



Secrétariat Général

Direction générale des
ressources humaines

Sous-direction du recrutement

MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

Concours du second degré – Rapport de jury

Session 2013

AGREGATION

Externe

Section Sciences industrielles de l'ingénieur
Option Ingénierie des constructions

**Rapport de jury présenté par : Monsieur Jean-Michel SCHMITT
Inspecteur général de l'éducation nationale**

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

MEMBRES DU JURY

Président

SCHMITT Jean-Michel – IGEN

Vice-président

PETIT Christophe – Professeur des Universités

Secrétaire du jury

LACHI Mohammed – Professeur des Universités

Membres du jury

ANFOSSO Fabienne – Directrice de recherches

BRAULT Laurent – IA-IPR

CASAUX GINESTET Géraldine – Maître de conférences

CASTEL Jean-Marc – Professeur agrégé

CAVALLY Nelly – Professeure agrégée

DZIUBANOWSKI Cédric – Professeur agrégé

FABRE Carole – Professeure agrégée

FAUQUEUX François – Professeur agrégé

FICHOU Philippe – Professeur de chaire supérieure

GABRYSIK Frédéric – Professeur de chaire supérieure

KESSENHEIMER Thierry – IA-IPR

KUZNIK Frédéric – Maître de conférences

LE GUERN Guillaume – Professeur agrégé

LIGNON Sylvain – Maître de conférences

LONJOU Richard – Professeur agrégé

MANDOUZE – Professeur agrégé

PLÉ Olivier – Maître de conférences

PRUNIER Françoise – Ingénieure

RÉSULTATS STATISTIQUES DE LA SESSION 2013

Inscrits	Nombre de postes	Présents aux trois épreuves d'admissibilité	Admissibles	Admis
158	15	68	35	15

Moyenne obtenue aux épreuves écrites par le premier candidat admissible	15,2
Moyenne obtenue aux épreuves écrites par le dernier candidat admissible	8,9
Moyenne obtenue aux épreuves écrites et orales par le premier candidat admis	16,1
Moyenne obtenue aux épreuves écrites et orales par le dernier candidat admis	10,4

Avant-propos

Cette session est la première de la nouvelle agrégation externe section sciences industrielles de l'ingénieur à trois options. Cette évolution a pu générer quelques doutes et inquiétudes, en particulier de la part des formateurs, ce qui est compréhensible. Mais il était indispensable de faire évoluer le recrutement des professeurs agrégés. Une formation, fût-elle de haut niveau, ne permet plus d'aborder les systèmes complexes si elle est centrée sur un seul champ technologique. Les systèmes, qui répondent aux besoins de plus en plus importants et sophistiqués de l'Homme dans une optique de développement durable, sont organisés autour du triptyque matière – énergie – information. En 2013, les agrégés ne peuvent plus ignorer deux des composantes de ce triptyque.

La première épreuve d'admissibilité pouvait interpellier pour cette première session. Afin que chaque candidat puisse tirer le meilleur de ses compétences, les présidents des trois options ont opté pour un sujet très long. Ce choix n'a pas vocation à être pérenne. Cela étant, les prestations des candidats montrent que les attentes ont bien été comprises, et que les lauréats 2013 ont des compétences transversales pour aborder la complexité des systèmes actuels et futurs.

Les deux autres épreuves d'admissibilité ont, certes, évolué, mais restent dans la continuité de celles de l'agrégation de génie civil. Elles ne semblent pas avoir surpris les candidats.

Les deux premières épreuves d'admission ont une structure identique, mais avec des objectifs différents. La première est transversale et commune aux trois options, la seconde est caractéristique de l'option. Ces deux épreuves s'appuient sur des activités expérimentales et débouchent sur la présentation d'une séquence pédagogique. Ce dernier point est important, car l'agrégation est un concours de recrutement de professeurs. L'aspect pédagogique ne doit donc pas être négligé, et doit être sérieusement intégré dans la préparation à ce concours.

La troisième épreuve d'admission est essentiellement consacrée à la soutenance d'un dossier élaboré par le candidat. Le dossier doit être un transfert de technologie innovante de l'entreprise vers l'Éducation nationale. Son authenticité et son actualité sont des éléments décisifs. Pour cela, il est indispensable que les candidats prennent contact avec des responsables (ingénieurs, chercheurs, ..) au sein d'une entreprise ; un dossier élaboré à partir de ressources téléchargées sur Internet ne répond pas à l'esprit de cette épreuve.

Le dossier doit être élaboré à partir d'une construction ou d'un ouvrage qui se caractérise par une compétitivité reconnue et par la pertinence de sa conception. La créativité et l'innovation portées par la construction ou l'ouvrage retenu sont des éléments importants du choix. Le support du dossier doit faire l'objet d'une analyse scientifique et technologique au niveau master.

Le candidat doit ensuite proposer une séquence pédagogique, à partir de ce transfert de technologie, structurée à partir des compétences à faire acquérir aux élèves. Le candidat doit donc présenter :

- les objectifs, le principe de déroulement et les moyens didactiques à mobiliser pour une séquence de formation, correspondant à un objectif pédagogique d'un programme et d'un niveau de classe précisé ;
- les objectifs, les pré requis ;
- le principe de déroulement et les moyens didactiques à mobiliser pour un objectif pédagogique d'un programme et d'un niveau de classe précisé ;
- les évaluations prévues.

Il peut aussi indiquer, selon son point de vue, les points clefs, les difficultés prévisibles et les scénarios alternatifs pouvant permettre de les contourner.

Les modalités de ces épreuves d'admissions et leurs objectifs sont rappelés aux candidats lorsqu'ils sont accueillis, avant leur première épreuve, par le directoire du jury ; ils ne peuvent donc pas les ignorer.

Cette session 2013 a permis de pourvoir tous les postes et de recruter quinze nouveaux professeurs agrégés d'un bon niveau.

Parmi les 35 candidats admissibles, un seul ne s'est pas présenté aux épreuves de la session d'admission.

L'agrégation est un concours prestigieux qui impose de la part des candidats un comportement et une présentation irréprochable. Le jury reste vigilant sur ce dernier aspect et invite les candidats à avoir une tenue adaptée aux circonstances particulières d'un concours de recrutement de cadres de catégorie A de la fonction publique.

Pour conclure cet avant-propos, j'espère sincèrement que ce rapport sera très utile aux futurs candidats de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur.

Jean-Michel SCHMITT
Président du jury

Éléments de correction de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur

Partie 2 : Recherche architecturale et environnementale

2.1. Analyse d'un mode de transport, le tramway

Question 1 : à partir du document ressource 4, dégager les éléments qui expliquent pourquoi ce type de transport est utilisé à nouveau dans notre espace urbain après une période de désintérêt.

Question 2 : à partir du document ressource 4, proposer un argumentaire qui pourrait permettre de conseiller une équipe de maîtrise d'ouvrage en charge d'étudier une nouvelle ligne de tramway pour une grande ville de province inscrite dans les appels à projet du Grenelle de l'environnement.

Éléments de réflexion à prendre en compte dans le commentaire proposé par le candidat.

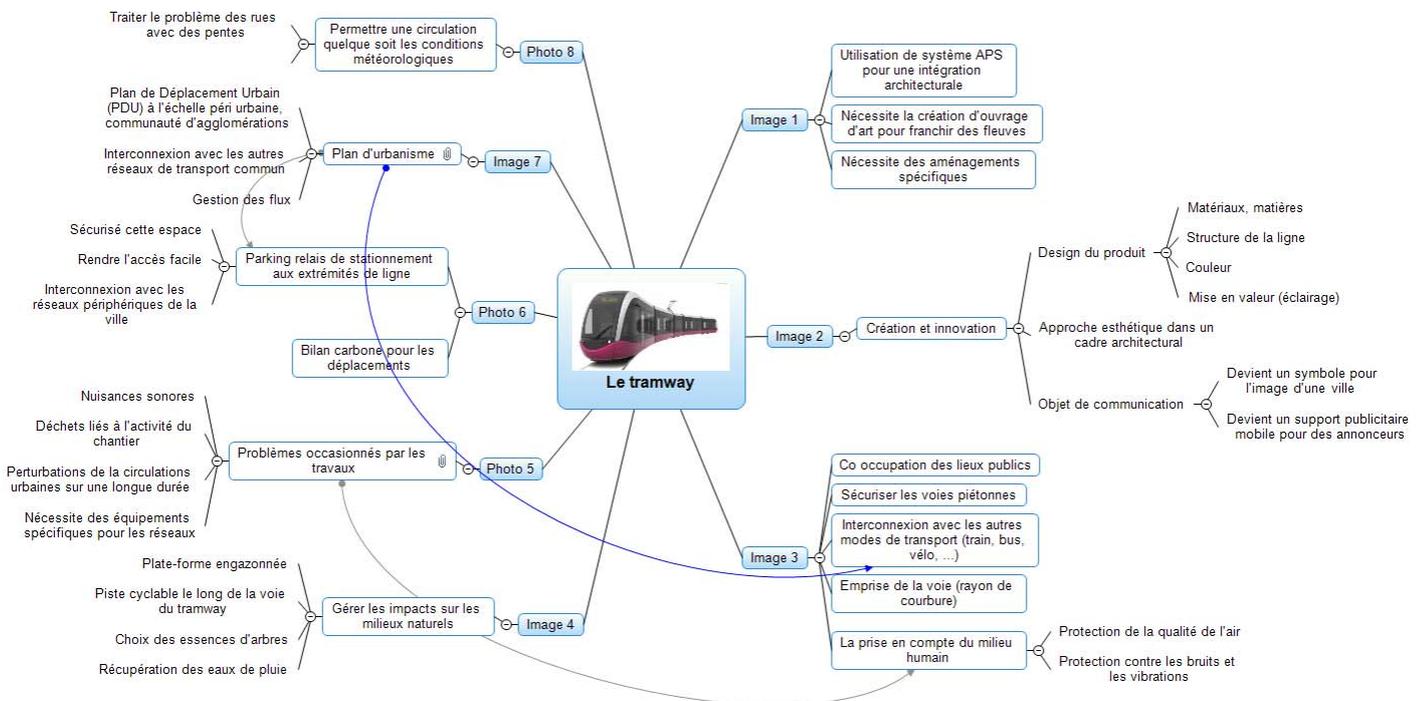


Image de la carte heuristique proposée

2.2. Vibrations dues au passage d'un tramway

ATTENTION 2 questions 3 dans le sujet

Question 3 : la complexité des sols urbains nécessite un modèle de sol de type multicouche hétérogène. Quels phénomènes physiques faut-il prendre en compte lors de la propagation des ondes dans le sol ?

Les problèmes de propagation d'ondes dans un milieu "hétérogène" (souvent supposé multicouche) sont caractérisés par de nombreux phénomènes (dispersion, diffraction, amortissement, réflexion des ondes aux interfaces entre couches...).

Question 3 : préciser les théorèmes utilisés pour obtenir les équations (1) et (4). Quel phénomène traduit le coefficient $E_r \cdot I_r$ de l'équation (1) ?

L'équation (1) s'obtient par application du TRD au rail 1 projeté sur l'axe vertical.

L'équation (4) s'obtient par application du TMD au centre de gravité de la dalle projeté sur l'axe \vec{x}
 $E_r \cdot I_r$ est le coefficient de raideur en flexion du rail.

Question 4 : combien d'inconnues possède le système à 4 équations (1), (2), (3) et (4) ? Combien d'équations de couplage est-il nécessaire d'obtenir pour résoudre le problème ? Comment obtenir ces équations ?

Ce système possède 6 inconnues : z_{r1} , z_{r2} , θ , z_0 , F_0 , C_0

En effet, z_1 et z_2 s'obtiennent géométriquement en fonction de z_0 et θ , et P_1 comme P_2 sont les données d'entrée du problème.

6 inconnues pour 4 équations. Il faut deux équations supplémentaires issues de l'étude du couplage dalle / sol (égalité du déplacement verticale de la dalle et du sol en un point et couplage en rotation).

Question 5 : les conditions de couplage interviennent dans les termes F_{33} et F_{44} . Quels sont les éléments nuls de la matrice de flexibilité $[F]$?

Les termes F_{12} et F_{34} sont nuls. Il suffit d'analyser les équations (1) et (2).

Question 6 : justifier l'intérêt de mener une campagne de mesures en positionnant des capteurs sur le tramway, le rail et le sol.

La pose de capteurs sur le tramway et sur le rail permet de préciser le modèle à retenir pour l'excitation dynamique ($P_1(t)$ et $P_2(t)$). En effet, la source des vibrations peut provenir des éléments mécaniques internes au tramway comme des irrégularités de surface du rail (établies théoriquement à l'aide d'une fonction probabilité). La pose de capteur sur le sol permet de valider le modèle retenu pour les déplacements de la dalle et donc du sol.

Question 7 : conclure quant aux solutions qui pourraient être retenues pour limiter la transmission des ondes à l'environnement.

Le choix des matériaux constituant les couches de fondations de la plateforme en béton armé et de leurs granulométries respectives est essentiel. L'épaisseur des différentes couches joue bien sûr un rôle important mais à condition que les conditions de mise en œuvre soient satisfaisantes (indice de compactage respecté).

Une semelle micro cellulaire anti-vibratoire, sans serrage du blochet dans un chausson, peut être disposée entre le rail et la dalle. Cette technique est utilisée pour les voies sans ballast.

Il existe aussi, une technique de réalisation de section amortisseuse équipée de dalle flottante, avec une couche supplémentaire en béton, mais cela reste très onéreux.

Partie 3 : Étude des besoins énergétiques d'une rame de tramway

Question 8 : donner la relation liant la fréquence F_S de l'alimentation statorique des moteurs de traction et la vitesse de déplacement V de la rame. Calculer, pour chacun des trois degrés d'usure des roues (neuves, demi-usées, usées) la valeur de F_S permettant de fonctionner en palier à la vitesse de régime V_N de 38 km/h. Pour cette question les divers glissements seront négligés.

$$\text{Fréquence mécanique moteur} = \frac{1}{2} \cdot F_S$$

$$\text{Fréquence mécanique roue} = \frac{8}{43} \cdot \frac{F_S}{2}$$

$$\text{Vitesse angulaire roue} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{8}{43} \cdot \frac{F_S}{2}$$

$$\text{Vitesse linéaire} = \pi \cdot \frac{8}{43} \cdot F_S \cdot R \Leftrightarrow F_S = \frac{V \cdot 43}{8 \cdot \pi \cdot R}$$

Les trois valeurs de F_S sont : **59,21 ; 62,27 ; 65,67 Hz**

Question 9 : le variateur de vitesse utilisé permet de faire varier F_S jusqu'à 115 Hz au maximum. En négligeant à nouveau le glissement des moteurs de traction, calculer le diamètre des roues correspondant à l'usure maximale au-delà de laquelle il ne serait plus possible d'atteindre la vitesse maximale prévue par le constructeur.

On rappelle que la fréquence de rotation f (en tours/seconde) d'un moteur asynchrone à $2p$ pôles alimenté par un système de tensions de fréquence F_S s'obtient par la relation $f = \frac{F_S}{p}$, au glissement près.

$$D_{\min} = \frac{V_{\max} \cdot p}{\pi \cdot f \cdot n}$$

$$D_{\min} = 578,86 \text{ mm}$$

3.3. Étude du travail des actions mécaniques non-dissipatives

Question 10 : calculer la dépense énergétique $E_{\text{acc_AW3}}$ nécessaire pour amener l'ensemble du véhicule à sa vitesse nominale de 38 km/h, en régime AW3 avec des roues à demi-usées, à partir de l'arrêt. On néglige à ce stade les efforts dus aux dissipations de frottement et de roulement. Exprimer le résultat en kWh.

$$\text{Roues : moment d'inertie d'une roue neuve : } J_R = \frac{1}{2} \cdot M \cdot R^2$$

$$J_r = \frac{1}{2} \cdot \left(\pi \cdot \frac{D_1^2}{4} \cdot e \rho_r \cdot \rho_r \right) \cdot \frac{D_1^2}{4} \Leftrightarrow D_1 = 0,580 \text{ m}$$

Énergie cinétique des 12 roues à vitesse v :

$$E_R = 12 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot J_R \cdot \left(\frac{v}{R} \right)^2 \right]$$

$$E_R = 6,52 \cdot 10^4 \text{ J}$$

$$\text{Moteurs : } \omega_{\text{mot}} = \omega_{\text{roue}} \cdot \frac{43}{8}$$

Énergie cinétique des 4 moteurs :

$$E_{\text{mot}} = 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot J_m \cdot \omega_{\text{mot}}^2$$

$$E_{\text{mot}} = 39,81 \cdot 10^4 \text{ J}$$

Énergie cinétique de translation :

$$E_{\text{ramet}} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v^2$$

$$E_{\text{ramet}} = 305,88 \cdot 10^4 \text{ J}$$

$$\text{Total : } E_{\text{acc3}} = 3,522 \cdot 10^6 \text{ J} = 0,978 \text{ kWh}$$

3.4. Étude du travail des forces de dissipation

Question 11 : établir en fonction du temps l'expression de la puissance de résistance à l'avancement $P_r(t)$ lors de la phase de démarrage de 14 secondes, en régime AW3. On mettra $P_r(t)$ sous la forme : $P_r(t) = \alpha t^3 + \beta t^2 + \gamma t + \delta$ en précisant les valeurs et les unités des coefficients α , β , γ et δ .

$$v(t) = k \cdot t \quad k = \frac{38}{14} = 2,714 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$f_R(t) = A \cdot (k \cdot t)^2 + B \cdot (k \cdot t) + C \quad \text{en } \text{N} \cdot \text{t}^{-1}$$

Il vient $P_R(t) = f_R(t) \cdot v(t) = M_3 \cdot f_R(t) \cdot \frac{k \cdot t}{3,6}$ avec $M_3 = 54\,905 \text{ kg}$

$$P_R(t) = \frac{M_3 \cdot [A \cdot k^3 \cdot t^3 + B \cdot k^2 \cdot t^2 + C \cdot k \cdot t]}{3,6}$$

$$P_R(t) = 3,05 \cdot t^3 + 14,61 \cdot t^2 + 1449 \cdot t$$

$$P_R(t) = 31520 \text{ W à } 38 \text{ km/h}$$

$$\alpha \text{ en } \text{W} \cdot \text{s}^{-3}, \beta \text{ en } \text{W} \cdot \text{s}^{-2}, \gamma \text{ en } \text{W} \cdot \text{s}, \delta = 0$$

Question 12 : calculer en kWh l'énergie E_{rd} dissipée par la résistance à l'avancement au cours de cette phase de démarrage de 14 secondes.

$$\int_0^{14} (3,050 t^3 + 14,61 t^2 + 1449 t) dt = \frac{3,050}{4} 14^4 + \frac{14,61}{3} 14^3 + \frac{1449}{2} 14^2$$

$$E_{rd} = 184\,660 \text{ Joules, soit } E_{rd} = 0,0513 \text{ kWh}$$

Question 13 : calculer en kWh l'énergie E_{rp} dissipée par la résistance à l'avancement au cours de la marche de 18 secondes à vitesse constante, en palier.

La force motrice en palier est $M_3 \cdot (A \cdot v_N^2 + B \cdot v_N + C)$ avec v_N exprimé en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$

La puissance est : $\frac{M_3 \cdot (A \cdot v_N^2 + B \cdot v_N + C) \cdot v_N}{3,6}$ avec v_N en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$, donc cette puissance est égale à

31 250 W.

$$E_{rp} = \frac{M_3 \cdot (A \cdot v_N^2 + B \cdot v_N + C) \cdot v_N}{3,6} \cdot 18 \text{ avec } v_N \text{ en } \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$F_t = 2,986 \text{ kN} \Leftrightarrow E_{rp} = \frac{2,986 \cdot 38 \cdot 18}{3,6} = 567 \text{ kJ} = 0,158 \text{ kWh}$$

Question 14 : calculer en kWh l'énergie E_b nécessaire au fonctionnement des équipements de bord lors du parcours inter-station de 38 secondes.

$$E_b = 50000 \cdot 38 = 1,9 \text{ MJ} = 0,528 \text{ kWh}$$

Question 15 : à l'aide des résultats des questions précédentes, donner en kWh une estimation de l'énergie totale E_{tot} à apporter au véhicule pour l'accomplissement du trajet. L'énergie du freinage est entièrement dissipée au niveau des freins (freinage rhéostatique et mécanique).

$$E_{tot} = E_{acc3} + E_{rd} + E_{rp} + E_b = 1,72 \text{ kWh}$$

3.5. Étude de l'apport en énergie par ligne aérienne de contact et pantographe

Question 16 : calculer la puissance maximale P_{\max} consommée par la rame et l'intensité correspondante i_{\max} du courant absorbé au pantographe pour le régime AW3.

