>f (Hz)</i>	125	250	500	1000	2000	4000	
Lp à 10 m champ libre Q = 2 d'après doc PAC	46	44	38	32	36	28	48,9
Calcul de Lw PAC Lw = Lp -10.log(Q/4πx²)	74,0	72,0	66,0	60,0	64,0	56,0	76,9
Calcul de l'aire d'absorption Local PAC α Béton	0,01	0,01	0,01	0,02	0,05	0,07	
α Béton.Sbéton	0,77	0,77	0,77	1,54	3,85	5,40	
α fibre bois	0,08	0,18	0,37	0,75	0,61	0,77	
α fibre bois.S bois	2,08	4,68	9,63	19,52	15,87	20,04	
A total local PAC	2,85	5,45	10,40	21,06	19,73	25,43	
10.Log (4/A)	1,47	-1,35	-4,15	-7,21	-6,93	-8,03	
Calcul de Lp rév local PAC Lp rév = Lw +10 Log (4/A) (Lp1)	75,5	70,6	61,8	52,8	57,1	47,9	
pondération A	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1	
Lp rév Local PAC (dBA)	59,4	62,0	58,6	52,8	58,3	48,9	66,2

Lp global(dBA) = 66,2 dBA

**5.2. Déterminer le niveau de bruit engendré dans le bureau situé au RDC, par le fonctionnement de la PAC (bureau situé au dessus du local technique PAC). Les transmissions latérales sont estimées à + 3 dB / octave.
Conclure sur le traitement acoustique de l'ensemble**

- Loi à utiliser pour les calculs de niveau de bruit dans le local bureau :

$$Db = Lp_1 - Lp_2 = R + 10 \cdot \log\left(\frac{A}{S}\right)$$

d'où : $Lp_{\text{bureau}} = Lp_{\text{PAC}} - R - 10 \cdot \log(A/S) + \text{transmissions latérales (a)}$

(a) estimées à +3 dB/octave

- Dimensions du bureau lues sur plan :

I (m) :	4,95	3,9
L (m) :	4,07	2,3
H (m) :	2,50	
V (m³) :	46,88	
S. plâtre (m²) :	41,51	
périmètre (m) :	18,04	(4,95 * 2 + 4,07 * 2)
S. plancher (m²) :	18,288	(4,07*3,9+2,3*(4,95-3,9))
S. verre (m²) :	1,90	
S. porte entrée (m²) :	1,69	

Indice
d'affaiblissement
de la paroi de
20 cm tenant
compte de la
pose des
panneaux de
bois agglomérés

Calcul de l'aire
d'absorption du
Bureau

Calcul de
Lp rév bureau

f (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
R (dB)	49	47	57	63	70	75
R + 1 (dB) tenant compte de la présence des panneaux de Fibralith	50	48	58	64	71	76
Tr (s) bureau resp. technique	0,9	0,5	0,5	0,5	0,4	0,35
A = 0,161V./Tr (m²) (V = 46,88 m³)	8,39	15,09	15,09	15,09	18,87	21,56
10log A/S (Splancher = 18,288 m²)	-3,39	-0,83	-0,83	-0,83	0,14	0,72
Transmissions latérales : a	+ 3	3	3	3	3	3
Lp rév bureau :						
Lp2 = Lp1 -R-10.log(A/S)+ a (dB)	31,8	26,5	7,7	0	0	0,0

Résultat : en utilisant la feuille ISO, on s'aperçoit que le niveau **NR15** n'est pas dépassé.

Conclusion : l'isolation phonique du local PAC et l'indice d'affaiblissement du plancher béton s'avèrent suffisants pour respecter les critères acoustiques imposés au niveau du bureau

RAPPORT DE JURY Epreuve portant sur l'ingénierie de projet Option B : Equipements et Energies

Partie 1 : Conception du système de production/distribution d'énergie du bâtiment

Question 1.1.

Le traitement de la première question concernant les labels des bâtiments à basse consommation d'énergie a montré qu'un grand nombre de candidats ne connaissaient pas le label français BBC Effinergie, le label allemand Passivhaus et le label Suisse Minergie. De nombreuses réponses étaient très incomplètes (pas d'indication de seuil de consommation, ou alors sans préciser s'il s'agit de kWh en énergie primaire ou finale, ramené sur la SHON ou SHAB ...).