La puissance maximale est absorbée en fin de phase d'accélération (force et vitesse maximales) :

– puissance de résistance à l'avancement $P_r = 31\,520\text{kW}$ (voir question 13) ;

– puissance d'accélération $P_{\text{acc}} = F \cdot v = F \cdot k \cdot t \Leftrightarrow F = \frac{2 \cdot E_c}{k \cdot t^2} = 47,4\text{kN}$

$P_{\text{acc}} = 503\text{kW}$

Puissance des auxiliaires : $P_{\text{aux}} = 50\text{kW}$

$P_{\max} = P_r + P_{\text{acc}} + P_{\text{aux}} = 584\text{kW}$

$I_{\max} = \frac{P_{\max}}{E} = 779\text{ A}$

Question 17 : au cours de cet essai, on a relevé : $P_{\max} = 913\text{ kW}$ et $i_{\max} = 1217\text{ A}$. Le comptage d'énergie indique que la rame a consommé 2,706 kWh au bout de $t = 32$ secondes. Commenter les écarts observés entre les valeurs prévues et les valeurs relevées.

Toutes les grandeurs mesurées sont supérieures aux grandeurs prévues.

a. La puissance absorbée au pantographe est supérieure à la puissance motrice, les documents en annexe et la connaissance commune des procédés mis en jeu permettent de prévoir un rendement de 60 à 70% au mieux (dû aux différentes conversions entre le pantographe et le rail).

b. On voit sur le relevé que le démarrage se fait en deux temps. La deuxième phase doit mettre en jeu une force plus intense pour "rattraper" le retard pris dans la première phase.

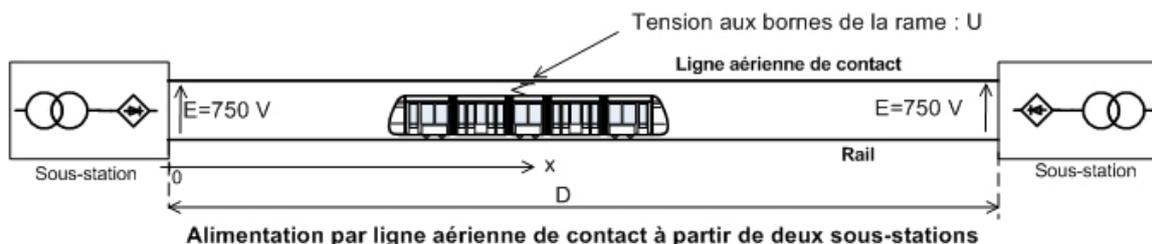
c. Le courant est cohérent avec la puissance sous une tension de 750V.

d. On consomme en tout 1 kWh de plus (soit 58% de plus) que prévu. La cause en est le rendement, ainsi que l'excédent de consommation en régime lisible sur le graphe (100 kW à vitesse constante en palier - en plus des 50 kW dus aux équipements de bord - au lieu de 32 kW).

Question 18 : sur certains modèles de rames, la puissance absorbée au pantographe est volontairement limitée. indiquer quelles seraient les conséquences d'une limitation à 800 kW de la puissance absorbée sur les relevés précédents.

La courbe de puissance serait tronquée à 800 kW. La vitesse à partir de la saturation de puissance croîtrait moins vite. La vitesse de croisière serait atteinte plus tard. Le retour à la puissance de croisière se ferait plus tard.

Le schéma simplifié de l'alimentation électrique d'un tronçon est donné ci-dessous.



Question 19 : On souhaite pouvoir apporter la puissance P demandée par la rame. Exprimer, en fonction de x , la tension effective U aux bornes de la rame et calculer la valeur maximale de la distance D entre deux sous-stations permettant un fonctionnement correct dans le cas où $P = 1\text{ MW}$.

Résistance linéique r_{li} de la LAC : $r_{li} = \frac{r}{S}$ en $\Omega \cdot m^{-1}$
 $S = 150 \text{ mm}^2 \Leftrightarrow r = 1,678 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \Leftrightarrow r_{li} = 112 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m^{-1}$

Résistance linéique r_{lr} du rail en acier

$S = 9400 \text{ mm}^2 \Leftrightarrow r = 17,1 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \Leftrightarrow r_{lr} = 18 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m^{-1}$

$r_{lt} = r_{li} + \frac{r_{lr}}{2} = 112 + 9 = 121 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m^{-1} = 0,121 \text{ m}\Omega \cdot m^{-1}$

D'un côté, $r_{lt} \cdot x$, de l'autre $r_{lt} (D - x)$, ce qui fait $r_{lt} \cdot x$ en parallèle avec $r_{lt} (D - x)$, soit $\frac{r_{lt} \cdot x(D - x)}{D}$

L'intensité absorbée par la rame est $I = \frac{P}{U}$, avec $P = 1 \text{ MW}$

D'où $U = E - \frac{r_{lt} \cdot x \cdot (D - x) \cdot U}{D \cdot P}$, ou encore : $U^2 - E \cdot U + \frac{r_{lt} \cdot (D - x)}{D \cdot P} = 0$

$\Delta = \frac{E^2 - 4r_{lt}(D - x)}{D \cdot P}$, Δ est positif quand $x(D - x) < \frac{D \cdot E^2}{4 \cdot r_{lt} \cdot P}$. Le premier membre est maximal pour

$x = \frac{D}{2}$ et vaut alors $\left(\frac{D}{2}\right)^2$

Des solutions de l'équation existent si $\left(\frac{D}{2}\right)^2 < \frac{D \cdot E^2}{4 \cdot r_{lt} \cdot P}$

On obtient alors : $\frac{D^2}{4} < \frac{D \cdot E^2}{4 \cdot r_{lt} \cdot P}$, c'est-à-dire $D < \frac{E^2}{r_{lt} \cdot P} \Leftrightarrow D_{\max} = \frac{E^2}{r_{lt} \cdot P}$

A.N. : pour $E = 750$ et $P = 1 \text{ MW}$, $D_{\max} = 4,65 \cdot 10^3 \text{ m}$

3.6. Évaluation des possibilités d'autonomie

Question 20 : la rame est équipée d'un dispositif de stockage d'énergie embarqué (volant d'inertie), préalablement chargé à sa valeur maximale : 4 kWh. En mode autonome, toute l'énergie nécessaire à la motorisation est prélevée sur ce stockage, qui est rechargé par récupération d'énergie lors des phases de freinage. À l'aide des documents ressource 1, 2 et 3 et des résultats précédents, calculer la valeur de la charge résiduelle dans le dispositif de stockage à l'issue du trajet inter-station type (profil simplifié précédent).

Le rendement de la transmission est de 70 % (volant vers traction)

Pour réaliser le trajet, il faut fournir (Q8) : $E_{\text{volant}_1} = \frac{(E_{\text{acc3}} + E_{\text{rd}} + E_{\text{rp}})}{0,7} + E_b - 0,7 \cdot E_{\text{dec}}$ avec

$E_{\text{dec}} = E_{\text{acc3}}$, en supposant que le volant puisse alimenter les équipements de bord avec un rendement 100 %.

$E_{\text{volant}_1} = \frac{(0,9783 + 0,05513 + 0,158)}{0,7} + 0,528 - 0,7 \times 0,9783 = 1,54 \text{ kWh}$

Question 21 : conclure sur l'intérêt d'un tel dispositif de stockage, en mettant en évidence les perspectives innovantes autant que les limitations.

On observe que le volant de 4 kWh ne permet pas de fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement de la rame en mode AUTO au-delà de deux trajets courts. Un fonctionnement en totale autonomie sur

de courtes distances est cependant envisageable après recharge du volant en station, ce qui permet de franchir des zones non alimentées (pour raisons techniques ou environnementales). Le volant peut aussi être utilisé pour des franchissements moins longs qu'un trajet inter-station.

La précharge du volant en station impose une durée de charge brève, incompatible avec les accumulateurs chimiques classiques.

En mode ECO, le volant fournirait une partie de l'énergie nécessaire, ce qui diminuerait sa décharge tout en limitant les appels de courant sur la LAC.

Le freinage régénératif n'est que partiellement économe, mais il permet tout de même un gain de 2,225 kWh sans récupération à 1,54 kWh avec récupération, soit 30% d'économie.

Partie 4 : Dimensionnement de la centrale inertielle

4.1. Choix du matériau du volant parmi deux classes de matériaux

4.1.1. Détermination de la contrainte dans le volant

Question 22 : exprimer dF_c en fonction de ω , ρ , R , e , H et $d\theta$.

$$dF_c = \omega^2 \cdot R \cdot dm \text{ où } dm = \rho \cdot R \cdot e \cdot H \cdot d\theta \text{ donc } dF_c = \rho \cdot \omega^2 \cdot R^2 \cdot e \cdot H \cdot d\theta$$

Question 23 : en écrivant l'équilibre statique de l'élément, exprimer l'expression de l'effort dF_t (voir document ressource 5) en fonction de ω , ρ , R , e , H .

$$dF_t = 2 \cdot dF_c \cdot \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \text{ et au premier ordre } \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) = \frac{d\theta}{2} \text{ donc } dF_c = dF_t \cdot d\theta$$

$$\text{et } dF_c = dF_t \cdot d\theta = \rho \cdot \omega^2 \cdot R^2 \cdot e \cdot H \cdot d\theta \text{ soit } dF_t = \rho \cdot \omega^2 \cdot R^2 \cdot e \cdot H$$

Question 24 : en déduire l'expression de la contrainte σ dans le tube en fonction de ω , ρ et R .

$$\sigma = \frac{dF_t}{S} = \frac{dF_t}{e \cdot H} = \frac{\rho \cdot \omega^2 \cdot R^2 \cdot e \cdot H}{e \cdot H} = \rho \cdot \omega^2 \cdot R^2$$

4.1.2. Détermination de la vitesse maximale du volant

Question 25 : donner l'expression de V .

$$V = R_2 \cdot \omega$$

Question 26 : calculer l'expression de la vitesse V en fonction de ρ , σ et K .

$$V = R_2 \cdot \omega \text{ et } \sigma = \frac{\rho \cdot \omega^2 \cdot R_2^2}{K^2} \text{ d'où } \sigma = \frac{\rho \cdot V^2}{K^2} \text{ et donc } V = K \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$$

Question 27 : déduire l'expression de V_{max} et ω_{max} (limite supérieure de la vitesse V et de ω).

$$V_{max} = \frac{K}{2} \cdot \sqrt{\frac{R_e}{\rho}} \text{ et } \omega_{max} = \frac{K}{2 \cdot R_2} \cdot \sqrt{\frac{R_e}{\rho}}$$

4.1.3. Détermination des densités d'énergie massique et volumique du volant

Question 28 : déterminer l'expression de l'énergie cinétique maximale E_c qu'on peut stocker dans un volant de moment d'inertie J . Exprimer E_c en fonction de m , ρ , K , α et R_e .

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot J(\omega_{\max})^2 = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \frac{K^2}{4 \cdot R_2^2} \cdot \frac{R_e}{\rho} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \cdot m(R_2^2 + R_1^2) \right) \frac{K^2}{4 \cdot R_2^2} \cdot \frac{R_e}{\rho}$$

$$R_1 = \alpha \cdot R_2$$

$$E_c = \frac{1}{16} (m(1 + \alpha^2)) \frac{K^2 \cdot R_e}{\rho}$$

Question 29 : la densité d'énergie volumique est notée dv . En partant de l'expression de l'énergie cinétique, montrer que $dv = k \cdot R_e$. Exprimer k en respectant les unités suivantes : dv en $Wh \cdot m^{-3}$, R_e en Mpa.

$$m = \rho \cdot V$$

$$dv = \frac{E_c}{V} = \frac{\frac{1}{16} (m(1 + \alpha^2)) \frac{K^2 \cdot R_e}{\rho}}{\frac{m}{\rho}} = \frac{1}{16} (1 + \alpha^2) K^2 \cdot R_e$$

1 Wh est égal à 3600 J, un MPa est égal à 10^6 Pa

$$dv = \frac{1}{4} (1 + \alpha^2) K^2 \cdot \frac{1000}{4 \cdot 3600} \cdot R_e$$

Question 30 : la densité d'énergie massique est notée dm . En partant de l'expression précédente, montrer que $dm = k \cdot \frac{R_e}{\rho}$ en respectant les unités suivantes : dm en $Wh \cdot Kg^{-1}$, R_e en MPa, ρ en $kg \cdot dm^{-3}$.

$$dm = \frac{dv}{\rho} = \frac{1}{16} (1 + \alpha^2) K^2 \cdot \frac{1000}{3600} \cdot \frac{R_e}{\rho}$$

Question 31 : quel paramètre doit-on optimiser pour répondre au mieux à cette exigence ? Justifier la réponse.

Si on cherche à optimiser la masse et le prix, il faut optimiser le rapport $\frac{\text{densité d'énergie massique}}{\text{Prix}}$.

Question 32 : quel est selon ce critère, le matériau métallique le plus performant parmi ceux proposés sur le graphe du document ressource 8. La sélection sera faite à partir du graphe en justifiant la démarche utilisée.

Il faut calculer les densités d'énergie massique de chaque matériau et diviser par le prix.

L'acier 55S7 est le plus performant des aciers selon ce critère. C'est aussi le plus performant de tous les matériaux proposés.

Son rapport $\frac{\text{densité d'énergie massique}}{\text{Prix}} = 1,7$

Question 33 : quel est, toujours selon ce critère, le matériau composite le plus performant parmi ceux proposés sur le graphe du document ressource 8 ? La sélection sera faite à partir du graphe en justifiant la démarche utilisée.

Le composite le plus performant est le composite fibre carbone/Epoxy. Il est loin derrière l'acier pour ce critère.

$$\text{Son rapport } \frac{\text{densité d'énergie massique}}{\text{Prix}} = 1,1$$

Question 34 : reprendre les deux questions précédentes en prenant comme objectif d'obtenir le volant le plus léger possible. Donner le critère utilisé et déterminer dans chaque classe (métaux et composites), le matériau le plus performant.

Pour ce critère, il faut optimiser la densité d'énergie massique. L'acier qui arrive en tête est le X210Cr12 de densité d'énergie massique 7,7 Wh/Kg, quant au composite le plus performant, il s'agit du composite fibre carbone/PEEK de densité d'énergie massique 40,6 Wh/Kg

Question 35 : l'objectif visant à minimiser la masse du volant est primordiale. Montrer que le composite Fibre carbone/Epoxy et l'acier 55S7 constituent dans chacune des classes un compromis intéressant. Faire un choix sur le matériau des deux classes le mieux adapté en regard des deux premiers critères du cahier des charges et justifier.

L'acier 55S7 est très proche du X210Cr12 en terme d'énergie massique (7,6 pour 55S7 et 7,7 pour X210Cr12) en revanche la comparaison du rapport densité d'énergie massique / prix est sans appel et plaide en faveur du 55S7. (11,7 pour 55S7 et 1,1 pour X210Cr12)

De même en terme d'énergie massique, la fibre carbone/Epoxy (36,3 Wh/Kg) n'est pas très éloignée de la fibre carbone/PEEK (40,6 Wh/Kg) mais en revanche, la fibre carbone/Epoxy possède un bien meilleur rapport densité d'énergie massique / prix (1,1 contre 0,4). Son choix semble tout indiqué.

Choix classe métaux : 55S7

Choix classe composite : fibre carbone/Epoxy

4.1.4. Détermination des caractéristiques géométriques et massiques du volant en fonction du matériau

Question 36 : calculer pour les deux matériaux fibre carbone/Epoxy et acier 55S7 :

- la vitesse V_{\max} (vitesse périphérique maxi) ;
- la densité d'énergie volumique dv (en $\text{Wh} \cdot \text{dm}^{-3}$) ;
- la densité d'énergie massique dm (en $\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$).

$$V_{\max} = \frac{K}{2} \sqrt{\frac{R_e}{\rho}} = \frac{1,06}{2} \sqrt{\frac{2170 \cdot 10^6}{1580}} = 619,6 \text{ ms}^{-1} \text{ pour fibre carbone/Epoxy}$$

$$V_{\max} = \frac{K}{2} \sqrt{\frac{R_e}{\rho}} = \frac{1,06}{2} \sqrt{\frac{2260 \cdot 10^6}{7900}} = 283,8 \text{ ms}^{-1} \text{ pour acier 55S7}$$

La densité d'énergie volumique dv (en Wh/dm^3)

$$dv = \frac{1}{4} (1 + \alpha^2) K^2 \cdot \frac{1000}{4 \times 3600} \cdot R_e$$

La densité d'énergie massique dm (en Wh/kg)

$$dm = \frac{dv}{\rho} = \frac{1}{16} (1 + \alpha^2) K^2 \cdot \frac{1000}{3600} \cdot \frac{R_e}{\rho}$$

		Fibre carbone / Epoxy	55S7
dv = Ec/V maxi	Wh/m ³	57,3	60,1
dm = Ec/M maxi	Wh/kg	36,3	7,6

Question 37 : déterminer l'expression de la fréquence de rotation en $\text{tr} \cdot \text{mn}^{-1}$ du volant pour chaque matériau. Faire les applications numériques.

$$\omega_{\max} = \frac{V_{\max}}{R_2} = \frac{K}{2 \cdot R_2} \sqrt{\frac{R_e}{\rho}} \quad \text{et} \quad N_{\max} = \frac{30 \cdot V_{\max}}{\pi \cdot R_2}$$

		Fibre Carbone / Epoxy	55S7
N maxi	tr/mn	16904,8	7743,0

Question 38 : déterminer les expressions du volume Vol (en dm^3), de la masse m (en kg) et de la hauteur H (en mm) pour chaque matériau. Faire les applications numériques, et calculer le prix du volant pour chaque matériau.

On se fixe l'objectif d'atteindre une capacité de stockage de 4 kWh avec le volant d'inertie.

$$V = \frac{4000}{dv} \quad \text{et} \quad M = \frac{4000}{dm}$$

Le prix du volant d'inertie = (masse) · (prix au Kg)

		Fibre Carbone / Epoxy	55S7
Volume	dm^3	69,8	66,6
Masse	Kg	110,3	525,9
Prix du volant	euro	3563,5	341,8

$$H = \frac{V}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}$$

		Fibre Carbone / Epoxy	55S7
H	mm	283,5	270,3

Question 39 : choisir parmi les deux matériaux fibre carbone/Epoxy et acier 55S7, celui qui répond au mieux aux deux premiers critères du cahier des charges.

	unité	carbone/Epoxy	acier 55S7
Ec/V maxi	Wh/m ³	57,3	60,1
(EC/M) / Prix	Wh/Kg	36,3	7,6
Masse	Kg	110,3	525,9
Prix	Euro	3563,5	341,8

Selon la flexibilité associée aux deux premiers critères, la fibre carbone/Epoxy est la mieux adaptée.

4.2. Eco bilan et choix du matériau

Question 40 : calculer l’empreinte énergétique de chaque volant qu’on notera respectivement E_{acier} et $E_{composite}$. On détaillera les éléments pris en compte.

Phase fabrication :

E_{fab} = énergie obtention + énergie fabrication volant

$$E_{acier\ fab} = 38 \cdot 525,9 + 27,8 \cdot 10 = 20262 \text{ MJ}$$

$$E_{composite\ fab} = 286 \cdot 110,3 + 3,68 \cdot 110,3 = 31952 \text{ MJ}$$

Phase utilisation :

Le volant représente une masse embarquée qui est consommatrice d’énergie à chaque démarrage.

$$\text{La phase de démarrage dure } T_a = \frac{V}{an} = \frac{38}{(3,6 \cdot 1,3)} = 8,11 \text{ s}$$

$$\text{La distance de démarrage } d = \frac{an \cdot ta^2}{2} = 42,85 \text{ m}$$

Le temps de parcours à vitesse constante :

$$T_c = \frac{(1000 - 2 \cdot 42,85)3,6}{38} = 86,6 \text{ s}$$

$$\text{Soit un temps entre 2 démarrages } T = T_c + 2 \cdot T_a + 15 = 117,8 \text{ s}$$

$$\text{Soit sur 20h : } \frac{20 \cdot 3600}{102,8} = 611 \text{ démarrages.}$$

$$\text{Et sur 10 ans : } n = 611 \cdot 365 \cdot 10 = 2230150 \text{ démarrages}$$

L’énergie consommée pour les démarrages s’écrit :

$E_{dem} = m \cdot an \cdot d \cdot n$ soit pour chaque matériau :

$$E_{acier\ dem} = 525,9 \cdot 1,3 \cdot 42,85 \cdot 223\ 0150 = 65333 \text{ MJ}$$

$$E_{composite\ dem} = 110,3 \cdot 1,3 \cdot 42,85 \cdot 223\ 0150 = 13703 \text{ MJ}$$

Au bilan, l’empreinte énergétique de chaque volant donne :

- $E_{acier} = 20262 + 65333 = 85595 \text{ MJ}$;
- $E_{composite} = 31952 + 13703 = 45655 \text{ MJ}$.

Question 41 : calculer l’empreinte CO_2 de chaque volant, notée respectivement C_{acier} et $C_{composite}$.

Dans la phase de fabrication (extraction des ressources, fabrication du volant) :

- $C_{acier} = 2,22 \cdot 525,9 + 2,09 \cdot 10 = 1188 \text{ kg } CO_2$;
- $C_{composite} = 110,3 \cdot 18 + 0,294 \cdot 110,3 = 2\ 018 \text{ kg } CO_2$.

Dans la phase d’utilisation :

- $C_{acier} = 0,035 \cdot 223\ 0150 \cdot 525,9 = 41\ 049 \text{ kg } CO_2$;
- $C_{composite} = 0,035 \cdot 223\ 0150 \cdot 110,3 = 8\ 609 \text{ kg } CO_2$.

Soit au final:

- $C_{acier} = 1\ 188 + 41\ 049 = 42\ 237 \text{ kg } CO_2$;
- $C_{composite} = 2\ 018 + 8\ 609 = 10\ 627 \text{ kg } CO_2$.

4.3. Bilan face aux critères du cahier des charges et choix du matériau du volant

Question 42 : en fonction des études réalisées, conclure sur un choix de volant et justifier la réponse.

L'éco bilan est très favorable au volant en composite. Le paramètre majeur qui donne ce résultat est la différence très importante de masse entre les deux volants. Cette différence entraîne un bilan meilleur pour le volant composite dont la masse est presque 5 fois plus petite.

4.4 Commande de la vitesse du volant d'inertie

Question 43 : exprimer la puissance électrique en fonction des seuls courants i_d et i_q .

$$p = \left(R \cdot i_d - L \cdot \omega \cdot i_q + L \cdot \frac{di_d}{dt} \right) i_d + \left(R \cdot i_q + L \cdot \omega \cdot i_d + L \cdot \frac{di_q}{dt} + \Phi \cdot \omega \right) i_q$$

$$p = R \cdot i_d^2 + L \cdot \frac{di_d}{dt} i_d + R \cdot i_q^2 + L \cdot \frac{di_q}{dt} i_q + \Phi \cdot \omega \cdot i_q$$

Question 44 : montrer que la puissance mécanique p_m et le couple électromagnétique Γ_{em} produits par la machine sont proportionnels à i_q et donner leur expression.

Les pertes Joules Ri^2 ne contribuent pas à la puissance mécanique. Les termes de transformations non plus, comme indiqué dans le texte. Il reste :

$p_m = \Phi \cdot \omega \cdot i_q$ pour la puissance et $\Gamma_{em} = \frac{p_m}{\omega} = \Phi \cdot i_q$ pour le couple électromagnétique, tous deux proportionnels à la composante i_q .

Question 45 : montrer que les pertes joules au stator sont minimales lorsque la composante i_d est nulle.

Les pertes Joules sont données par :

$P_j = R \cdot i_d^2 + R \cdot i_q^2$ qui est bien minimale quand i_d^2 est nul pour i_q fixé.

Question 46 : exprimer le modèle de comportement obtenu sous la forme

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \lambda (i_q - I_{ref}) \\ \frac{di_d}{dt} = \mu \cdot i_d \end{cases}$$

en précisant les valeurs de λ et μ .

On remplace dans le modèle v_d et v_q par leurs expressions imposées par la commande :

$$\begin{cases} R \cdot i_d - L \cdot \omega \cdot i_q + L \cdot \frac{di_d}{dt} = R \cdot i_d + L \cdot a \cdot i_d - L \cdot \omega \cdot i_q \\ R \cdot i_q + L \cdot \omega \cdot i_d + L \cdot \frac{di_q}{dt} + \Phi \cdot \omega = R \cdot i_q + L \cdot a (i_q - I_{ref}) + L \cdot \omega \cdot i_d + \Phi \cdot \omega \end{cases}$$

qui donne ainsi :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = a \cdot i_d \\ \frac{di_q}{dt} = a (i_q - I_{ref}) \end{cases}$$

On a par conséquent : $\lambda = \mu = a$

Question 47 : pour cette commande, exprimer la relation liant la vitesse de rotation ω du volant d'inertie à :

- J , moment d'inertie du groupe volant-moteur ;
- i_{sq} , composante du courant statorique ;
- et aux autres paramètres. Les frottements sont négligés.

On admet que le couple moteur est égal au couple électromagnétique. L'équation fondamentale de la dynamique donne : $J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \Gamma_{em} = \Phi \cdot i_{sq}$

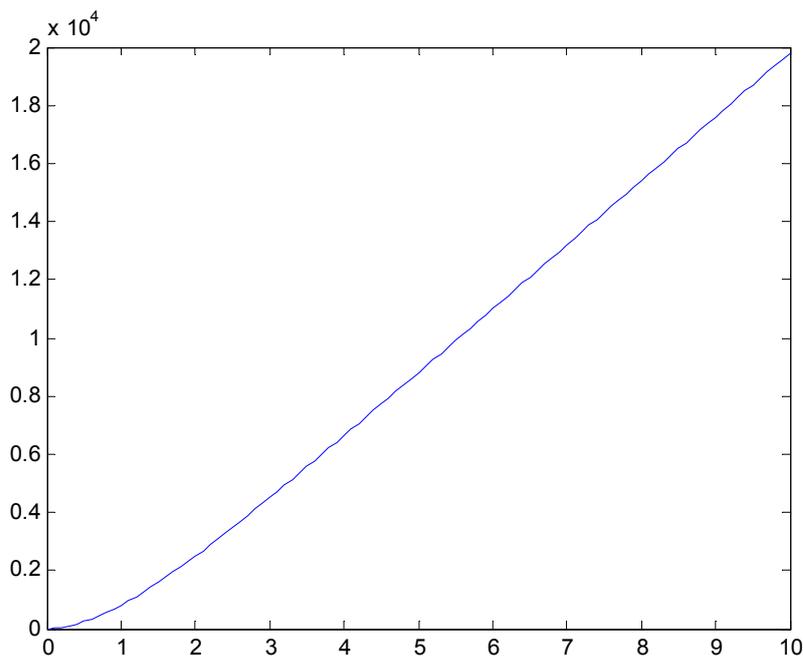
Question 48 : exprimer $\omega(t)$ en réponse à une commande indicielle de i_q d'amplitude I_{ref} (vitesse et courants sont pris initialement nuls). Représenter sommairement $\omega(t)$ sur un graphe en précisant les hypothèses faites pour obtenir le tracé.

L'équation $\frac{di_q}{dt} = a \cdot (i_q - I_{ref})$ s'intègre immédiatement, à i_q initialement nul :

$$i_q(t) = I_{ref} (1 - e^{at})$$

De même, à vitesse initiale nulle, $\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Phi}{J} \cdot i_{sq} = \frac{\Phi \cdot I_{ref}}{J} (1 - e^{at})$ donne $\omega(t) = \frac{\Phi \cdot I_{ref}}{J} \left(t + \frac{1}{a} (1 - e^{at}) \right)$

Une évolution typique de la vitesse en réponse à un échelon de la composante i_q serait :



Dans laquelle on a bien sûr choisi $a < 0$ afin d'assurer la convergence de i_q . Après une phase transitoire d'établissement du courant (et donc du couple moteur), la vitesse évolue à couple constant.

Question 49 : commenter l'intérêt d'une telle commande, la dynamique obtenue, ainsi que sa dépendance vis des paramètres du modèle qu'elle utilise.

Lorsque $a < 0$, cette commande garantit l'annulation asymptotique de i_d et la poursuite de I_{ref} par i_q . Il s'agit d'une commande en couple de la machine. Les deux composantes i_d et i_q sont découplées.

Les deux composantes sont régies par la même dynamique, qui est celle d'un système du premier ordre, de constante de temps $-1/a$. Le choix de a permet de régler la dynamique. Une valeur élevée de $|a|$ permet aux courants de rejoindre rapidement la consigne, mais une valeur excessive risque de saturer les tensions v_d et v_q , modifiant alors le comportement prévu.

Cette commande nécessite une bonne connaissance des paramètres du modèle, et suppose qu'ils varient peu pendant le fonctionnement.

Elle requiert la mesure ou l'estimation de la vitesse angulaire, ce qui peut poser quelques difficultés pratiques. Elle requiert la mesure ou l'estimation des composantes i_d et i_q .

Une telle loi de commande nécessite un calculateur, une étude des conséquences des variations paramétriques (en particulier sur la convergence en cas d'erreur paramétrique du modèle) devant être envisagée. La discrétisation de la loi de commande et l'étude des conséquences de cette discrétisation sont un préalable à sa validation.

En cas de recours à des estimateurs « observateurs », les conséquences sont délicates à prévoir, car observateurs et commandes sont ici non-linéaires, même si le modèle obtenu est linéaire. Il faudra donc étudier la dépendance observateur-commande (principe de séparation non applicable).

4.5. Comparaison avec d'autres systèmes de stockage

Question 50 : exprimer P_{vol} lors de l'accélération depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse de croisière. Donner la valeur maximale $P_{vol_max_acc}$ et calculer en kWh E_{0-32} .

$$P_{vol} = \frac{P_{jant}}{\eta_m}$$

$$P_{vol_max_acc} = \frac{550}{0,7} = 785 \text{ kW}$$

$$E_{0-32} = \int_0^{14} P_{vol}(t) dt + \int_{14}^{32} P_{vol}(t) dt$$

$$E_{0-32} = \frac{1}{2} \cdot 785 \cdot 10^3 \cdot 14 + \frac{150 \cdot 10^3}{0,7} \cdot 18$$

$$E_{0-32} = 9,35 \cdot 10^6 \text{ J} = 2,60 \text{ kWh}$$

Question 51 : exprimer P_{vol} lors de la décélération depuis la vitesse de croisière jusqu'à l'arrêt. Donner la valeur maximale $P_{vol_max_dec}$ et calculer en kWh E_{32-38} .

$$P_{vol} = P_{jant} \cdot \eta_m$$

$$P_{vol_max_dec} = -785 \cdot 0,7 = -550 \text{ kW}$$

$$E_{32-38} = \int_{32}^{38} P_{vol}(t) dt$$

$$E_{32-38} = -\frac{1}{2} \cdot 550 \cdot 10^3 \cdot 6$$

$$E_{32-38} = -1,65 \cdot 10^6 \text{ J} = -0,46 \text{ kWh}$$

Question 52 : placer sur le diagramme de Ragone les points A et B correspondant respectivement à $(E_{0-32}, P_{vol_max_acc})$ et $(E_{32-38}, P_{vol_max_dec})$.

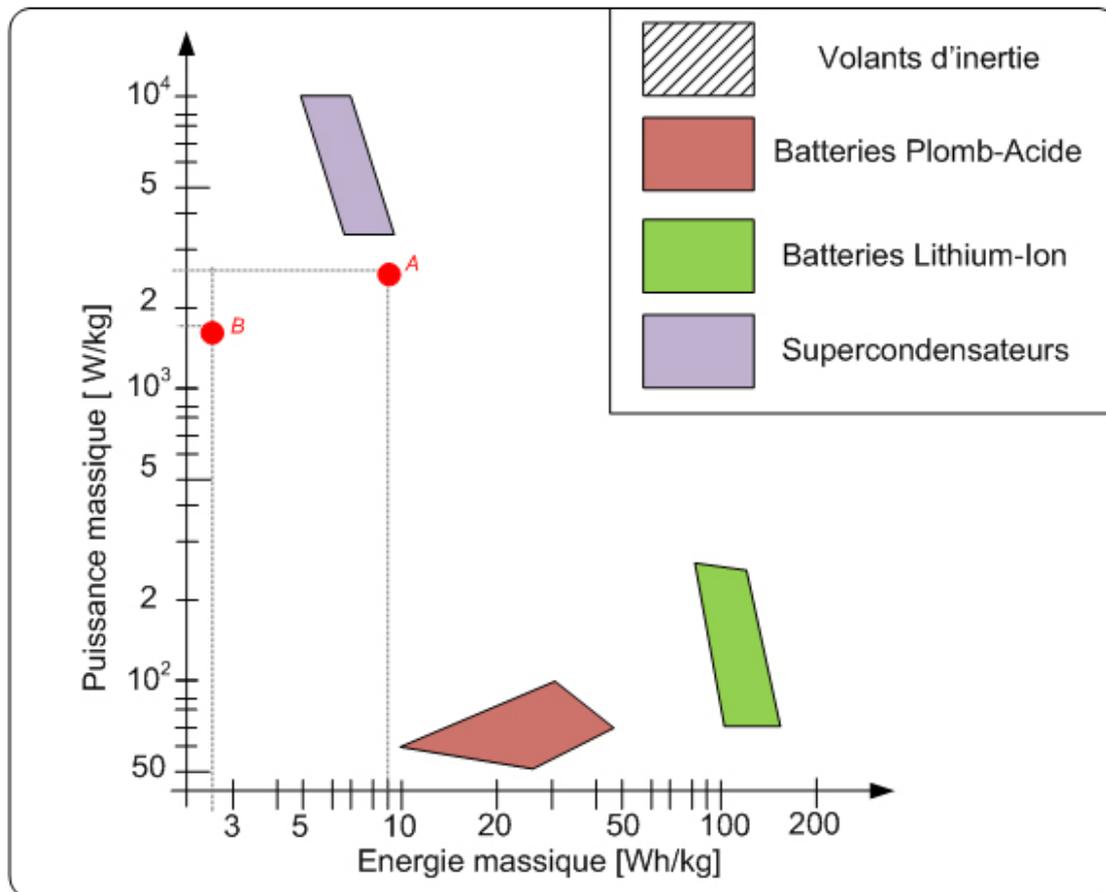
Les puissances et énergies massiques nécessaires sont (volant de 300 kg) :

$$p_{vol_max_acc} = \frac{785000}{300} = 2616 \text{ kW / kg}$$

$$e_{0-32} = \frac{2600}{300} = 8,7 \text{ kWh / kg}$$

$$p_{\text{vol_max_dec}} = \frac{550\,000}{300} = 1833 \text{ kW / kg}$$

$$e_{32-38} = \frac{460}{300} = 1,53 \text{ kWh / kg}$$



Question 53 : conclure sur l'adéquation de la solution inertielle comparativement aux autres solutions de stockage proposées.

Le stockage inertielle présente des caractéristiques proches de celles du stockage par super condensateur. Sa puissance massique est légèrement moindre, pour une énergie massique stockée légèrement meilleure. Le choix de l'un ou de l'autre se discute.

À l'opposé, les batteries Pb acide ou Li-Ion, tout en offrant une capacité énergétique plus que satisfaisante, ne sont pas en mesure de délivrer la puissance voulue dans de bonnes conditions. Alors qu'en termes de capacité énergétique des batteries Li-Ion de 30 kg suffiraient, leur masse devrait avoisiner les 5000 kg si l'on veut en extraire les 800 kW nécessaires !

En conclusion, l'utilisation d'un volant de 300 kg (équipements compris) est un choix raisonnable.

Partie 5 : Étude thermique du moteur de traction

Question 54 : indiquer dans quelles parties du moteur sont localisées les différentes pertes considérées.

Pertes joules rotoriques : localisées dans le cuivre du rotor.
 Pertes joules statoriques : localisées dans le cuivre du stator.
 Pertes fer statoriques : localisées dans le circuit magnétique du stator.

5.1 Échanges convectifs dans les canaux rotoriques

Question 55 : à partir du cycle de fonctionnement de référence, calculer la vitesse de rotation Ω_{moy} moyenne du moteur en rad/s.

$$\Omega_{moy} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{15} \frac{230}{15} \cdot t \cdot dt + \int_{15}^{30} 230 \cdot dt + \int_{30}^{36} \left(1380 - \frac{230}{6} \cdot t \right) \cdot dt \right] = 131 \text{ rad/s}$$

Question 56 : exprimer le nombre de Rossby Ro_{moy} , sans unité, en fonction de Ω_{moy} , H , et D . Calculer sa valeur.

$$Ro = \frac{Q}{H \cdot \Omega_{moy}} = \frac{24 \cdot 10^{-6} \cdot \Omega_{moy}^{1,2}}{\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot 12 \cdot H \cdot \Omega_{moy}} = \frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot \Omega_{moy}^{0,2}}{\pi \cdot D^2 \cdot H} = 0,147$$

Question 57 : exprimer le nombre de Reynolds Re_{moy} , sans unité, en fonction de Ω_{moy} , D , ρ , et μ . Calculer sa valeur.

$$Re = \frac{\rho \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot \Omega_{moy}^{1,2}}{\pi \cdot D \cdot \mu} = 2\,094$$

Question 58 : calculer le nombre de Nusselt Nu_{moy} et la constante thermique de convection h_{moy} pour l'ensemble des canaux rotoriques. Pour une température du fer rotorique de 170°C et une température de l'air intérieur de 100°C, exprimer puis calculer le flux thermique évacué du rotor par les canaux rotoriques.

$$Nu_{moy} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(1 + 0,23 \cdot Ro^{-1,24} \right) = 31,6$$

$$h_{moy} = 31,6 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$h_{moy} \cdot S = h_{moy} \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot 12 = 7,68 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$R_{fr,ai} = \frac{1}{h_{moy} \cdot S} = 130,2 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$\Phi = h_{moy} \cdot S \cdot \Delta\theta = h_{moy} \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot 12 \cdot \Delta\theta = 538 \text{ W}$$

5.2. Influence de l'excentricité des canaux

Question 59 : expliquer pourquoi la vitesse de l'air dans les canaux rotoriques est indépendante de l'excentricité.

Le débit dans les canaux rotoriques est imposé par le ventilateur, qui dépend de sa vitesse de rotation et des pertes de charges dans les canaux rotoriques et l'entrefer. Ces grandeurs sont indépendantes de l'excentricité.

Question 60 : exprimer la variation relative du nombre de Nusselt $\frac{\Delta Nu}{Nu_0}$ en fonction de la variation relative de l'excentricité $\frac{\Delta H}{H_0}$ autour de la valeur Nu_0 correspondant à la géométrie actuelle du moteur.

Calculer cette variation pour un écart de plus ou moins 10 % autour de $H_0 = 80$ mm.

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(1 + 0,23 \cdot \left(\frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot \Omega_{moy}^{0,2}}{\pi \cdot D^2 \cdot H} \right)^{-1,24} \right)$$

$$Nu = A \cdot (1 + B \cdot H^{1,24})$$

Avec $A = 9,052$ et $B = 56,83$

En dérivant, on obtient : $dNu = A \cdot B \cdot 1,24 \cdot H^{0,24} \cdot dH$

$$\text{D'où : } \frac{dNu}{Nu_0} = \frac{A \cdot B \cdot 1,24 \cdot H_0^{1,24}}{A \cdot (1 + B \cdot H_0^{1,24})} \cdot \frac{dH}{H_0}$$

$$\text{Autour de } H_0=80\text{e-3, on obtient : } \frac{dNu}{Nu_0} = 0,883 \cdot \frac{dH}{H_0}$$

$$\text{Pour une variation de l'excentricité de } \pm 10\% : \frac{\Delta Nu}{Nu_0} \approx 0,883 \cdot \frac{\Delta H}{H_0} = \pm 8,8\%$$

Question 61 : la carte du flux magnétique dans $\frac{1}{4}$ de la machine asynchrone est représentée ci-dessous. La longueur des flèches représente le niveau d'induction. Expliquer le compromis technique auquel est confronté le constructeur du moteur pour placer les canaux rotoriques.

Il serait donc intéressant d'augmenter l'excentricité pour améliorer le transfert convectif. Mais l'augmentation de l'excentricité aurait pour conséquence de rapprocher les canaux des dents rotoriques. Cette zone du circuit magnétique est le siège d'une forte densité de flux, la percer de canaux augmenterait encore cette induction et accroîtrait les pertes.

5.3. Modélisation thermique du moteur en régime statique

Question 63 : une fois la simulation complétée et le modèle exécuté, le capteur de flux (Ideal Heat Flow Sensor) indique la valeur '-1360'. En déduire l'expression de θ_a température de l'arbre. Calculer la valeur numérique et préciser si la température maximale admissible des roulements est respectée.

$$\theta_{\text{roulement}} = \Phi_a \cdot R_{r,a} + \theta_r = 94,3^\circ\text{C}$$

La température maximale admissible par le roulement n'est pas atteinte.

Question 64 : déduire de la question précédente la valeur du flux thermique fourni par le moteur au liquide de refroidissement.

Le flux thermique qui s'échappe par le liquide de refroidissement est le complément de celui qui est évacué par l'arbre :

$$\Phi_{lr} = P_{jr} + P_{jst} + P_{fst} - \Phi_a = 3\,307 + 1087 + 812 - 1360 = 3\,846 \text{ W}$$

5.4. Dimensionnement du système de refroidissement

Question 65 : calculer la résistance thermique équivalente au circuit de refroidissement $R_{lr,0}$ pour assurer l'évacuation de ce flux en limitant la température du liquide à 80°C .

$$R_{lr,0} = \frac{\theta_{lrout} - \theta_{amb}}{\Phi_{lr}} = \frac{80 - 40}{3846} = 10,4 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Question 66 : le liquide de refroidissement entre dans le moteur à une température θ_{lrin} et en ressort à une température $\theta_{lrout} = 80^\circ\text{C}$. Exprimer le débit de fluide minimal D_{lr} en litre par minute en fonction de l'élévation de température du fluide ($\Delta\theta_{lr} = \theta_{lrout} - \theta_{lrin}$).