Pour certains, des confusions ont été notées entre les labels et la démarche HQE ou le Diagnostic de Performance Energétique. Un tiers des candidats n'a pas, ou très peu, traité cette question. Aucun candidat n'a présenté ses analyses comparatives sous forme d'un tableau synthétique.

Seuls quelques candidats montrent une connaissance des textes régissant les bâtiments BBC et Passifs, avec des indications précises de seuil de consommation et de performance en termes de perméabilité à l'air.

Question 1.2.

Le jury note cette année une amélioration de la qualité graphique des schémas mais de nombreux candidats ne respectent pas les symboles normalisés.

Certains schémas proposés ne respectaient pas le CCTP avec notamment l'inversion des groupes de sondes. Le principe de géocooling consistant en un rafraîchissement gratuit sans fonctionnement des pompes à chaleur a dans l'ensemble été bien analysé par les candidats.

Un certain nombre de schémas restent trop succincts et ne font pas apparaître les éléments de sécurité, de régulation et de bon fonctionnement comme cela était demandé dans le sujet.

Partie 2 : Dimensionnement de l'installation géothermique

Question 2.1.

Les questions 2.1.1. et 2.1.2. ont été traitées correctement par une majorité de candidats.

Question 2.1.3 : Beaucoup de candidats se sont limités à la détermination du COP théorique à partir du cycle frigorifique sans intégrer les différents rendements.

Question 2.1.4 : Seuls 2 candidats ont compris que le COP annuel sera meilleur compte tenu du fait que la température d'eau à produire sera fonction de la température extérieure, les calculs précédents ayant été faits aux conditions les plus défavorables.

Question 2.2.

Question 2.2.1 : Le jury regrette qu'une grande partie des candidats n'aient pas pris en compte la puissance frigorifique pour déterminer le nombre de sondes.

Question 2.2.2 : Le document réponse permettait de guider les candidats dans la conception du réseau de sondes géothermiques. Une majorité de candidats a proposé une implantation cohérente.

Question 2.2.3. : Seuls quelques candidats ont proposé une méthode efficace de dimensionnement intégrant l'équilibrage.

Partie 3 : Traitement de l'air

Le jury précise que les candidats doivent justifier les hypothèses faites pour établir les bilans énergétiques de la salle de réunion et ne pas se contenter de donner uniquement les valeurs numériques.

Le CCTP proposait une description du système de ventilation alimentant les modules de confort et les diffuseurs plafonniers. Peu de candidats ont analysé correctement le principe de fonctionnement de ces modules (principe des poutres froides) et traduit ensuite correctement sous forme d'un schéma de principe l'architecture du système de traitement d'air.

Le dimensionnement de l'installation de traitement d'air ainsi que la sélection des matériels ont été très mal traités par la majorité des candidats. La méthode de détermination des conditions de soufflage à partir des charges enthalpiques et hydriques d'un local n'est pas maîtrisée.

Partie 4 : Etude de la récupération des eaux de pluie

Cette partie a été traitée par une majorité de candidats.

Le volume d'eau annuel collecté et la consommation annuelle ont bien été déterminés, mais la détermination du volume de stockage a constitué une difficulté pour de nombreux candidats.

Le dimensionnement du groupe de surpression a été réalisé par quelques candidats sans tenir compte de la pression résiduelle au point de puisage, ni des pertes de charges du circuit.

Partie 5 : Etude acoustique du local technique PAC

Seulement un tiers des candidats a traité partiellement l'étude acoustique. Comme il s'agit de la dernière partie du sujet, la mauvaise gestion du temps peut expliquer qu'un nombre important de candidats n'aient pas eu le temps pour la traiter.

Dans l'ensemble, les notions de base ne pas sont maîtrisées.

CONCOURS AGREGATION EXTERNE DE GENIE CIVIL – SESSION 2011 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, 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, voire des calculs de niveau terminale STI
- 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,
- un manque récurrent de croquis explicatifs cotés,
- une mauvaise utilisation du temps d'exposé ; il ne s'agit en aucun cas de faire un cours au jury (réglementation...), ou de présenter l'ouvrage pendant près de 10 minutes,
- 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 une 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 20 mn et doit comporter trois temps forts : la présentation du projet support (en illustrant son importance par des chiffres clés), le développement d'un point scientifique ou technique (à un haut niveau), l'exploitation pédagogique (en l'insérant dans le contexte).

Le jury a apprécié que les sujets traités par les candidats ne restent pas strictement cantonnés dans leur option.

Le jury apprécie qu'un plus grand nombre 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. Cependant, ces différents points, sont, encore trop souvent, traités de façon superficielle ou artificielle, et manquent de pertinence et d'ancrage dans le travail réalisé.

Partie « Agir en Fonctionnaire de l'Etat » sur 5 points

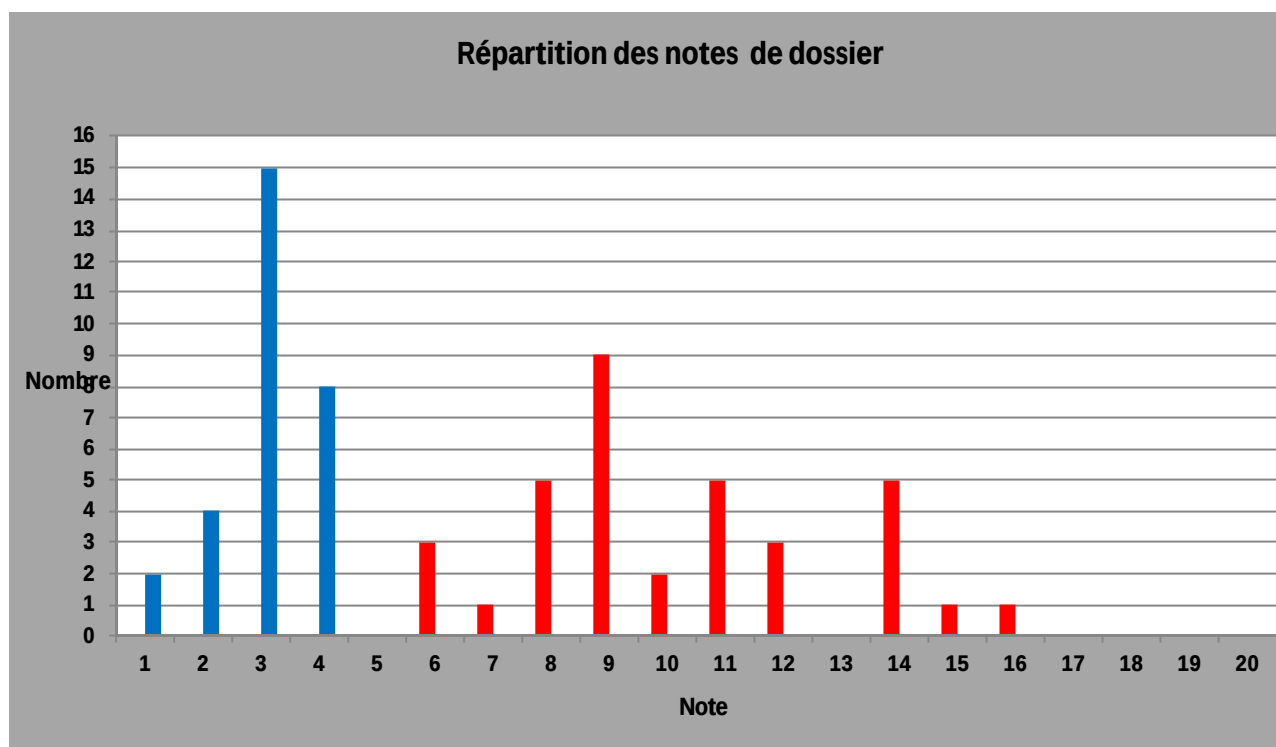
L'épreuve consiste à vérifier les connaissances du candidat en ce qui concerne le fonctionnement des différents organismes d'un établissement scolaire (CPE, Conseils,...), l'appui qu'il va trouver auprès de ceux-ci ainsi que son comportement face à une situation donnée, par exemple notation non équitable ou comportement d'un élève engageant la sécurité du groupe.

On constate que certains candidats connaissent mal, voire pas, le fonctionnement d'un établissement scolaire (conseil de classes, conseil de ;;;) et les aptitudes des différents acteurs : chef d'établissement, CPE, professeur principal... Cette méconnaissance rend impossible la résolution administrative du dysfonctionnement et conduit à présenter seulement une analyse de « bon sens ».