Soit W la différence d'enthalpie, en Joule, entre le liquide entrant et sortant du moteur :

$$W = m \cdot C_{TH} \cdot \Delta\theta_{lr}$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dm}{dt} \cdot C_{TH} \cdot \Delta\theta_{lr}$$

$$\Phi_{lr} = \rho \cdot D_{lr} \cdot C_{TH} \cdot \Delta\theta_{lr}$$

$$D_{lr} = \frac{\Phi_{lr}}{C_{TH} \cdot \Delta\theta_{lr} \cdot \rho}$$

Question 67 : le liquide de refroidissement est composé d'un mélange eau / éthylène glycol. Le glycol est un antigel. Exprimer la masse volumique ρ en fonction du taux de glycol dans le mélange

$T_G = \frac{m_G}{m_E + m_G}$ variant de 0 à 100 %. m_G et m_E sont respectivement la masse de glycol et la masse

d'eau dans le mélange.

$$\rho = \frac{\rho_G \cdot \rho_E}{T_G \cdot \rho_E + (1 - T_G) \cdot \rho_G}$$

Question 68 : exprimer la capacité thermique massique en fonction du taux de glycol dans le mélange.

$$C_{TH} = T_G \cdot C_{THG} + (1 - T_G) \cdot C_{THE}$$

Question 69 : exprimer le débit de fluide D_{lr} en fonction de T_G .

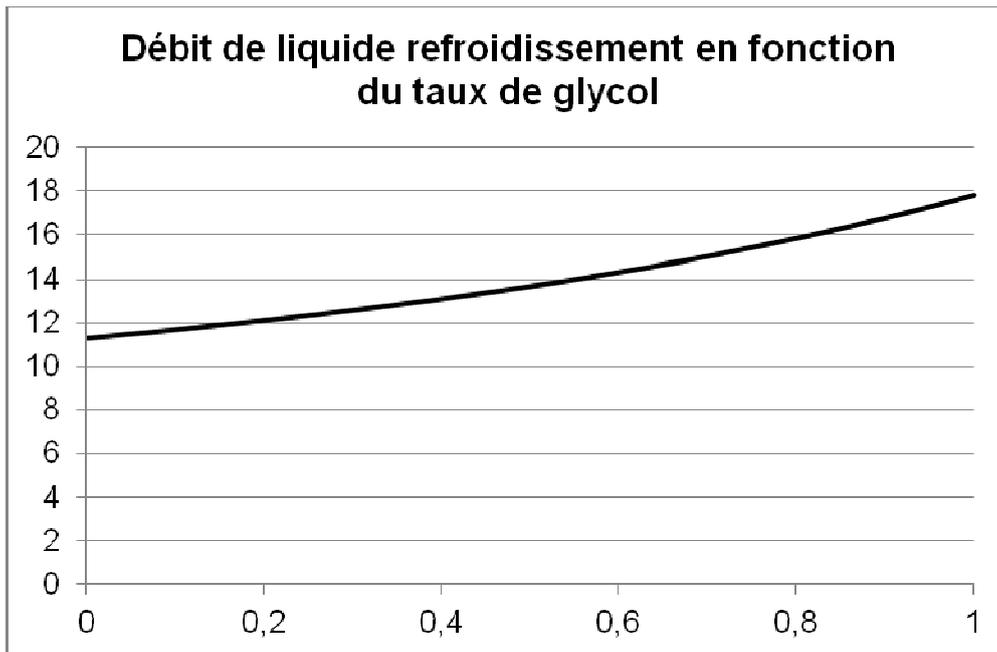
$$D_{lr} = \frac{\Phi_{lr}}{C_{TH} \cdot \Delta\theta_{lr} \cdot \rho}$$

$$D_{lr} = \frac{\Phi_{lr} \cdot (T_G \cdot \rho_E + (1 - T_G) \cdot \rho_G)}{(T_G \cdot C_{THG} + (1 - T_G) \cdot C_{THE}) \cdot \Delta\theta_{lr} \cdot \rho_G \cdot \rho_E}$$

$$D_{lr} = \frac{3846 \cdot (T_G \cdot 1000 + (1 - T_G) \cdot 1109)}{(T_G \cdot 2400 + (1 - T_G) \cdot 4185) \cdot 5 \cdot 1109 \cdot 1000}$$

$$D_{lr} = \frac{42,35 \cdot 10^{-6} \cdot (T_G - 10,17)}{T_G - 2,35}$$

Question 70 : on souhaite limiter l'élévation de température du fluide $\Delta\theta_{lr}$ à 5°C, tracer la caractéristique $D_{lr} = f(T_G)$.



Question 71 : le débit nominal du circuit de refroidissement vaut 14 L·min⁻¹, donner le taux maximal d'éthylène glycol dans le circuit de refroidissement.

Le taux de glycol ne doit pas dépasser 56%

5.5. Étude en régime dynamique

Question 72 : la modélisation en régime statique repose sur l'hypothèse que les pertes dans le moteur sont considérées constantes et égales à leurs valeurs moyennes pendant un cycle de fonctionnement du tramway. Vérifier et justifier cette hypothèse.

On constate sur cette simulation que les variations de température du rotor ont une constante de temps de l'ordre de 500 s. Le cycle de référence ayant une durée de 60 s, soit presque dix fois moins, on peut considérer le régime de la machine constant et égal à sa valeur moyenne pour simuler le comportement thermique du moteur.

5.6. Intérêt de la motorisation choisie

Question 73 : expliquer l'intérêt, pour une application de tramway, d'installer un moteur de type fermé à refroidissement liquide par rapport à une solution classique de moteur refroidi par air.

Le plancher du tramway est très bas pour faciliter la montée et la descente des passagers. La place disponible pour intégrer les bogies sous le tramway est faible. Le moteur, à l'étroit dans son emplacement, ne pourrait être refroidi uniquement par air. La solution choisie permet d'extraire la chaleur du moteur et de la dissiper dans un échangeur placé à un endroit plus aéré. D'autre part, l'air situé à proximité des roues est chargé de poussière, d'humidité et de corps divers susceptibles d'endommager, à long terme, un moteur à entrefer ouvert.

Synthèse de l'étude

Question 74 : en s'appuyant sur les diverses facettes abordées lors de l'étude, expliciter les atouts que présente une ligne de tramway par rapport aux solutions concurrentes pour satisfaire à la demande de transport dans une cité moderne. La réponse devra mettre en évidence une argumentation technique organisée, claire et précise.

La question est très ouverte, il faut cibler les critères les uns après les autres.

Transport public = l'utilisateur n'a pas à gérer le véhicule (stationnement, entretien) quand il ne se déplace pas.

[Solutions concurrentes : transport privé, avec servitudes].

Transport en commun = bon rendement technico-économique pour l'utilisateur.

[Solutions concurrentes : véhicules individuels coûteux à l'achat et à l'usage].

Voie réservée = espace urbain avec possibilité d'habillage (assez) convivial ET indépendance vis à vis d'autres flux de transport.

[Solutions concurrentes : partage de la voirie excluant les aménagements spécifiques d'embellissement ET problèmes de circulation].

Habitabilité et accessibilité (plancher bas intégral autorisé par l'absence d'essieu traversant, vitrage panoramique et absence de cloisons intérieures).

[Solution concurrente : métro souterrain sans visibilité vers l'extérieur.

Solution concurrente autobus : accessibilité parfois délicate.

Ces solutions diffèrent aussi par les aménagements en stations liés à l'accessibilité individuelle et collective].

Énergie électrique (localement) propre = niveau de nuisance atmosphérique (localement) faible

[Solutions concurrentes : véhicules à énergie fossile].

Alimentation par réseau de distribution ET possibilité d'autonomie partielle = approvisionnement permanent en énergie ET disparition possible du réseau d'alimentation (niveau de nuisance visuelle partiellement adaptable); on peut moduler le degré d'autonomie et adapter le rapport {fonctionnement alimenté par le réseau/fonctionnement sans réseau} selon les sites.

[Solutions concurrentes :

- véhicules électriques à autonomie totale : masse et contraintes de recharge du système d'autonomie importantes ;
- véhicules sans autonomie : présence nécessaire du réseau en tout point].

Récupération d'énergie locale (au freinage et en descente) = diminution des sollicitations du réseau et économies d'énergie, gestion au niveau de chaque rame.

[Solutions concurrentes sans récupération d'énergie : dissipation de l'énergie cinétique excédentaire sous forme de chaleur = pertes.

Solutions concurrentes avec récupération d'énergie par le réseau (non locale) : nécessitent des redresseurs réversibles complexes et/ou une synchronisation des séquences de plusieurs rames].

Confort dynamique (Commandabilité/souplesse élevée des systèmes à motorisation électrique).

[Solutions concurrentes : la gestion de la motricité des véhicules non électriques est moins performante, sauf en diesel-électrique, exclus pour des raisons de nuisance en ville et de masse prohibitive].

Niveau de nuisance sonore faible (motorisation électrique silencieuse ET traitement de la transmission des vibrations de la voie).

[Solution concurrente *motorisation* : moteurs à explosion, niveau sonore difficile à gérer].

Solution concurrente *roulement* : roulement sur pneus, nécessite deux conducteurs d'alimentation ET dégradation de la qualité de la surface de roulement].

Rapport du jury de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur

Cette épreuve est commune aux trois options. Les candidats composent sur le même sujet au titre de la même session quelle que soit l'option choisie. Conformément à l'arrêté du 25/11/2011, « cette épreuve a pour but de vérifier que le candidat est capable de mobiliser ses connaissances scientifiques et techniques pour conduire une analyse systémique, élaborer et exploiter les modèles de comportement permettant de quantifier les performances globales et détaillées d'un système des points de vue matière, énergie et information afin de valider tout ou partie de la réponse au besoin exprimé par un cahier des charges. Elle permet de vérifier les compétences d'un candidat à synthétiser ses connaissances pour analyser et modéliser le comportement d'un système pluri-technique automatique ».

1. Présentation du sujet

Le sujet proposé pour cette épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur s'appuie sur la problématique liée à l'installation d'un système de transport collectif urbain. Le support technique retenu est un tramway dont le contexte et l'infrastructure se composent de :

- l'environnement citadin dans lequel circule le tramway ;
- les sous-stations d'alimentation de la voie ;
- les moteurs de traction et leur convertisseur ;
- le système de stockage de l'énergie de freinage ;
- les bogies et le système de transmission de l'énergie mécanique.

Cette épreuve, composée de cinq parties indépendantes, a permis de tester chez les candidats, les connaissances et capacités requises dans les champs suivants :

- recherche architecturale et environnementale ;
- étude des besoins énergétiques d'une rame de tramway ;
- dimensionnement d'une centrale inertielle ;
- étude thermique du moteur de traction.

2. Analyse globale des résultats

La majorité des candidats a abordé l'ensemble des parties du sujet et la progression a été principalement linéaire. La progressivité de la difficulté dans le questionnement a permis d'identifier les candidats les plus performants.

Le jury encourage les futurs candidats à l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur à poursuivre leur effort de formation afin de développer les compétences transversales de sciences de l'ingénieur.

3. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

Partie 2 : Recherche architecturale et environnementale

En préambule, il était proposé au candidat une analyse globale sur ce mode de transport (Questions 1 et 2). On demandait de dégager les éléments qui expliquent pourquoi ce type de transport est utilisé à nouveau dans notre espace urbain après une période de désintérêt, puis de proposer un argumentaire pour conseiller une équipe de maîtrise d'ouvrage en charge d'étudier une nouvelle ligne de tramway pour une grande ville de province inscrite dans les appels à projet du Grenelle de l'environnement.

Tous les candidats ont abordé les deux questions consacrées à cette première partie. Si l'énumération des points-clé du tramway dans son contexte donne des résultats satisfaisants, la moitié des

candidats s'est mal positionnée lorsqu'il s'agissait de conseiller la maîtrise d'ouvrage car il y avait les deux points de vue successifs du citoyen-utilisateur et du décideur-maitre d'ouvrage qui adresse ses exigences au maitre d'œuvre.

Le jury recommande aux futurs candidats d'approfondir leur approche concernant la compétitivité des produits et des services notamment sous l'angle de l'économie générale des systèmes (coûts d'acquisition, de fonctionnement, de maintenance, retour sur investissement)

Les questions 3 à 6 traitaient de la propagation des vibrations engendrées par le passage de la rame, puis des moyens techniques à mettre en œuvre pour en atténuer les effets. Le jury constate que les phénomènes physiques mis en jeu et leurs modélisations sont mal maîtrisés par une très grande partie des candidats. Un tiers des candidats seulement justifie convenablement le besoin d'une campagne de mesures, au regard de la nécessaire validation du modèle de description du contact tramway-sol. La question 7 porte sur les types de solutions techniques permettant d'atténuer les vibrations générées dans le sol par le passage du tramway. Un quart des candidats parvient à développer une analyse convenable concernant le problème posé.

Le jury rappelle aux candidats que la modélisation et la simulation associée nécessitent successivement une identification paramétrique du modèle et une validation en vue d'une exploitation future.

Partie 3 : Étude des besoins énergétiques d'une rame de tramway

Aux questions 8 et 9, il était proposé au candidat une vérification du dimensionnement cinématique de l'actionneur principal et de la transmission du tramway. Plus de la moitié des candidats répond de manière satisfaisante aux deux questions concernées.

Les questions 10 à 15 traitaient de la détermination des besoins énergétiques de la rame. Si tous les candidats ont abordé ce questionnement, ce qui est relativement satisfaisant, il n'en demeure pas moins qu'une large majorité d'entre eux est mise en difficulté par des notions aussi fondamentales que l'énergie cinétique et la relation puissance - énergie avec son système d'unités et ses ordres de grandeur.

Les questions 16 à 19 traitaient des caractéristiques du système d'alimentation par ligne de contact. De nouveau, le jury apprécie que tous les candidats aient abordé ce questionnement. Toutefois, il n'en demeure pas moins qu'une large majorité des candidats ne réussit pas à commenter les écarts observés entre les performances mesurées sur le tramway et celles issues de la modélisation. Par ailleurs, la modélisation électrique de l'ensemble caténaire-tramway-rails a présenté beaucoup de difficultés à une majorité de candidats. Quelques copies remarquables sortent cependant du lot.

Le jury souhaite que la culture technologique des candidats puisse se développer notamment grâce à la confrontation, autant qualitative que quantitative, à de nombreux cas réels.

Les questions 20 et 21 étaient l'occasion, pour les candidats, d'effectuer une synthèse sur l'autonomie conférée au tramway par l'utilisation d'un stockage embarqué. Les quelques candidats ayant répondu correctement à ces questions ont fait preuve du niveau de synthèse attendu dans cette épreuve transversale de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur.

Partie 4 : Dimensionnement d'une centrale inertielle

L'objectif global de cette partie était de déterminer le matériau, les dimensions et le mode de pilotage du volant qui permettent de répondre au mieux aux critères du cahier des charges :

- masse minimale du volant d'inertie ;
- prix de revient optimisé ;
- impact environnemental minimisé.

Dans un premier temps, l'objectif est de répondre aux deux premiers critères du cahier des charges, par le choix de matériaux qui permet de trouver le meilleur compromis entre la masse du volant d'inertie et son coût.

La mise en place d'un modèle de connaissance est nécessaire afin de déterminer la densité massique d'énergie stockée dans un volant d'inertie de géométrie imposée. Celle-ci nécessite des savoirs fondamentaux liés au domaine énergétique. Une majorité des candidats a atteint cet objectif, cependant, il est regrettable que la totalité de ces savoirs transversaux ne soient pas totalement acquis.

Dans un second temps, l'objectif était de choisir le matériau du volant d'inertie parmi les deux sélectionnés préalablement, afin de répondre aux contraintes de masse et d'encombrement.

Les applications numériques n'ont pas toujours été réalisées avec précision par les candidats, ne leur permettant pas de rédiger un argumentaire afin de choisir le matériau adapté.

Dans un troisième temps, l'objectif était de choisir le matériau du volant d'inertie parmi les deux sélectionnés préalablement, afin de répondre à la contrainte de l'impact environnemental.

Cette partie a été peu abordée, en raison principalement des mauvaises applications numériques de la partie précédente. Cependant, même lorsque les calculs sont corrects, la démarche de caractérisation de l'impact environnemental proposée dans le sujet n'est pas toujours comprise et correctement mise en œuvre.

Enfin, les objectifs sont, à travers l'étude d'un mode de commande en vitesse performant, de mettre en évidence les possibilités de pilotage du volant d'inertie dans le contexte du stockage d'énergie embarquée, et enfin de le comparer à d'autres systèmes de stockage embarqués.

Le modèle de l'actionneur étant fourni, la plupart des candidats n'a pas pu justifier la loi de commande proposée, parce qu'ils n'ont pas finalisé des calculs élémentaires.

La comparaison de la solution retenue sur le tramway par rapport à d'autres systèmes de stockage embarqués a été très peu abordée, toujours en raison de la non maîtrise des outils fondamentaux liés au domaine énergétique. De plus, l'analyse des sens de transfert énergétique entre deux sous-systèmes, pourtant fondamentale, n'a pas permis aux candidats de caractériser les bilans de puissance dans les systèmes dissipatifs.

Partie 5 : Étude thermique du moteur de traction

L'objectif global était de modéliser le comportement thermique du moteur pendant le cycle de fonctionnement du tramway et de vérifier que les températures limites de la machine ne sont pas atteintes.

Une étude préliminaire visait à modéliser l'échange thermique entre l'air intérieur de l'actionneur et les canaux rotoriques et à vérifier l'influence d'un paramètre de dimensionnement de la machine sur la qualité de l'échange thermique dans les canaux rotoriques. Par la suite, le candidat était invité à compléter un modèle thermique de la machine asynchrone en vue de vérifier que les températures limites ne sont pas atteintes lors du fonctionnement du tramway. Enfin, le candidat était amené à déterminer le débit et la composition du liquide de refroidissement permettant d'évacuer la chaleur produite par l'actionneur.

Le jury constate que très peu de candidats ont abordé cette partie, alors que les autres obtiennent des résultats honorables. Il est rappelé que la modélisation des phénomènes thermiques touche à des problématiques communes à l'ensemble des trois spécialités de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur.

On constate par ailleurs un manque de rigueur dans les notations, les calculs, l'homogénéité des expressions mêmes simples et la présentation des résultats.

Partie 6 : Synthèse

L'objectif de cette partie est de produire une synthèse du questionnement mené tout au long du sujet et des solutions apportées à chaque problème.

La synthèse produite - par un très faible nombre de candidats - se réduit trop souvent à un argumentaire commercial très éloigné de l'étude scientifique et technique attendue.

Conseils du jury

Le jury encourage les candidats à traiter toutes les parties du sujet et à montrer qu'ils maîtrisent l'ensemble des domaines des sciences de l'ingénieur. Ainsi, le jury apprécie les copies où les candidats tentent de répondre à la globalité du sujet.

Pour ce qui est de la présentation des copies, il est exigé de bien indiquer le numéro des questions traitées et la démarche de résolution. Cette dernière doit être exposée avec rigueur, les hypothèses doivent être explicitées clairement et les notations doivent être précises, claires et respecter scrupuleusement celles imposées dans le sujet.

De plus, les expressions littérales doivent être impérativement présentées de la façon suivante :

- l'expression littérale, sans aucune application numérique, est présentée encadrée ;
- l'expression est ensuite donnée en remplaçant les termes littéraux par leurs valeurs numériques, dans le même ordre que l'expression littérale ;
- le résultat numérique est ensuite indiqué avec l'unité, encadré.

$$R_{fr,ai} = \frac{1}{h_{moy} \cdot \frac{L}{D} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot 12}$$
$$R_{fr,ai} = \frac{1}{31.6 \cdot 11.2 \cdot \pi \cdot (24 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 12}$$
$$R_{fr,ai} = 130,2 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Le jury apprécie les candidats qui justifient, ou même simplement expliquent, les démarches adoptées pour répondre aux questions posées.

Les réponses aux questions de synthèse doivent être argumentées et concises.

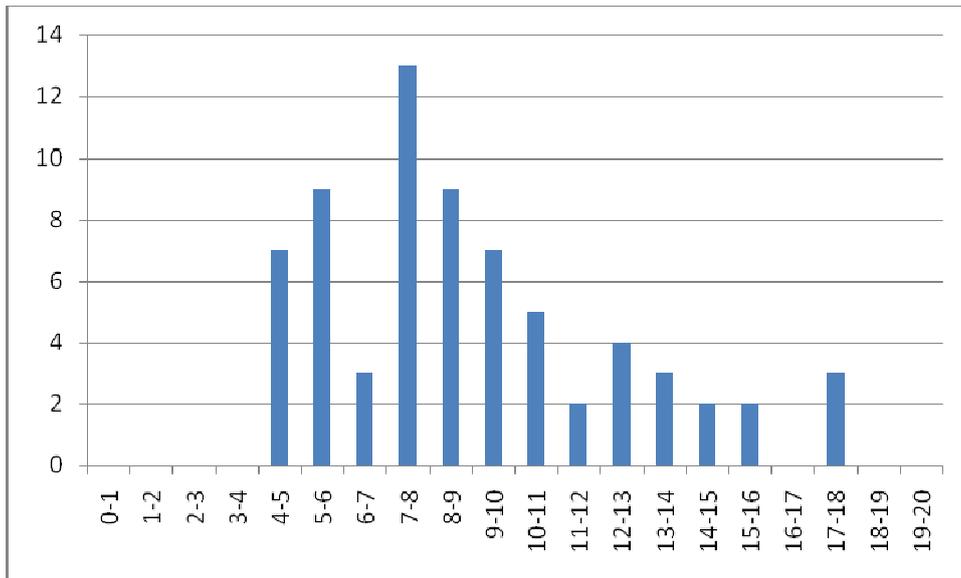
4. Conclusion

Le sujet a été conçu pour permettre aux candidats d'exprimer au mieux leurs compétences dans le cadre de cette nouvelle épreuve transversale. Toutes les questions du sujet ont été abordées par les candidats quelle que soit l'option choisie. Le jury engage fortement les futurs candidats à se préparer conformément aux attendus (arrêté du 25/11/2011).

5. Résultats

69 candidats ont composé pour cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 9/20 et l'écart-type 3,5/20 avec :

- 17,9 comme meilleure note ;
- 4,2 comme note la plus basse.



Éléments de correction de l'épreuve de modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation

Partie 1 - Mécanique des structures (7 points)

1.1.) On suppose que les contraintes sont perpendiculaires à la section et constantes.

1.2.) On isole la portion de fût représentée sur la figure 2.

Bilan des forces s'appliquant sur cette portion de fût :

- contrainte σ_{ortho} sur deux zones, projetée sur X : $-\vartheta \cdot \sigma_{ortho}$
- Pression p sur la zone intérieure du fût, projetée sur X : $+\int_0^{\frac{\pi}{2}} p \cdot \cos \theta \cdot R_f \cdot d\theta = p \cdot R_f$
- Pression p_{atm} sur la zone extérieure du fût, projetée sur X : $-\int_0^{\frac{\pi}{2}} p_{atm} \cdot \cos \theta \cdot (R_f + e) \cdot d\theta = p_{atm} \cdot (R_f + e)$

On applique le PFS à la portion de fût, en projection sur l'axe X :

$$-\vartheta \cdot \sigma_{ortho} + p \cdot R_f - p_{atm} \cdot (R_f + e) = 0$$

$$\sigma_{ortho} = \frac{p \cdot R_f - p_{atm} \cdot (R_f + e)}{e}$$

1.3.) On suppose que les contraintes sont perpendiculaires à la coupe effectuée et constantes.

1.4.) $R_f = R_d \sin \frac{2\pi}{7}$

1.5.) On isole un quart du dôme.

Bilan des forces s'exerçant sur le quart de dôme en projection sur l'axe Z:

- contrainte σ_{vert} sur la surface inférieure : $-\frac{1}{4}\pi \left((R_f + e)^2 - R_f^2 \right) \sigma_{vert}$

- contrainte p sur l'intérieur du dôme : θ varie de 0 à $\frac{\pi}{2}$; φ varie de 0 à $\theta_{max} = \sin^{-1} \frac{R_f}{R_d}$

$$\iint_{d\text{d\ome}} p R_d \cos \varphi d\varphi R_d d\theta = p R_d R_d \frac{\pi}{2} [\sin \theta]_0^{\sin^{-1} \frac{R_f}{R_d}} = p R_d R_d \frac{\pi R_f}{2 R_d} = p R_d R_f \frac{\pi}{2}$$

- contrainte p_{atm} sur l'extérieur du dôme : θ varie de 0 à $\frac{\pi}{2}$; φ varie de 0 à $\theta_{max} = \sin^{-1} \frac{R_f}{R_d}$

$$\iint_{d\text{d\ome}} -p_{atm} (R_d + e) \cos \varphi d\varphi (R_d + e) d\theta = -p_{atm} (R_d + e)^2 \frac{\pi}{2} [\sin \varphi]_0^{\sin^{-1} \frac{R_f}{R_d}}$$

$$= -p_{atm} (R_d + e)^2 \frac{\pi R_f}{2 R_d}$$

On applique le PFS en projection sur l'axe Z au quart de dôme isolé :

$$-\frac{1}{4}\pi \left((R_f + e)^2 - R_f^2 \right) \sigma_{vert} + p R_d R_f \frac{\pi}{2} - p_{atm} (R_d + e)^2 \frac{\pi R_f}{2 R_d} = 0$$

$$-\frac{1}{2} \left((R_f + e)^2 - R_f^2 \right) \sigma_{vert} + p R_d R_f - p_{atm} (R_d + e)^2 \frac{R_f}{R_d} = 0$$

$$\sigma_{vert} = \frac{p R_d R_f - p_{atm} (R_d + e)^2 \frac{R_f}{R_d}}{\frac{1}{2} \left((R_f + e)^2 - R_f^2 \right)}$$

1.6.)

$$\sigma_{vert} = 13,77 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ortho} = 11,01 \text{ MPa}$$

1.7.) En superposant les résultats précédents à la précontrainte, il vient :

$$\sigma_{ortho} = 11,01 \text{ MPa (traction)} + \sigma_{précontrainte} = - 2,99 \text{ MPa (compression)}$$

$$\sigma_{vert} = 13,77 \text{ MPa (traction)} + \sigma_{précontrainte} = - 3,23 \text{ MPa (compression)}$$

En cas d'accident APRP l'enceinte reste en compression.

1.8.) Les pertes de précontraintes sont dues au «vieillessement» du béton et de l'acier. Ces pertes de précontrainte des câbles réduisent la marge de résistance à la fissuration de la paroi interne de l'enceinte en situation accidentelle.

1.9.) questions de « cours »

1.10.) La poutre en 2D n'étant pas sollicitée hors-plan, il n'y aura pas de contraintes perpendiculairement au plan ; l'hypothèse réalisée est une hypothèse de contraintes planes.

Cette modélisation est très critiquable car dans le cas de la structure 3D, il existe des contraintes normales hors-plan qui ne sont pas négligeables (d'où la précontrainte orthoradiale).

1.11.) Structure isostatique. Choix de l'orientation de la liaison au point A pour des raisons de symétrie axiale du problème.

1.12.) Principe fondamental de la statique appliqué à la poutre au point 0 :

$$Y_A + Y_B + \int_0^{2\pi/7} P_0 \cdot R_d \cdot \sin \theta \cdot d\theta = 0$$

$$Z_B + \int_0^{2\pi/7} P_0 \cdot R_d \cdot \cos \theta \cdot d\theta = 0$$

$$-Y_A \cdot R_d - Y_B \cdot R_d \cos \frac{2\pi}{7} + Z_B \cdot R_d \sin \frac{2\pi}{7} = 0$$

On obtient :

$$Y_A = -R_d \cdot p_0$$

$$Y_B = R_d \cdot p_0 \cdot \cos \frac{2\pi}{7}$$

$$Z_B = -R_d \cdot p_0 \cdot \sin \frac{2\pi}{7}$$

1.13.) On obtient :

$$N(\theta) = R_d \cdot p_0$$

$$V(\theta) = 0$$

L'effort tranchant étant nul, on peut en déduire que le moment fléchissant est constant dans toute la poutre. Or les conditions aux appuis imposent que le moment fléchissant est nul en A et en B, donc il est nul dans toute la poutre : $M(\theta) = 0$.

1.14.) La poutre est soumise uniquement à des contraintes normales aux sections droites, et constantes dans les sections et dans la poutre.

$$\sigma_{max} = \frac{N_{max}}{e \times 1} = \frac{R_d \cdot p_0}{e}$$

$$\text{A.N. : } \sigma_{max} = 14,22 \text{ MPa}$$

1.15.) Pour modéliser le dôme en 2D en axisymétrique, on peut utiliser :

- des éléments surfaciques : triangles à 3 nœuds, quadrilatères à 4 nœuds, qui vont décrire la géométrie du dôme en 2D en maillant dans l'épaisseur du dôme.
- des éléments de coque : qui vont décrire la ligne moyenne du dôme et qui auront dans leurs caractéristiques l'épaisseur, la raideur, ... etc

D'après les figures, c'est une modélisation avec des éléments surfaciques (quadrilatères) qui a été retenue.

1.16.)

1^{ère} remarque : les forces calculées par l'opérateur ne sont pas constantes. En effet, elles tiennent compte de la modélisation axisymétrique, et donc du fait que, plus on se rapproche de la base du dôme, plus il y a plus de surface sur laquelle est appliquée la pression : les forces résultantes sont donc de plus en plus grandes.

2^{ème} remarque : la force calculée diminue à la base du dôme (par rapport à celles des nœuds situés immédiatement au-dessus). En effet, l'opérateur calcule à chaque nœud une moyenne des pressions appliquées de part et d'autre du nœud ; il n'y a rien après le nœud situé à la base donc la valeur de la force équivalente sera quasiment égale à la moitié de celle du nœud précédent.

1.17.) C.L. :

- ligne à la base du dôme bloquée en translation horizontale et verticale.
- ligne de l'axe de symétrie en haut du dôme bloquée en translation horizontale (symétrie).

1.18.) Les diagrammes des contraintes σ_{RR} , σ_{ZZ} et σ_{RZ} sont tracés respectivement sur les figures 7, 8 et 9.

σ_{RR} : valeurs maximales en haut du dôme : autour de 7 MPa. Diminue en descendant.

σ_{ZZ} : valeurs augmentent en descendant vers le bas du dôme : mais 26 MPa non significatif, car dû à un effet de condition aux limites.

σ_{RZ} : valeurs maximales vers $\pi/4$. Pas de cisaillement en haut du dôme.

Les directions des contraintes principales suivent la ligne moyenne de la poutre (une direction principale étant la tangente à la ligne moyenne).

Partie 2 – Acoustique (3 points)

2.1.) k est le nombre d'onde ou la constante de propagation. Il s'exprime en m^{-1} . La relation est $k = 2\pi f/c_0$

2.2.) On a $W = \int_{sphere} I dS$ et en intégrant sur une sphère de rayon r : $W = 4\pi r^2 I = \frac{4\pi r^2}{Z_0} |\rho_{eff}|^2$ D'où

en passant en niveaux logarithmiques :

$$L_W = 10 \log(W/W_0) = 10 \log\left(\frac{4\pi r^2}{Z_0} \left|\frac{\rho_{eff}}{\rho_0}\right|^2 \frac{\rho_0^2}{W_0}\right) = 10 \log(4\pi r^2) + 10 \log\left(\left|\frac{\rho_{eff}}{\rho_0}\right|^2\right) + 10 \log\left(\frac{\rho_0^2}{Z_0 W_0}\right)$$

$$L_W = 10 \log(4\pi r^2) + L_p + 10 \log\left(\frac{4 \times 10^{-10}}{443 \times 10^{-12}}\right) \text{ avec ce dernier terme négligeable, d'où } L_p \approx L_W - 10$$

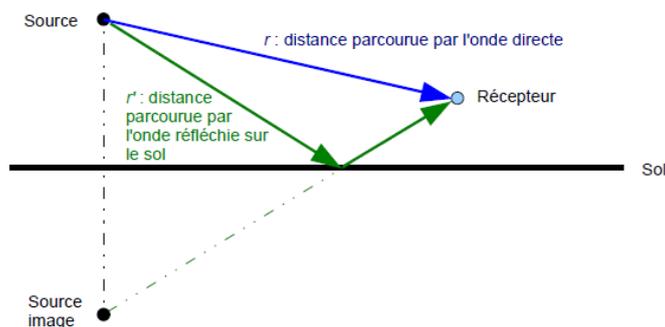
$$\log(4\pi r^2)$$

2.3.) D'après la formule donnée en préambule, l'atténuation due à la divergence géométrique est la différence entre le niveau de puissance et le niveau de pression en l'absence d'effet de sol, c'est-à-dire en champ libre.

$$A_{div} = L_{p, libre} - L_W = -10 \log(4\pi r^2) \text{ avec } r = 1000 \text{ m}$$

$$A_{div} = -71 \text{ dB}$$

2.4.) $p_{sol}(r) = \frac{a}{r} \exp(-jkr) + Q \frac{a}{r'} \exp(-jkr')$ avec r' la distance parcourue par l'onde qui subit une réflexion sur le sol. Lorsque le récepteur est très éloigné de la source, $r' \approx r$.



$$2.5.) A_{sol} = L_p(\text{champ libre}) - L_p(\text{avec sol})$$

$$L_p(\text{champ libre}) = 10 \log_{10}(|p_{libre}|^2 / p_0^2) = 10 \log_{10}[(a/r)^2 (1/p_0^2)]$$

$$L_p(\text{avec sol}) = 10 \log_{10}(|p_{sol}|^2 / p_0^2)$$

$$= 10 \log_{10}[(a/r)^2 (1/p_0^2) |\exp(-jkr)|^2 (1+Q r/r' \exp(-jk(r-r')))^2]$$

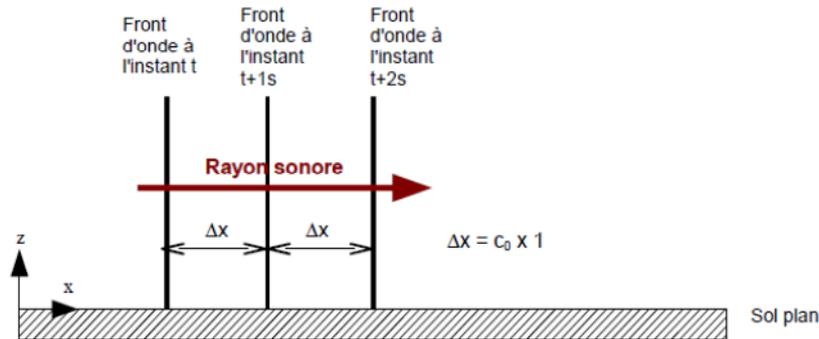
$$= 10 \log_{10}[(a/r)^2 (1/p_0^2)] + 10 \log_{10}[|1+Q r/(r+\delta) \exp(-jk\delta)|^2]$$

$$A_{\text{sol}} = 10 \log_{10} \left[\left| 1 + Q \frac{r}{r+\delta} \exp(-jk\delta) \right|^2 \right]$$

2.6.) Pour le sol n°1, on a une atténuation positive, donc une augmentation du niveau sonore. Pour le sol n°2, on a une atténuation négative, donc une diminution du niveau sonore.

2.7.) $L_p = L_W + A_{\text{div}} + A_{\text{sol}} = 110 - 71 - 3 = \underline{36 \text{ dB(A)}}$

2.8.)

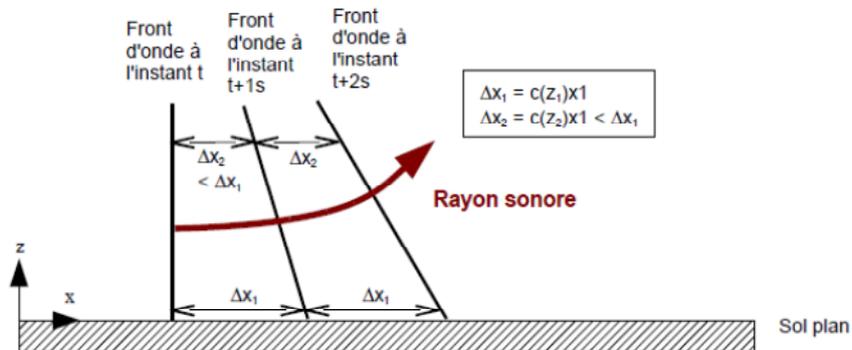


Les différents fronts d'onde sont distants de $\Delta x = c \times 1s = 340 \text{ m}$. Les rayons sonores sont rectilignes et parallèles au sol (suivant l'axe des x).

2.9.) Il est évident que la célérité des ondes évolue avec l'altitude de la même manière que la température. Si $T \uparrow$ alors $c \uparrow$ et vice versa. En l'absence de vent, $c = \sqrt{\gamma RT}$ et donc $c_0 = \sqrt{\gamma RT_0}$

d'où $c = c_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}}$ ce qui donne à 400 m d'altitude : $c(400) = 340 \sqrt{\frac{273+12}{273+20}} = 335.3 \text{ ms}^{-1}$

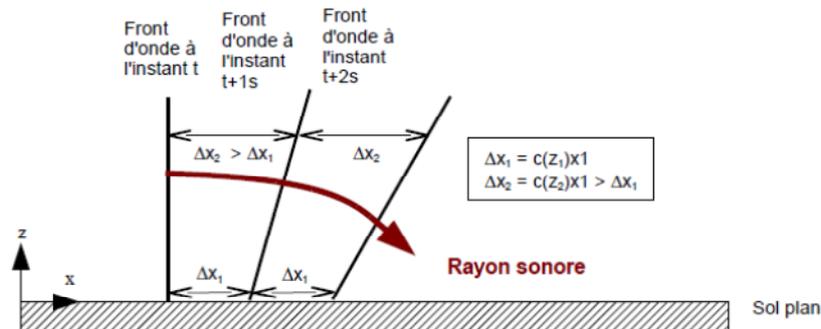
2.10.) La température décroît avec l'altitude, donc d'après la question précédente, la célérité de l'onde sonore décroît également avec l'altitude. Donc le front d'onde progresse plus vite (et donc plus loin au bout d'1s) au niveau du sol qu'en altitude, ce qui conduit à une inclinaison vers le haut du front d'onde.



Les rayons sonores sont alors incurvés vers le haut. Ainsi un récepteur situé à grande distance pourra se retrouver « sous » le rayon sonore et l'onde sonore ne l'atteindra pas : c'est donc une condition qui

empêche la propagation du son, en d'autres termes une condition défavorable à la propagation du son (mais favorable au riverain !).

2.11.) Cette fois, la température croît avec l'altitude, donc la célérité de l'onde sonore croît également avec l'altitude. Donc le front d'onde progresse plus vite (et donc plus loin au bout d'1s) en altitude qu'au niveau du sol, ce qui conduit à une inclinaison vers le bas du front d'onde.



Les rayons sonores sont alors incurvés vers le bas. L'onde sonore est « rabattue » vers le sol. A grande distance davantage de rayons sonores arrivent au récepteur, soit directement soit après des rebonds sur le sol pouvant être multiples. On a un renforcement du niveau sonore : c'est donc une condition qui favorise la propagation du son.

2.12.) Prendre en compte le terme $V(z) \cos\theta$ avec $V(z) \geq 0$ et $V(z)$ croissant avec z , revient à augmenter la célérité $c(z)$ avec l'altitude si $\cos\theta > 0$ et à la diminuer avec l'altitude si $\cos\theta < 0$. On se ramène donc ainsi au cas précédemment étudiés avec l'inclinaison des fronts d'onde et l'incurvation des rayons sonores. Lorsque le vent souffle dans la même direction que celle de la propagation du son (vent « portant »), alors $\cos\theta > 0$, la célérité du son $c(z)$ augmente avec l'altitude, on est donc en condition « favorable » à la propagation. A l'inverse, lorsque le vent est contraire, alors $\cos\theta < 0$, la célérité du son $c(z)$ décroît avec l'altitude, on est donc en condition « défavorable » à la propagation du son (intuitivement, ce résultat est logique...).

2.13.)

a) La condition de propagation n°1 correspond à des atténuations sonores plus faibles, donc à une condition favorable à la propagation ($\text{grad}_z(c) > 0$). La condition de propagation n°2 correspond à des atténuations sonores plus fortes, donc à une condition défavorable à la propagation ($\text{grad}_z(c) < 0$). Les valeurs correspondant à la condition de propagation homogène ($\text{grad}_z(c) = 0$) se situent à la séparation entre les deux zones.

b) La dispersion des atténuations est d'environ 10 à 12 dB à 100 m de la source, et d'environ 40 dB à 600 m. A 600 m, la dispersion des atténuations dans les conditions défavorables de propagation est plus importante que celle observée dans les conditions favorables.

c) En conséquence, il est préférable de mesurer le niveau sonore dans les conditions de propagation favorables puisqu'on aura moins d'incertitude quant à la variabilité des niveaux sonores (ceci dit, il est encore mieux de pouvoir intervenir dans des conditions « homogènes », moins sensibles aux variations atmosphériques).

2.14.) L'émergence est la différence entre les niveaux de pression du bruit ambiant avec l'établissement en fonctionnement, et le bruit résiduel ou «bruit de fond» en l'absence du bruit généré par l'établissement (mais mesuré sur la période de fonctionnement de l'établissement). Difficulté d'application en raison de :

- Forte variabilité des niveaux sonores en fonction de la météo (plusieurs dizaines de dB(A)) sans commune mesure avec la faible émergence qu'il faut caractériser (3 à 6 dB(A)).
- On peut aussi citer que les centrales sont souvent situées dans des zones très calmes (surtout la nuit), donc avec un très faible niveau de bruit de fond ce qui met une contrainte forte sur la contribution sonore admissible de l'installation (ex : si le bruit de fond la nuit est de 30 dB(A), l'installation ne doit pas produire plus de 35 dB(A) sinon l'émergence limite n'est pas respectée).

Partie 3- Thermique (4 points)

Étude d'un plancher chauffant

3.1.) Les phénomènes de chaleur mis en jeu sont:

- a) Echange de chaleur par convection entre la surface et l'air
- b) Echange de chaleur par rayonnement grande longueur d'onde entre la surface et l'environnement

3.2.)

Les transferts radiatifs grande longueur d'onde s'écrivent:

$$\varphi_{r,int} = \sigma \frac{T_s^4 - T_i^4}{1 + \frac{1 - \alpha_{GLO}}{\alpha_{GLO}}} = \sigma \times \alpha_{GLO} \times (T_s^4 - T_i^4) = h_r (T_s - T_i)$$

avec:

$$h_r = \sigma \times \alpha_{GLO} \times (T_s^2 + T_i^2)(T_s + T_i)$$

3.3.)