On constate les erreurs d'analyse suivantes de certains candidats :

- difficulté à se positionner de façon « équitable » face à une situation (l'élève n'a pas « toujours raison »)

- ne pense pas à repositionner les autres élèves face au constat de comportement anormal ou dysfonctionnement,
- se positionne par rapport au temps présent mais pas de perspective ou de contrôle d'évolution dans le temps.



En rouge la note sur 20 de l'épreuve, moyenne 10,71/20

En bleu la note sur 5 points (seconde partie), moyenne 3,16/5

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.

La durée de la présentation du candidat est de 30 minutes, insertion pédagogique incluse. Le jury dispose ensuite de 30 minutes pour poser des questions.

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.

Enfin, le jury attend des candidats de solides connaissances scientifiques (les notions présentées doivent, au minimum, être correctes)

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 ». De plus, la présentation de la leçon, ainsi que l'insertion pédagogique, trouvent naturellement leurs places au début de la présentation du candidat.

3 – L'ENTRETIEN

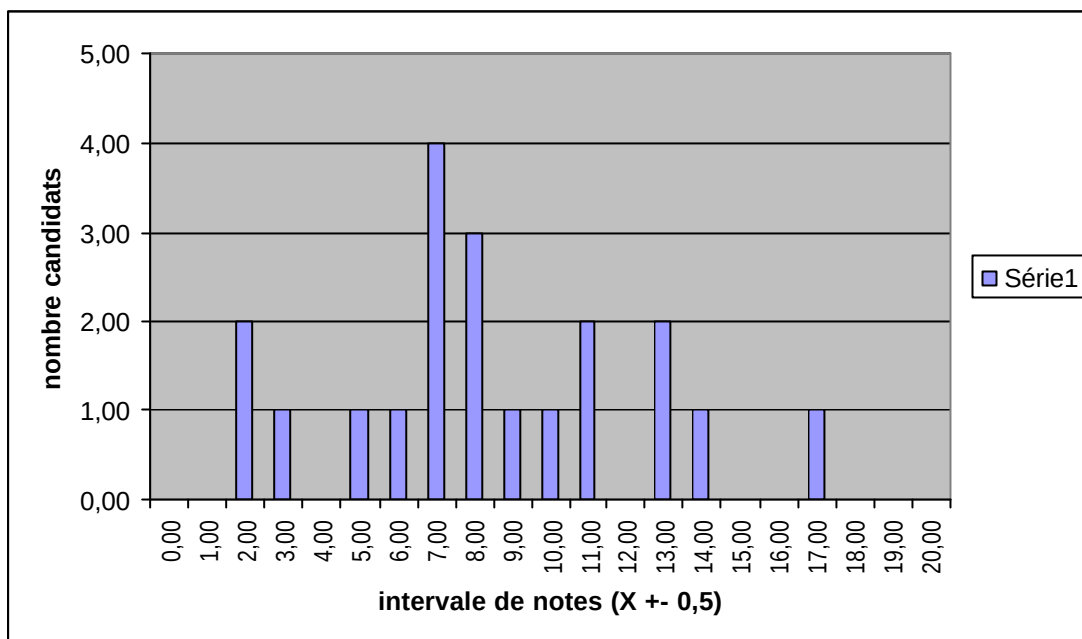
Le questionnement du jury permet d'approfondir des questions scientifiques et technologiques aussi bien que pédagogiques.

Il met parfois en évidence l'absence ou le défaut de maîtrise de certains points énoncés comme des évidences lors de l'exposé. Certains candidats ont à l'inverse développé leur propos de manière très satisfaisante, corrigeant le manque de confiance dans l'exposé initial (situation bien compréhensible en cette occasion).

L'entretien permet également au jury de revenir sur des erreurs faites par les candidats dans leur présentation. L'attitude des candidats face à leurs erreurs est variable : soit il y a une prise de conscience de l'erreur, de son acceptation et son auto-correction, soit une persistance dans l'erreur en argumentant improprement. L'attitude passive et consentante n'est pas non plus celle attendue d'un futur enseignant.

4- BILAN

Nombre de candidats présents : 30



Répartition des notes

Agrégation génie civil 2011

Agrégation de génie civil

Concours externe

Session 2011

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
Pénétrömètre 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 ciments
Matériel pour mesure de la classe vraie d'un ciment
Presses à Béton
Matériel pour étude des granulats et des sols (Tamisage, équivalent de sable, calcimètre, essai au bleu)
Matériel pour essais non destructifs sur béton (scléromètre, vitesse du son)
Matériel pour mesure des caractéristiques physiques et chimiques des ciments
Machine de traction sur acier pour béton (200 kN)
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
Essai à la plaque

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 radiateurs chauffage
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 maximum de manipulation devant le jury et exploitation au plus haut niveau des expérimentations réalisées.

- 15 mn maximum d'exploitation pédagogique

- 15 mn maximum d'entretien avec le jury.

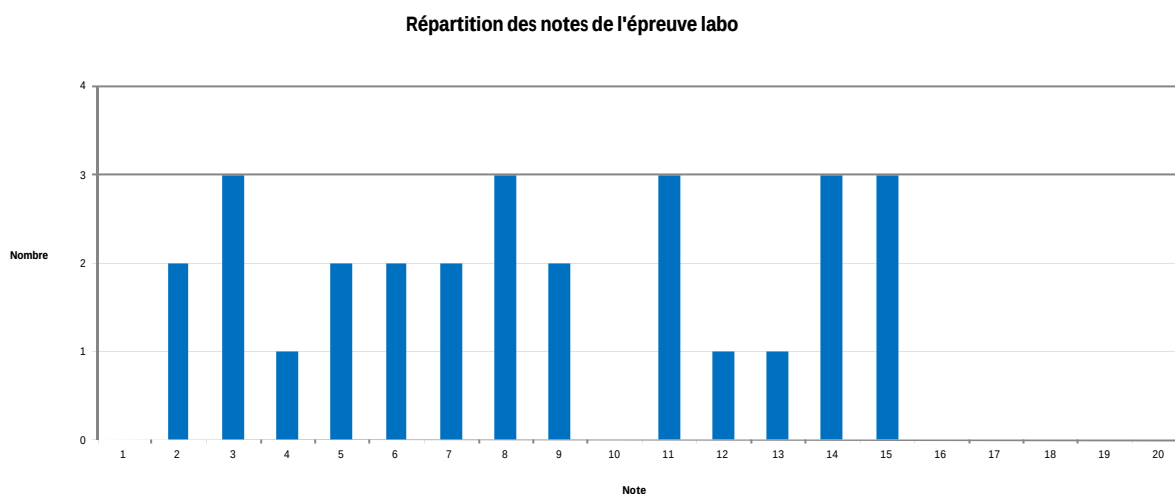
Durant l'épreuve, **le candidat doit être capable d'expliquer au plus au niveau les concepts scientifiques et techniques sur lesquels reposent les expérimentations.**

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).

A l'issue de la session 2011, le jury attire particulièrement l'attention des futurs candidats sur les points suivants :

- **Rappelons que cette épreuve n'est pas une leçon de laboratoire devant des élèves mais une manipulation avec exploitation devant un jury d'experts**
- Les candidats doivent consacrer une part importante à la manipulation devant le jury et à l'exploitation des résultats ainsi obtenus. Pour faciliter la gestion du temps, les connaissances de base nécessaires à l'exploitation de la manipulation doivent être rappelées rapidement : **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.** Une attention particulière doit être portée au respect des protocoles expérimentaux et à la précision des mesures.
- Le jury regrette qu'une majorité des candidats effectuent une exploitation trop limitée des potentialités scientifiques des supports didactiques proposés. Il serait souhaitable d'insister sur la comparaison des résultats expérimentaux aux modèles théoriques.
- Il est inutile de tout écrire au tableau, pour éviter une perte de temps. Le candidat ne doit utiliser le tableau que pour noter les éléments essentiels à la compréhension et l'exploitation des résultats (notamment des schémas, graphiques....)
- Les candidats disposent d'un temps de parole de 45 minutes maximum, mais gardent toute liberté pour organiser leur présentation dans l'ordre qu'ils souhaitent. Pour cette session, le jury regrette une mauvaise gestion du temps pour certains candidats qui n'utilisent pas pleinement les 45 minutes.
- L'exploitation pédagogique reste pour la majorité des candidats trop succincte (le temps moyen passé sur cette partie est inférieur à 5 min). Elle doit notamment :
 - o préciser l'insertion dans un référentiel
 - o pour un niveau de formation envisagé, détailler le degré de simplification du TP envisagé et préciser le contexte, les objectifs et l'intérêt en situation réelle.

3.3 - BILAN



Nombre de candidats présents : 28

Moyenne de l'épreuve : 8.52 / 20