L'application numérique de l'expression de la question 3.2.), avec $T_i=292,15K$, donne $h_r=4,5W/m^2K$.

3.4.)

$$\varphi_{int} = (h_c + h_r) \times (T_{int,ser} - T_i) = (5 + 7) \times (28 - 19) = 108W / m^2$$

$$\Phi_{int} = 0.7 \times S_{ser,ser} \times \varphi_{int} = 15,12kW$$

3.5.)

$$T_{i,1} = T_i + (T_{int,ser} - T_i) \times \left(1 + \frac{\epsilon}{\lambda} \times (h_c + h_r) \right) = T_{int,ser} + (T_{int,ser} - T_i) \times \frac{\epsilon}{\lambda} \times (h_c + h_r) = 30,9^\circ C$$

3.6.)

$$\eta = \left[1 + \frac{\epsilon_1}{\lambda_1} \times \frac{l}{\frac{\epsilon_2}{\lambda_2} + \frac{\epsilon_1}{\lambda_1}} + \frac{T_{int,air} - T_{int}}{T_{int,air} - T} \times \frac{l}{\left(\frac{\epsilon_r}{\lambda_1} + \frac{\epsilon_1}{\lambda_1}\right) \times (h_1 + h_2)} \right] = 0,93 = 93\%$$

Étude des consommations de chauffage

3.7.)

$$P_1 = U_{1,2} \times S_{1,2} \times (T_i - T_{ext})$$

3.8.)

$$P_{1,1} = \rho_v \times C_v \times Q_v \times (T_i - T_{ext})$$

3.9.)

$$P_{1,2} = \rho_v \times C_v \times Q_v \times (1 - \epsilon) \times (T_i - T_{ext})$$

3.10.)

$$P_{int,1} = 0,25 \times 400 \times (19 + 7) + \frac{210}{3600} \times 1,2 \times 1000 \times (19 + 7) = 4420 \text{ W}$$

$$P_{int,2} = 0,25 \times 400 \times (19 + 7) + \frac{210}{3600} \times 1,2 \times 1000 \times 0,35 \times (19 + 7) = 3237 \text{ W}$$

3.11.)

$$C_1 = \left(0,25 \times 400 + \frac{210}{3600} \times 1,2 \times 1000 \right) \times 2400 \times 24 / (1000 \times 200) = 49 \text{ kWh} / m^2$$

$$C_2 = \left(0,25 \times 400 + \frac{210}{3600} \times 1,2 \times 1000 \times 0,35 \right) \times 2400 \times 24 / (1000 \times 200) = 35,9 \text{ kWh} / m^2$$

3.12.)

$$\tau = \frac{1000}{(C_1 - C_2) \times 200 \times 0,1} = 3,8$$

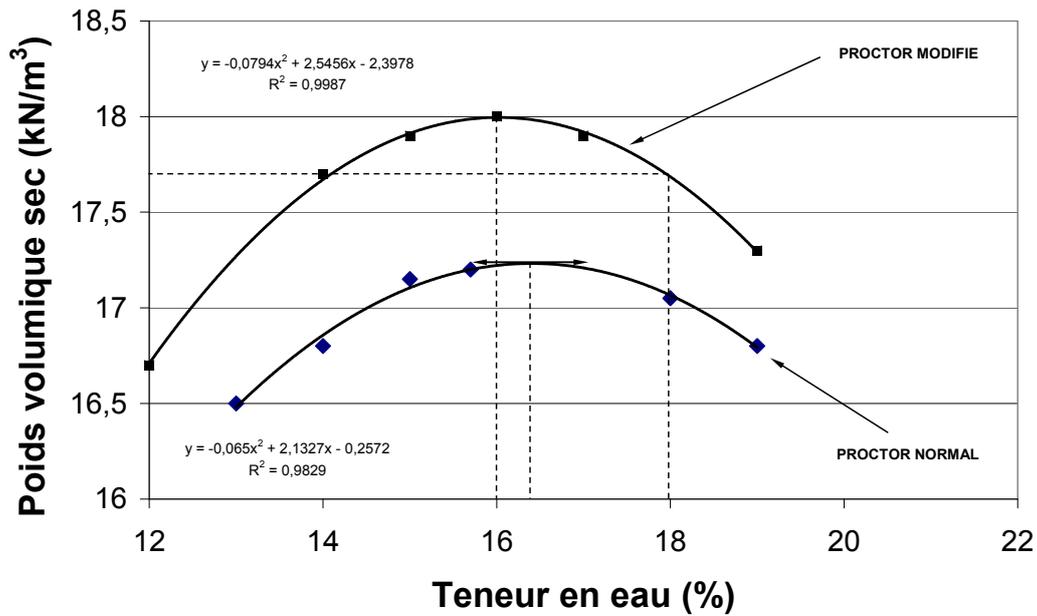
Le temps de retour est de 3,8 ans. La VMC avec récupérateur de chaleur est donc un système pertinent pour la réduction des coûts liés à la consommation de chauffage d'une maison individuelle.

partie 4 - Mécanique des sols (3 points)

4.1.) I_c est compris entre 0,88 et 1,88.

Diamètre $< 80 \mu\text{m}$ = 90 à 95% et $I_p = 18$ à 26 → classification sol fin A, précisément A2, allant de très humide à très sec $0,88 \leq I_c \leq 1,88$.

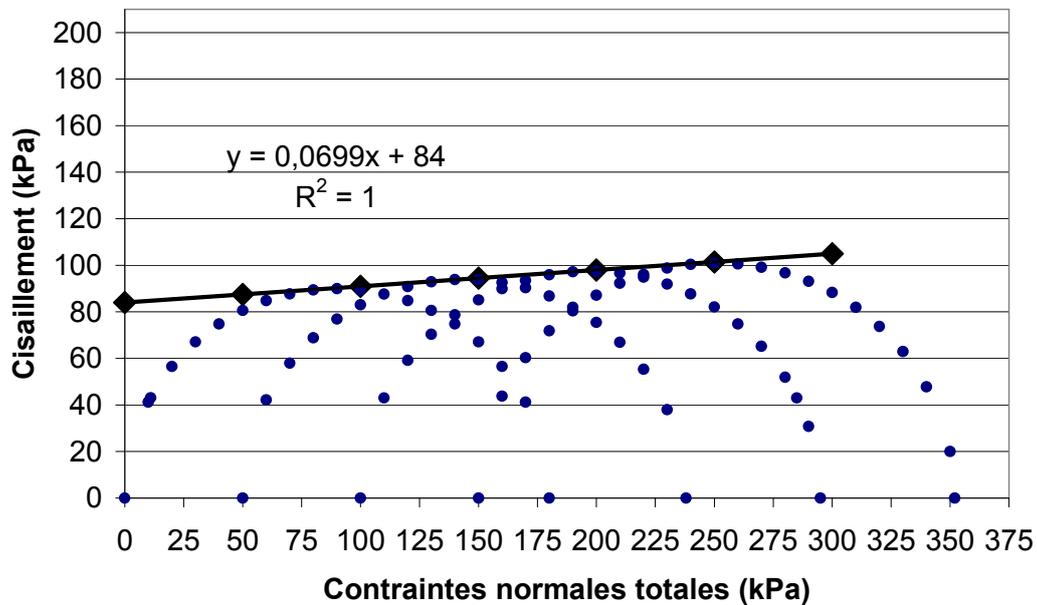
4.2.)



A partir de la construction des courbes pour $e_c = 100\%$ OPN donne le couple $w = 16,2\%$ et $\gamma_d = 17,25$ kN/m³. Pour $e_c = 140\%$ OPM donne le couple $w = 16\%$ et $\gamma_d = 18$ kN/m³.

4.3.) A l'aide de la courbe précédente (Proctor Modifié), OPM + 2% = 18%, $\gamma_d = 17,7$ kN/m³ et $S_r = 95,95\% \sim 96\%$ proche de la saturation mais non saturé.

4.4.)



$\tau = C_{uu} + \sigma \tan \varphi_{uu}$ avec $C_{uu} = 84$ kPa et $\varphi_{uu} = 4^\circ$.

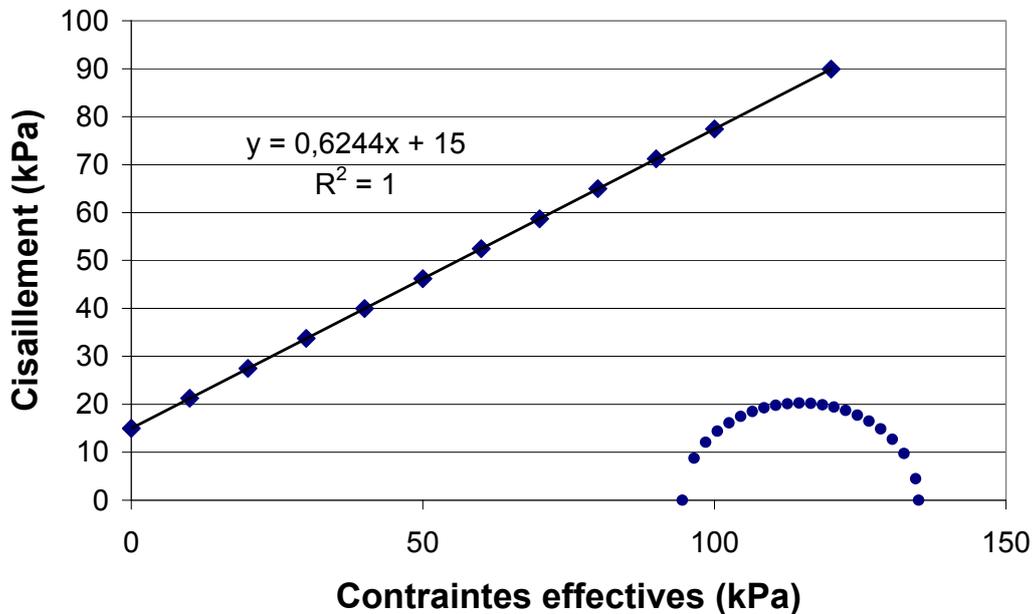
4.5.) φ_{uu} n'est pas nul car l'échantillon n'est pas saturé. L'augmentation de l'angle de frottement traduit la consolidation de l'échantillon au cours de l'augmentation de la pression de confinement. D'après

Bishop (1957) se sont les contraintes effectives qui s'appliquent sur la phase solide. Contrairement à l'essai classique (UU échantillon saturé), les déformations ne sont font plus à volume constant, la surpression interstitielle existe et les trois phases du sol cohabitent.

4.6.) L'essai consolidé drainé (CD) consiste à consolider l'échantillon de sol sous une contrainte, en ouvrant les drainages et en attendant que la surpression interstitielle se soit dissipée. Puis, on vient cisailier le sol à vitesse très lente (de l'ordre du $\mu\text{m}/\text{min}$) à drainages ouverts tel que la surpression interstitielle soit constamment nulle. On peut mesurer la variation de volume de l'échantillon pendant l'essai. L'essai

CD correspond au comportement à long terme d'un sol fin et fournit l'angle de frottement effectif ϕ' et la cohésion effective C' . Il ne s'effectue que sur des échantillons saturés.

Pour l'argile à 5 m $\sigma_1 = 5 \times 22 + 7,5 \times 10 = 185 \text{ kPa}$ (contrainte normale totale), l'argile est saturée $\sigma'_1 = 185 - (10 \times 5) = 135 \text{ kPa}$ si $K_0 = 0,7$ alors la poussée $\sigma'_3 = 0,7 \times 135 = 94,5 \text{ kPa}$. On trace le cercle de Mohr sur le diagramme σ' et τ' avec $\tau' = C' + \sigma' \tan \phi'$ (voir ci-dessous)



En ce point l'argile est loin de la rupture.

4.7.) $T = t \times C_v / H^2$ avec $T = 1$ (consolidation totale), t le temps, C_v le coefficient de consolidation et H l'épaisseur de la couche argileuse pour un drainage sur une seule face.

4.8.) $T = t \times C_v / H^2$ avec $T = 1$, $C_v = 4.10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ et $H = 5 \text{ m}$ (drainage d'un seul coté). Dans ces conditions $t = 198,2 \text{ ans} \sim 200 \text{ ans}$.

4.9.) Argile saturée : $\gamma = \gamma_d(1+w_s)$ alors $\gamma_d = 16 \text{ kN}/\text{m}^3$. L'indice des vides à l'état initial $e_0 = \gamma_s / \gamma_d - 1 = 0,65$.

Contrainte effectives initiales = $2,5 \times 22 - 2,5 \times 10 = 30 \text{ kPa}$

Contraintes effectives finales = $30 + (7,5 \times 10) = 105 \text{ kPa}$

Le tassement $\Delta h = (H \times C_c) / (1 + e_0) \times \lg(105/30) = 38$ cm pour l'argile située entre deux alvéoles.

4.10.) Sur le dôme de l'alvéole la couverture présente une épaisseur de $H = 1$ m. Dans les mêmes conditions que précédemment (centre de la couche et argile saturée), le tassement de cette couche sera de :

$\Delta h = (100 \times C_c) / (1 + e_0) \times \lg(\sigma_f / \sigma_i)$ avec $\sigma_i = 0,5 \times 22 - 0,5 \times 10 = 6$ kPa et $\sigma_f = 6 + 7,5 \times 10 = 81$ kPa. Dans ces conditions $\Delta h = 15,7$ cm pour $t = H^2 / C_v = 8$ ans. Un tassement différentiel de la couverture argileuse (entre 1 m et 5 m d'épaisseur) existe à moyen terme entraînant un endommagement possible de l'argile. Cependant, l'association du dispositif géosynthétique permet de pallier ce problème.

Partie 5 – Matériaux (3 points)

5.1.) Sans rentrer dans l'intimité de la chimie du ciment anhydre et durci, il convient de rappeler que lors de l'hydratation des précipités se forment :

Des cristaux de CSH (Calcium – Silice – Hydrate)

Des cristaux de chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Les CSH donne au ciment sa résistance. Ils sont composés de Ca (calcium) et de Si (silice). Les cristaux de chaux n'apportent pas de résistance.

5.2.) Dans un béton il reste de l'eau piégée (solution interstitielle) qui n'a pas réagi avec le ciment et qui peut « migrer » au sein de la porosité connectée du béton. Cette eau interstitielle présente un PH de 13.

Les précipités précédents formés au moment de la réaction d'hydratation sont en équilibre de précipitation dissolution avec la solution interstitielle. Cette solution contient alors des ions OH^- et CA^{2+} , et d'autres à base de silice. La pénétration d'une eau acide ou pure (non minéralisée) va rompre l'équilibre en entraînant certaines espèces. Pour rétablir l'équilibre une dissolution de la phase solide s'opère. C'est en premier lieu la chaux qui se dissout puis les CSH ainsi le rapport C/S (calcium sur silice) diminue. La conséquence de cette lixiviation est une augmentation de la porosité et donc une diminution de la résistance du béton.

5.3.) A partir de la figure 17c nous voyons que l'évolution du module d'Young dans la zone dégradée est linéaire. Lorsque $x = 0$ $E(x) = E_D$. Lorsque $x = e$ alors $E(x) = E_0$. A partir des résultats précédents $E(x) = ((E_0 - E_D)/e)x + E_D$

Comme $E(x) = (1 - V(x))E_0$ alors $V(x) = 1 - [((1 - E_D/E_0)/e)x + E_D/E_0]$

5.4.) $x = 0$ alors $E(x) = E_D$; $x = e/2$ alors $E(x) = (E_0 + E_D)/2$; $x = e$ alors $E(x) = E_0$. Par la suite, $V(x)$ passe de $1 - E_D/E_0$ lorsque $x = 0$ à $V(x) = 0$ lorsque $x = e$ puisque le matériau est sain. L'évolution est bien linéaire comme le montre l'équation précédente (question 5.3.).

5.5.) Analogie rhéologique simple = deux ressorts en parallèles. Pour le premier, une rigidité E_{DM} pour une section dégradée S_D et pour le second une rigidité E_0 pour une section saine S_0 . L'équilibre statique d'une section du modèle conduit à écrire la relation suivante :

$$E \times S = E_{DM} \times S_D + E_0 \times S_0$$

Avec $S = S_D + S_0$, E la rigidité de l'éprouvette, E_{DM} la rigidité moyenne de la zone dégradée et E_0 la rigidité de la zone saine. En remplaçant E_{DM} et les différentes sections la rigidité E se met sous la forme :

$$E = ((E_D + E_0)/2) \times (1 - ((r-e)^2/r^2) + E_0 \times ((r-e)^2/r^2)$$

5.6.) $r = 5,5$ cm

pour $e = 0$, $E = E_0 = 55000$ MPa (béton haute performance – BHP)

pour $e = 4$ mm $E_D = 0,16 \times E_0$

pour $e = 8$ mm $E_D = 0,16 \times E_0$

pour $e = 12$ mm $E_D = 0,16 \times E_0$

Rapport E_D/E_0 constant.

5.7.) $E_{DM} = 31900$ MPa, $E_0 = 55000$ MPa, $E_D = 8800$ MPa

pour $e = 4$ mm, $E(x) = 11550x + 8800$ avec x en mm et $E(x)$ en MPa, $1 - V(x) = 0,21x + 0,16$

pour $e = 8$ mm, $E(x) = 5775x + 8800$ avec x en mm et $E(x)$ en MPa, $1 - V(x) = 0,105x + 0,16$

pour $e = 12$ mm, $E(x) = 3850x + 8800$ avec x en mm et $E(x)$ en MPa, $1 - V(x) = 0,07x + 0,16$

Evolution linéaire de $V(x)$ en fonction de la profondeur dégradée. $V(x)$ passe de 0,84 à 0 quand x passe de $x = 0$ à $x = e$ quelque soit e . Donc $V(x)$ ne dépend que du rapport E_D/E_0 .

5.8.) A partir de la figure 19 pour 600 ans la profondeur dégradée à l'eau pure est de 4 cm. Pour une dégradation accélérée sur béton ordinaire, à 4 cm correspond une durée de 857 jours. Pour un béton haute performance à 857 jours la dégradation est de 23,8 mm (par lecture sur le graphique). La rigidité moyenne ne dépend que de E_D (cf. questions précédentes) donc $E_{DM} = 31900$ MPa (rigidité d'un béton ordinaire). La durabilité des fûts en BHP est évidemment plus importante d'où l'intérêt d'avoir un BHP ou BTHP avec un E/C réduit pour les fûts conteneurs de déchets radioactifs.

Rapport du jury de l'épreuve de modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation

1. Présentation du sujet

Le sujet proposé portait sur la filière nucléaire française depuis la conception des centrales nucléaires jusqu'au stockage des déchets en passant par la distribution et la consommation de l'énergie. Le sujet comportait 5 parties indépendantes, respectivement portant sur la mécanique des structures, l'acoustique, la thermique du bâtiment, la mécanique des sols et enfin sur les matériaux du Génie Civil.

2. Analyse globale des résultats et commentaires sur les réponses apportées

La partie 1 portait sur la mécanique des structures et plus particulièrement sur le calcul des sollicitations subies par l'enveloppe en béton de la centrale nucléaire en cas d'accident APRP. Cette partie était notée sur 7 points. 80% des candidats ont traité cette partie. Dans l'ensemble, les correcteurs notent que les candidats maîtrisent mal la mécanique des structures et en particulier la théorie des poutres. L'hypothèse des contraintes et des déformations planes n'est, elle non plus, pas connue. Le principe fondamental de la statique est quant à lui très mal maîtrisé. Il était pourtant facile de prendre des points sur cette partie qui dans l'ensemble n'a pas été bien traitée par les candidats.

La partie 2 portait sur l'acoustique et plus particulièrement sur la gêne sonore occasionnée à la proximité de la centrale. Cette partie était notée sur 3 points et 50% des candidats l'ont abordée. Dans l'ensemble, les résultats sont très disparates et majoritairement très médiocres, malgré quelques bonnes voire très bonnes copies. Cette partie, bien que non classique dans la thématique abordée, ne nécessitait pourtant que des connaissances basiques dans le domaine de l'acoustique (nombre d'onde, front d'onde, émergence sonore et calcul classique de niveau de pression et de niveau de puissance acoustique). Le reste visait à découvrir des phénomènes complexes de propagation sonores à grande distance à partir de raisonnements logiques et d'analyses scientifiques simples. Trop peu de candidats se sont prêtés à l'exercice.

La partie 3 portait sur la thermique du bâtiment et plus particulièrement sur la distribution de l'énergie, le calcul de la puissance et de la consommation électrique d'une habitation basse consommation d'énergie. Cette partie était notée sur 4 points. 82% des candidats ont traité cette partie. Les correcteurs notent que la majorité des candidats ne maîtrisent ni les calculs de base de transferts de chaleur ni les calculs de puissance/consommation de chaleur liés au chauffage. Le premier paragraphe concernait les transferts de chaleur au sein d'un plancher chauffant. Les trois premières questions, quoique très classiques, n'ont dans l'ensemble pas été traitées correctement. Le reste de ce premier paragraphe demandait des calculs simples de transferts de chaleur. Leur traitement par les candidats montre un réel problème de modélisation de la conduction et des transferts par rayonnement et convection. Le second paragraphe concernait des calculs de puissance et consommation de chauffage. Trop peu de candidats ont traité correctement cette partie qui demandait plus de réflexion et de connaissances théoriques.

La partie 4 portait sur la mécanique des sols et plus particulièrement sur l'argile de couverture d'un centre de stockage de déchets très faiblement radioactifs. Cette partie était notée sur 3 points et 67% des candidats l'ont abordée. Dans l'ensemble, les résultats obtenus par les candidats sont médiocres au grand désespoir des correcteurs. Il s'agissait pourtant d'une épreuve de mécanique des sols très

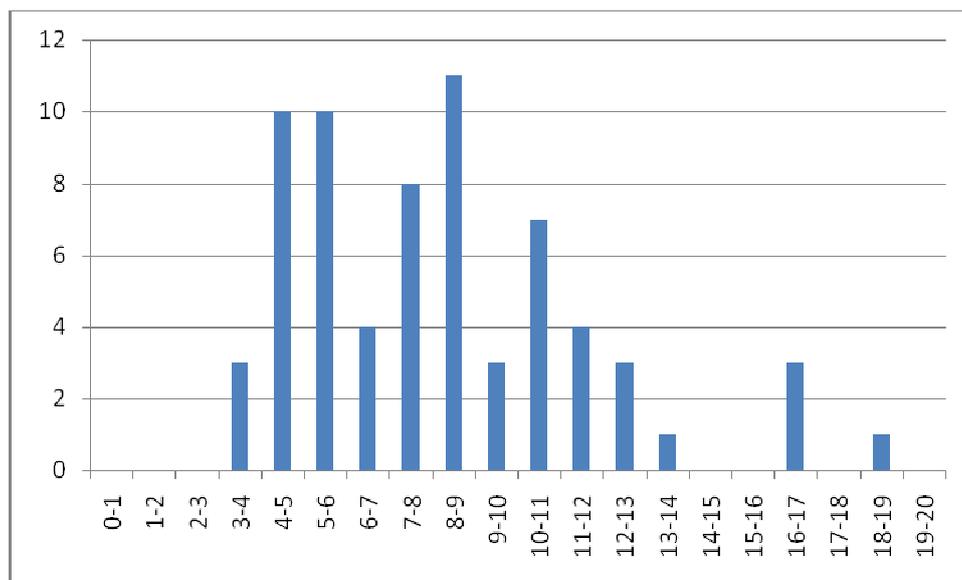
classique même si le contexte était particulier. Les candidats ne connaissent pas le principe des contraintes effectives. Ils ont de grandes difficultés à tracer des cercles de Mohr. Visiblement, ils ne connaissent pas non plus les essais classiques de mécanique des sols (UU et CD). Seule une poignée de candidats connaissent les équations de base qui régissent le tassement et la consolidation des sols fins.

La partie 5 portait sur le comportement du béton dans le cas particulier d'un conteneur de déchets hautement radioactifs. Cette partie était notée sur 3 points et elle a été abordée par 70% des candidats. Dans l'ensemble, les résultats des candidats sont très variables. Certains ne connaissent visiblement pas le matériau béton alors que d'autres ont des connaissances plus sûres sur le sujet. Néanmoins, les résultats restent faibles. En particulier, les correcteurs notent que la majorité des candidats ne connaissent pas les modèles rhéologiques de base qui sont utilisés pour simuler le comportement des matériaux. Cela est étonnant compte tenu du niveau de qualification des candidats qui s'inscrivent au concours de l'agrégation externe.

3. Résultats

68 candidats ont composé pour cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 8,2/20 et l'écart-type 3,4/20 avec :

- 18,5 comme meilleure note ;
- 3,7 comme note la plus basse.



Éléments de correction de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation

Partie B1- Equipements techniques

Réseau d'extraction - vérification

Vérifier que les vitesses, dans le réseau proposé en annexe C3, restent inférieures à la valeur de 4 m/s.

Deux approches sont possibles :

- calculer, pour chaque diamètre, le débit possible à 4 m/s et vérifier qu'il est bien inférieur à celui du projet ;
- vérifier pour chaque débit du circuit que le diamètre est suffisant.

Les diamètres des gaines sont intégralement vérifiés.

Cette partie a été traitée par 90% des candidats. Les réponses sont très largement correctes.

Justifier que les bouches d'extraction choisies permettent d'évacuer l'air en respectant les débits souhaités avec un niveau d'émission sonore inférieur à 25 dBA.

Le niveau d'émission sonore sera naturellement fonction de la perte de charge générée.

Les calculs étant longs et fastidieux, il est important que le candidat formule des hypothèses simplificatrices, en supposant, par exemple le trajet provoquant le plus de pertes de charges et celui engendrant le moins de pertes de charges. Compte tenu de la précision des diagrammes, il est important de simplifier le calcul (exemple ignorer les pertes de charges linéaires des éléments de faible longueur).

Pour un niveau d'émission sonore de 25 dBA, une perte de charges de plus de 40 Pa est possible au niveau de la bouche alors qu'il est nécessaire d'en ajouter environ 25.

80% des candidats ont abordé la question. La quasi-totalité l'a traitée de façon très partielle sans poser clairement d'hypothèse simplificatrice.

Réseau d'extraction – étude de prix

Compléter les quantités pour le réseau du lot CVC.

Par la technique du sous-détail de prix, déterminer le Prix de Vente TTC. Après négociation commerciale, consentir une réduction de 2%.

Désignation	Unité	Quantité	PV _U HT	PVHT
Gaine φ 125 mm	m	11,32	40,16	454,61
Gaine φ 160 mm	m	2,02	49,55	100,09
Gaine φ 200 mm	m	0,50	63,45	31,73
Gaine φ 250 mm	m	0	77,17	0,00
Bouche de ventilation sur φ 125	U	9	37,78	340,02
Té équerre égal φ 125 mm	U	5	24,7	123,50
Té équerre égal φ 160 mm	U	1	28,42	28,42
Té équerre égal φ 200 mm	U	1	34,66	34,66
Té équerre égal φ 250 mm	U	0	46,04	0,00
Piquage φ 125 mm sur φ 160 mm	U	1	25,78	25,78
Piquage φ 125 mm sur φ 200 mm	U	0	28,61	0,00
Piquage φ 160 mm sur φ 200 mm	U	0	30,84	0,00
Piquage φ 125 mm sur φ 250 mm	U	0	31,43	0,00
Piquage φ 160 mm sur φ 250 mm	U	0	34,76	0,00
Piquage φ 200 mm sur φ 250 mm	U	0	38,14	0,00
Coude 45° φ 125 mm	U	2	19,82	39,64
Coude 45° φ 160 mm	U	0	23,96	0,00
Coude 45° φ 200 mm	U	0	30,47	0,00
Coude 45° φ 250 mm	U	0	36,35	0,00
Coude 90° φ 125 mm	U	9	23,46	211,14
Coude 90° φ 160 mm	U	1	29,21	29,21
Coude 90° φ 200 mm	U	0	37,62	0,00
Coude 90° φ 250 mm	U	0	48,96	0,00
Réduction φ 125 mm / φ 160 mm	U	3	22,38	67,14
Réduction φ 160 mm / φ 200 mm	U	2	24,92	49,84
Réduction φ 200 mm / φ 250 mm	U	0	29,02	0,00
			Total – € HT	1535,78
			Remise – € HT	-30,72
			Total remisé – € HT	1505,06
			TVA - €	294,99
			Total – € TTC	1800,05

95% des candidats ont déterminé les quantités et le PV. Les valeurs calculées sont majoritairement correctes.

Indiquer les informations que l'on trouve généralement dans un CCAP.

Pléthore de documents sur internet sont disponibles (objet de la consultation, prix du marché, délais, dépenses communes, coordinations et études, réception, assurances, résiliation ...).

Nombreux sont les candidats ayant répondu. Cependant, les solutions apportées sont nettement incomplètes.

Connaissant les données de variation de prix, calculer le montant qui sera facturé au maître d'ouvrage.

$P_{\text{révisé}} = 1505,06 \text{ € HT}$

On rappelle que le coefficient de revalorisation doit être arrondi à 3 décimales, en faveur de l'entreprise.

Partie B2 - Etude de la climatisation du Hall Bassin Loisir Détente

2.1 Analyse de la Solution de principe – généralités.

Rappeler les spécificités liées au traitement d'air d'un espace tel que le hall HBLD.

Le hall bassin loisir détente est un espace particulier en ce qui concerne le traitement de l'air à plusieurs égards :

Il s'agit d'un volume important et très largement vitré, qui abrite un peu plus 800 m² de bassins et jeux aquatiques, et qui doit pouvoir accueillir près de 360 personnes de manière instantanée.

Les apports hydriques conséquents des bassins impliquent de mettre en œuvre plusieurs stratégies techniques notamment en période hivernale :

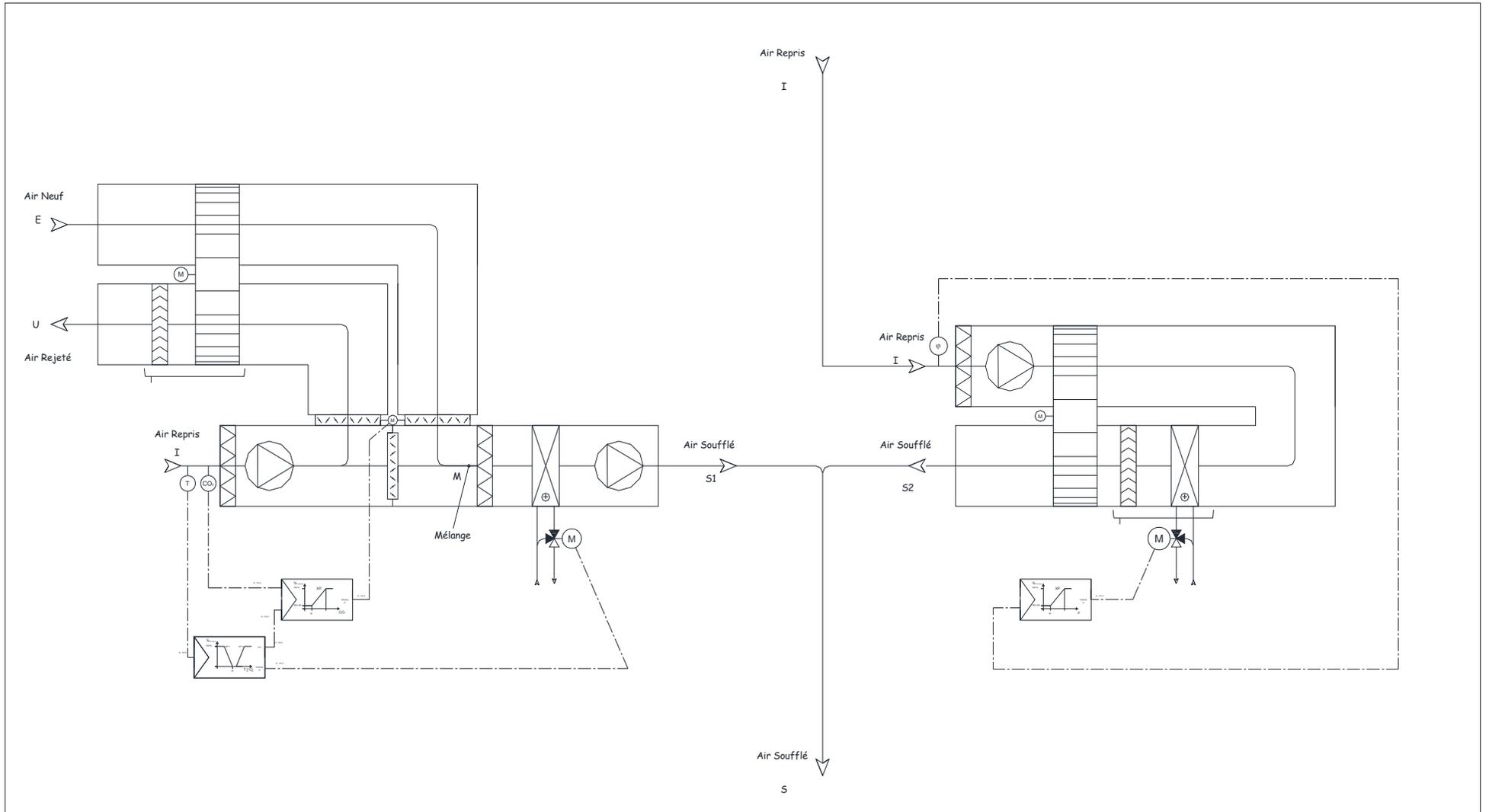
- Il faudra déshumidifier l'air de manière à rendre l'ambiance confortable, mais également pour éviter la dégradation de l'enveloppe via des phénomènes de condensation ;
- Il sera par ailleurs nécessaire d'éviter « les points froids » sur cette enveloppe.

Le traitement d'un volume aussi important nécessite de penser la diffusion de l'air afin de garantir une homogénéité sa qualité dans cet espace ; mais également afin de traiter les points froids tels que les baies vitrées en période hivernale.

Il faudra par ailleurs renouveler l'air de manière adaptée à l'occupation instantanée, afin de réduire les taux de polluants présents dans l'air (vapeur d'eau, chloramines, ...), et assurer une légère dépression de ces locaux à pollution spécifique par rapports aux locaux attenants (vestiaires, douche, ...).

Dans cette question il s'agissait donc de déterminer les contraintes liées au traitement de l'air du hall bassin de loisir. Plus de la moitié des candidats abordent cette question, mais les analyses proposées sont souvent très incomplètes.

En vous appuyant sur le descriptif du lot CVC, proposer le schéma de principe des CTA. Ce schéma fera apparaître les différents réseaux aérauliques et hydrauliques ainsi que les organes nécessaires à la régulation.



Dans cette question il s'agissait, à partir de l'extrait de CCTP, de réaliser un schéma de principe traduisant la solution technique décrite dans ce dernier. Seuls 30 % des candidats parviennent à faire cette traduction de manière à peu près convenable. Il est regrettable de constater qu'une majorité des candidats ne sait réaliser ce travail. Plus avant cela reflète la difficulté de nombreux candidats à s'exprimer sous forme de schéma, une compétence de base pour un enseignant !

2.2 Dimensionnement des centrales de traitement d'air.

On souhaite dans cette partie étudier deux situations :

- ✓ une situation hivernale à 100 % d'occupation ;
- ✓ une situation mi saison à 100 % d'occupation ;

Déterminer les charges enthalpiques et hydriques à combattre dans le hall bassin pour ces deux situations. Justifier vos démarches et présenter vos résultats sous forme de tableaux synthétiques.

Charges liées aux parois :

En s'appuyant sur les données du sujet on peut déterminer le flux de chaleur perdu au travers de la paroi de la manière suivante :

$$\Phi = \sum_{i=1}^n S_i \cdot U_i \cdot (T_{int} - T_{ext})$$

Ces calculs présentés dans un tableau donnent :

Parois	Surface	U	D	□□hiver	□ Mi saison
	m ²	W/m ² .°C	W/°C	kW	kW
Murs /zone non chauffée	66,00	0,45	29,70	1,07	0,15
Fenêtres / extérieur	468,00	2,60	1 216,8	43,81	6,08
Toitures bas acier	1 065,00	0,28	298,20	10,74	1,49
Toitures terrasse	252,00	0,34	85,68	3,08	0,43
Plancher bas	1 750,00	0,40	700,00	25,20	3,50
Ponts thermiques		10 % du global		8,39	1,17
Total				92,28	12,82

Charges liées aux occupants :

Pour trouver le nombre d'occupants maximum on utilise la notion de FMI. Ici on a une surface de bassin de profondeur supérieur à 30 cm égale à :

Désignation	Surface m ²
Bassin Fun Relax	131,5
Bassin loisir Détente	408,9
Total	540,4

La FMI est alors de : $FMI = 540,4 \times \frac{2}{3} = 360 \text{ personnes}$

En situation d'occupation maximale, on prend pour hypothèse que seul 80 % des occupants sont des baigneurs, les apports liés aux occupants sont donc :

Apports globaux [kW]	Apports sensibles [kW]	Apports latents [kW]	Apports latents [kg/s]
10,94	8,2	2,74	0,0011

Charges liées aux échanges thermiques des bassins avec l'ambiance :

Les bassins plus chauds que l'ambiance réchauffent cette dernière. Ils apportent une puissance de :

$$P_{\text{bassin}} = h \cdot S_{\text{bassin}} \cdot (T_{\text{eau}} - T_{\text{air}})$$

$$P_{\text{bassin}} = 10 \times (540,4 + 63,3 + 63,2 + 30,12 + 116) \times (30 - 27)$$

$$P_{\text{bassin}} = 10 \times (813) \times (30 - 27)$$

$$P_{\text{bassin}} = 24,39 \text{ kW}$$

Charges liées aux échanges hydriques des bassins avec l'ambiance :

Les bassins évaporent une quantité d'eau qui est variable en fonction de la fréquentation.

Le gradient de pression de vapeur à l'interface air/eau de la piscine se calcul à partir des pressions de vapeur :

$$P_{v_{\text{sat}}} = \frac{100}{100} \cdot 10 \frac{7,428 \times 30}{241+30} + 2,7817 = 4283,5 \text{ Pa}$$

$$P_{v_{\text{air}}} = \frac{70}{100} \cdot 10 \frac{7,428 \times 27}{241+27} + 2,7817 = 2517,6 \text{ Pa}$$

Dans le cas d'une occupation maximale, et moyennant l'hypothèse que 80 % des occupants sont dans l'eau, on a :

$$q_m = 2,78 \cdot 10^{-8} \times 360 + \left(1 + 8,4 \times \frac{360 \times 0,8}{813}\right) \times 2,78 \cdot 10^{-8} \times (4283,5 - 2517,6) \times 813$$

$$q_m = 0,1687 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Dans le cas d'une occupation nulle on a :

$$q_m = 2,78 \cdot 10^{-8} \times (4283,5 - 2517,6) \times 813$$

$$q_m = 0,0399 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Les apports enthalpiques liés à ces échanges hydriques sont donc :

$$P_{\text{evap}} = 2500 \cdot 10^3 \cdot q_m \#$$

Soit en période d'occupation :

$$P_{\text{evap}} = 2500 \times 0,1687 = 421,75 \text{ kW} \#$$

Soit en période d'inoccupation :

$$P_{\text{evap}} = 2500 \times 0,0399 = 99,75 \text{ kW} \#$$

Bilan des charges :

Cas	Hiver		Mi Saison	
	Charges enthalpiques H0 kW	Charges hydriques W0 kg/s	Charges enthalpiques H0 kW	Charges hydriques W0 kg/s
100 % Occupation	364,8	0,1698	444,2	0,1698
0 % Occupation	31,9	0,0399	111,4	0,0399

Dans cette question il s'agissait de réaliser des bilans enthalpiques et hydriques afin de déterminer les charges imposées au hall bassin. Près de 50 % des candidats abordent cette partie, et seul 30 % des candidats parviennent à traiter cette question de manière assez satisfaisante.

Sur les documents réponse, tracer les évolutions de l'air aux seins du système de traitement de l'air pour les situations proposées. Justifier vos démarches et présenter les coordonnées des points représentatifs sous formes de tableaux synthétiques.

Hiver 100% d'occupation :

En situation hivernale à 100 % d'occupation, les besoins en déshumidification peuvent être couverts par le potentiel desséchant de l'air neuf. Il s'agira de faire en sorte d'augmenter le débit d'air neuf au-delà des besoins du CCTP afin de déshumidifier davantage et de ne pas mettre en marche la déshumidification thermodynamique. Ceci a pour conséquence d'augmenter les besoins en chaleur de la CTA N°1, mais présente l'avantage de ne pas mettre en marche le groupe de production de

froid. Même si ce n'est pas la situation de fonctionnement normale prévue par le CCTP, c'est une situation dimensionnante pour la batterie chaude.

Pour cette situation on a :

Débit de Soufflage HBLD m ³ /h	139 980
Débit de soufflage CTA N°1 HBLD1 m ³ /h	97 986
Débit de soufflage CTA N°2 HBLD1 m ³ /h	41 994

La détermination du point de soufflage se fait comme suit :

- ✓ La droite de soufflage est construite par l'ensemble des points vérifiant :

$$hS - hI = \frac{HO}{WO} \cdot (wS - wI) ;$$

- ✓ Le débit de soufflage est calculé comme suit :

$$q_{mas} = - \frac{hO}{hS - hI}$$

- ✓ L'enthalpie massique du point de soufflage est déterminé par :

$$hS = hI - \frac{HO}{q_{mas}}$$

Moyennant une hypothèse sur le volume spécifique et un calcul itératif on détermine hS :

$$hS = 67,58 - \frac{364,8}{\frac{139\,980}{3600 \times 0,871}} = 59,41 \frac{kJ}{kgas}$$

Il s'agit ensuite de déterminer les caractéristiques des points suivants :

E1 : Sortie récupérateur d'énergie CTA N°1

Au travers de l'échangeur, l'air venant de l'extérieur est réchauffé grâce à la chaleur récupérée sur l'air intérieur.

L'échangeur ayant une efficacité de 80 %, on détermine la température de sortie TE1 par :

$$TE1 = TE + \epsilon \cdot (TI - TE) = -9 + 0,8 \times (27 - (-9)) = 19,8 \text{ °C}$$

S1 : Soufflage CTA N°1

Si l'on fait le choix de traiter l'air intégralement grâce à la CTA N°1 alors l'air soufflé au point S est le mélange entre l'air S1 et l'air Intérieur I. S1 est donc sur la droite de soufflage (IS), il vérifie :

$$q_{mas1} \cdot hS1 + q_{mas2} \cdot hI = q_{mas} \cdot hS$$

Et :

$$q_{mas1} \cdot wS1 + q_{mas2} \cdot wI = q_{mas} \cdot wS$$

Soit :

$$hS1 = \frac{q_{mas} \cdot hS - q_{mas2} \cdot hI}{q_{mas1}} = \frac{139\,980 \times 59,41 - 41\,994 \times 67,58}{97\,986} = 55,9 \frac{kJ}{kgas}$$

$$wS1 = \frac{q_{mas} \cdot wS - q_{mas2} \cdot wI}{q_{mas1}}$$

$$wS1 = \frac{139\,980 \times 0,01194 - 41\,994 \times 0,01585}{97\,986} = 0,01028 \frac{kg'eau}{kgas}$$

M1 : Mélange Air Neuf Air Repris CTA N°1

Le point M1 est, pour sa part, sur la droite (E1I) et a pour humidité spécifique wM1 = wS1

On en déduit alors le débit d'air neuf à mettre en œuvre :

$$q_{man} \cdot wE1 + (q_{mas1} - q_{man}) \cdot wI = q_{mas1} \cdot wM1$$

$$q_{man} = q_{mas1} \cdot \frac{(wM1 - wI)}{(wE1 - wI)}$$

$$q_{man} = \frac{97986}{3600 \times 0,871} \times \frac{(0,01028 - 0,01585)}{(0,00158 - 0,01585)} = 12,2 \frac{kg}{s}$$

Le débit volumique d'air neuf, exprimé aux conditions de température du point E1, est donc :
 $Q_{van} = 36\,547 \text{ m}^3/\text{h}$

Le bilan des caractéristiques des points est donné dans le tableau ci-dessous :

Repère	T	H	W	h	v'
	°C	%	kg/kgas	kJ/kgas	m ³ /kgas
Ext	-9,0	90,0	0,00158	- 5,13	0,750
I	27,0	70,0	0,01585	67,58	0,871
S	28,7	48,0	0,01195	59,41	0,871
E1	19,80	11,0	0,00158	23,92	0,832
M1	24,2	54,0	0,01028	50,54	0,856
S1	29,5	39,6	0,01028	55,91	0,871

Mi saison 100% d'occupation.

En situation mi saison à 100 % d'occupation, les besoins en déshumidification sont aussi forts et le potentiel de déshumidification lié aux apports en air neuf sont réduits.

La détermination du point de soufflage se fait comme suit :

La droite de soufflage est construite par l'ensemble des points vérifiant :

$$h_S - h_I = \frac{H_0}{W_0} \cdot (w_S - w_I) ;$$

Avec : $H_0/w_0 = 444,2/0,0399 = 11132,83 \text{ KJ/kg}$

Moyennant une hypothèse sur le volume spécifique et un calcul itératif, on détermine h_S :

$$h_S = h_I - \frac{H_0}{Q_v \cdot v' \cdot S}$$

$$h_S = 67,58 - \frac{444,2}{\frac{139\,980}{3600 \times 0,866}} = 57,69 \frac{kJ}{kgas}$$

On détermine également wS :

$$wS = wI - \frac{W/D}{Qv \cdot v'S}$$

$$wS = 0,01585 - \frac{0,0339}{\frac{139\,980}{3600 \times 0,866}} = 0,01197 \frac{\text{kg eau}}{\text{kgas}}$$

Dans cette situation, la CTA N°1 doit fonctionner avec le maximum de débit d'air neuf afin de participer, autant qu'elle le peut, à la lutte contre la charge hydrique.

On considérera alors, que l'on fonctionne en tout air neuf.

Les points E1 et S1 ont donc une humidité spécifique égale à celle de l'air extérieur, soit :

$$wE1 = wS1 = 0,01867 \frac{\text{kg eau}}{\text{kgas}}$$

La CTA N°1 permettra en outre de chauffer l'air afin d'atteindre, par mélange avec l'air produit par la CTA N°2, la température ambiante souhaitée.

La CTA N°2 doit assurer le complément de déshumidification afin d'atteindre les objectifs du CCTP.

En considérant que le volume spécifique des points de soufflage de chacune de ces centrales sont

respectivement de : $v'S_1 = 0,88 \frac{\text{m}^3}{\text{kgas}}$ et $v'S_2 = 0,84 \frac{\text{m}^3}{\text{kgas}}$

On en déduit l'humidité spécifique du point de soufflage de la CTA N°2 :

$$wS_2 = \frac{wS_{E1} \cdot (qmas_1 + qmas_2) - wS_1 \cdot qmas_1}{qmas_2} = \frac{wS_{E1} \cdot \left(\frac{Qvas_1}{v'S_1} + \frac{Qvas_2}{v'S_2} \right) - wS_1 \cdot \frac{Qvas_1}{v'S_1}}{\frac{Qvas_2}{v'S_2}}$$

$$wS_2 = \frac{0,01197 \times \left(\frac{97986}{0},88 + \frac{41994}{0},84 \right) - 0,01867 \times \frac{97986}{0},88}{\frac{41994}{0},84}$$

$$wS_2 < 0$$

On observe ici qu'il n'est pas possible physiquement d'atteindre les objectifs du CCTP, sans modifier la proportion d'air préparé par la centrale CTA N°2 qui doit être plus importante afin d'assurer la déshumidification.

Une étude des évolutions en faisant fonctionner la CTA N°2 dans les conditions nominales proposées par le CCTP, montre que la conséquence sera une dérive du point intérieur vers des humidités spécifiques plus fortes et donc vers des humidités relatives plus fortes.

Graphiquement, on détermine le nouveau point intérieur « I' » dont les coordonnées sont proches de :

$$T_{I'} = 27^\circ\text{C}$$

$$w_{I'} = 0,0165 \text{ kg/kgas}$$

$$H_{I'} = 75 \%$$

Les caractéristiques des points sont donc rassemblées dans le tableau ci-dessous :

Repère	T	H	w	h	v'
	°C	%	kg/kgas	kJ/kgas	m ³ /kgas
Ext	22,0	90,0	0,0187	69,58	0,861
I	27,0	70,0	0,01585	67,58	0,871
I'	27	75	0,01701	70,55	0,873
S'	27,0	56,4	0,01271	59,57	0,867
S	27,0	53,2	0,01197	57,69	0,866
E1	26,00	70,0	0,01492	64,17	0,867
PFTP	9,5	100,0	0,00741	28,23	0,810
I2	10,3	98,0	0,00767	29,69	0,812
I1	13,5	95,0	0,00921	36,85	0,824
S2	23,5	42,0	0,00767	43,02	0,850
S1	28,7	60,0	0,01492	67,14	0,875

Dans cette question il s'agissait, à partir des charges calculées précédemment, de déterminer successivement les conditions de soufflage, les évolutions élémentaires sur chacun des composants des centrales de traitement d'air. Cette partie mobilisait des connaissances précises en traitement d'air et obligeait le candidat à émettre des hypothèses et/ou à simplifier la modélisation du fonctionnement des centrales. Le Jury attendait donc que le candidat exprime clairement ses hypothèses, la justification de ses démarches, les résultats obtenus. 40 % des candidats ont abordé cette partie, mais seul 15 % sont capables d'élaborer une démarche de conception cohérente et aboutissent à des résultats. Il est trop souvent constaté que des pages de calculs se suivent, mais que la méthodologie observée par le candidat ne ressort pas clairement, ce qui est regrettable.

DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE
 PRESSION ATMOSPHERIQUE : 101325 [Pa] ALTITUDE : 0 [m]

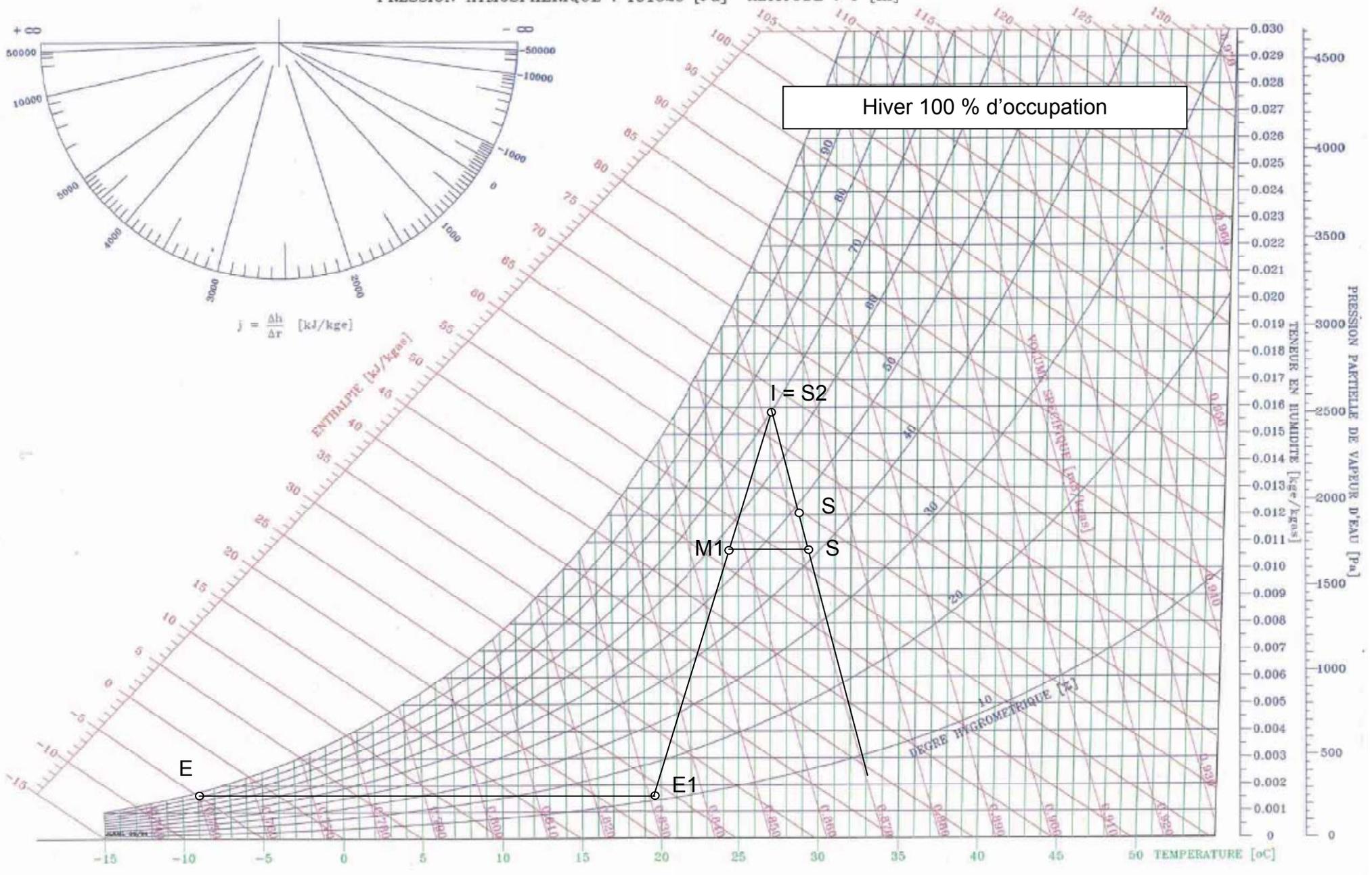
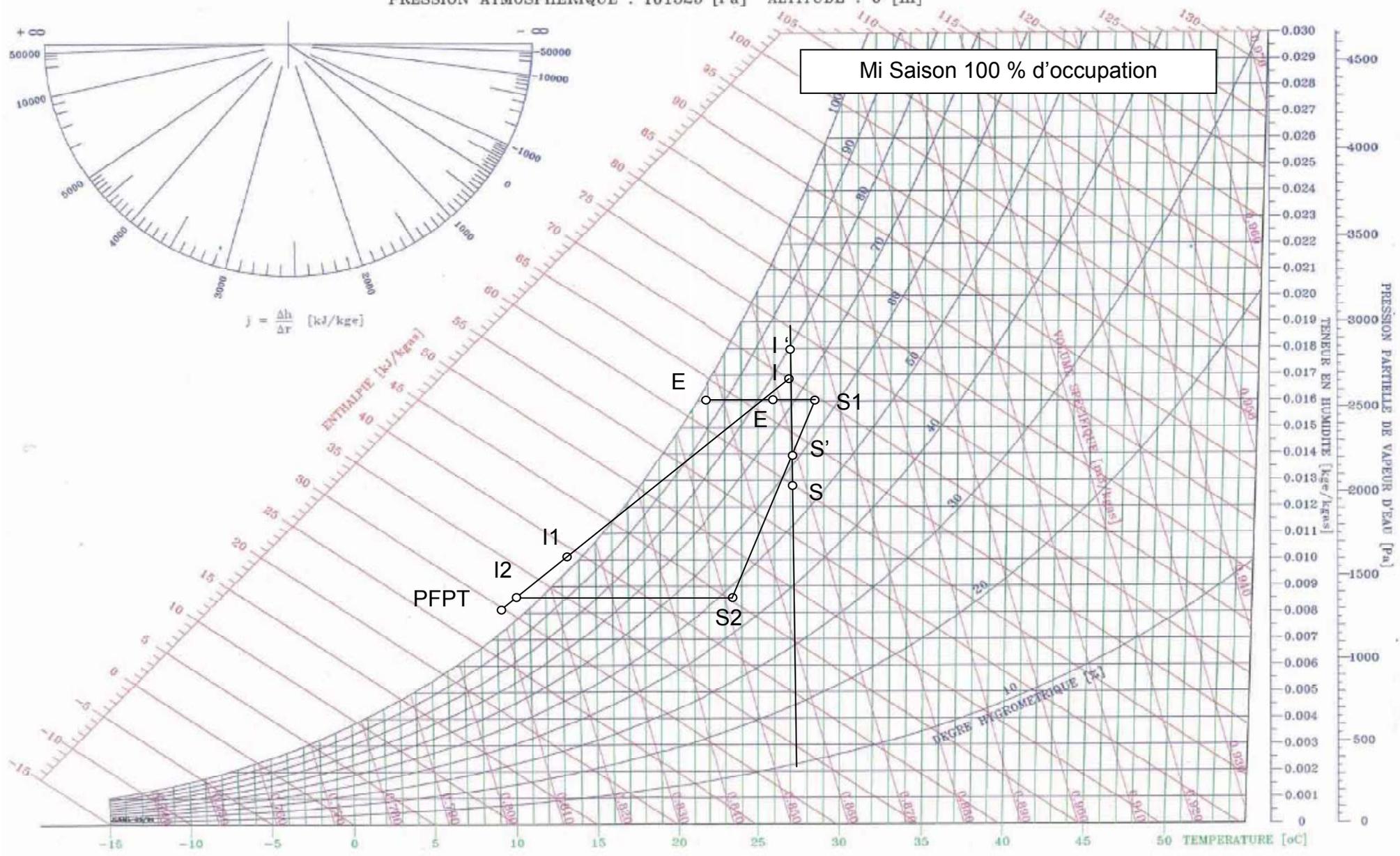


DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

PRESSION ATMOSPHERIQUE : 101325 [Pa] ALTITUDE : 0 [m]



Déterminer les puissances nominales des batteries chaudes et froides des CTA pour les cas étudiés.

La puissance des batteries est déterminée comme suit :

$$P = q_{mas} \cdot \Delta h$$

Soit pour les situations étudiées :

Cas	100 % Occupation	
	Puissance Batterie Chaude [kW]	Puissance Batteries Froide [kW]
Hiver	167	0
Mi saison	93	104

La puissance nominale de la batterie froide est déterminée en considérant que la température du point PTFE est de 9,5 °C. Dans ce cas la température du point I2 est calculée comme précédemment :

$$T_{I2} = 10,3 \text{ °C}$$

On en déduit donc la température du point I1 :

$$T_{I1} = 13,66 \text{ °C}$$

La différence d'enthalpie massique est donc : $\Delta H = 13,5 \text{ kJ/kgas}$

La puissance nominale de cette batterie sera donc : $P = 104 \text{ kW}$

Cette question, basée sur les résultats de la précédente, avait pour but de déterminer les puissances des batteries, afin de les comparer aux éléments fournis par le CCTP. Très peu des candidats ont traité cette question.

2.3 Logiques de fonctionnement.

Explicitez les logiques de fonctionnement des centrales de traitement d'air.

La CTA N°1 gère deux paramètres principaux :

- ✓ Le maintien de la température d'air ambiante à 27 °C.

Ce maintien de la température ambiante est réalisé en hiver grâce à la batterie chaude qui est alimentée via une vanne trois voies faisant varier le débit d'Eau Chaude Basse Température la traversant.

- ✓ La qualité de l'air et l'humidité au travers du renouvellement en air neuf.

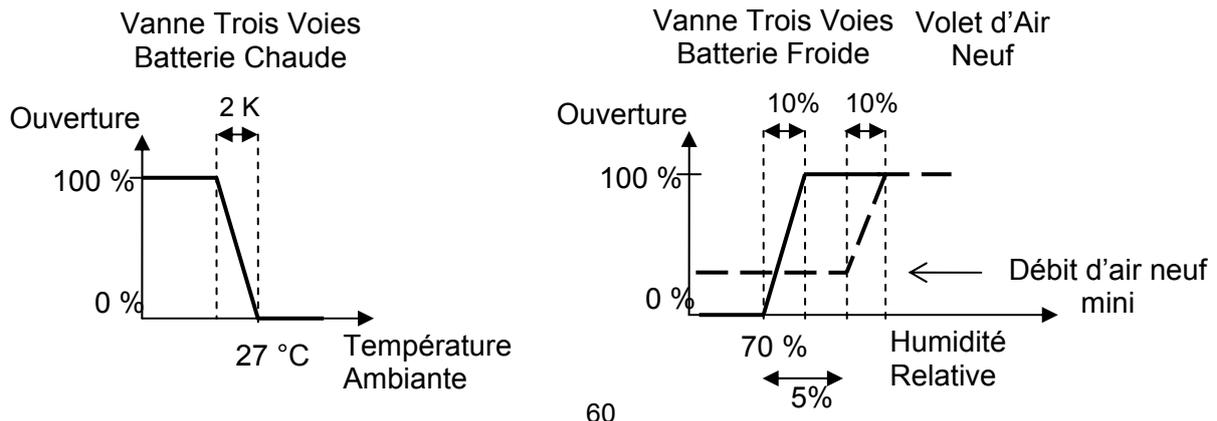
Le débit d'air neuf est contrôlé grâce aux registres motorisés. Le débit d'air neuf notamment en hiver permet de limiter l'usage de la déshumidification car il est sec. Il y aura donc un double pilotage de ce volet : le débit d'air neuf devra être en permanence égal au débit d'air neuf mini réglementaire. Néanmoins, il pourra, pour combattre les apports en humidité, être augmenté afin de profiter du pouvoir asséchant qu'il peut apporter.

La CTA N°2 gère un seul paramètre :

- ✓ Le maintien de l'humidité relative à 70%.

Pour cela une batterie froide alimentée avec de l'Eau Glacée à 7°C est utilisée. La variation de la puissance de cette batterie se fera en fonction du paramètre humidité relative de l'air ambiant, grâce à une vanne trois voies qui fera varier le débit d'alimentation en Eau Glacée de cette batterie.

Les graphs de régulation suivants synthétisent la logique de fonctionnement décrite ci-dessus :



Cette question avait pour objectif de vérifier que les candidats étaient capables d'exprimer la logique de fonctionnement d'installations techniques du bâtiment. Cette question ne nécessitait aucun calcul et pouvait se traiter à la suite de la question 212. Seul 15 % des candidats l'ont abordé et y ont répondu de manière très partielle.

2.4 Conclusion.

Conclure quant à la validité de la solution technique proposée. Justifier de manière argumentée.

La solution proposée semble pouvoir répondre, d'un point de vue fonctionnel, aux besoins. Elle permet en effet d'assurer une gestion indépendante de l'humidité relative et de la température de l'ambiance.

Nous observons cependant que la répartition des débits proposés sur les deux CTA ne permet pas d'atteindre les objectifs pour l'air ambiant en situation mi saison, les charges hydriques étant particulièrement importantes. Il faudrait, dans ce cas, augmenter le débit de la CTA N°2 ce qui aurait pour conséquence d'augmenter la puissance de la batterie froide.

Les valeurs proposées dans le CCTP, pour les puissances de batterie froide, sont plus élevées que celles déterminées dans cette étude. Un surdimensionnement peut se comprendre, mais ici il y a un facteur 2 qui remet en cause ces données de base.

En outre, les besoins en déshumidification s'élèvent à 611 kg/h, selon le CCTP le système déshumidification doit absorber un débit de 0,0399 kg/s majoré de 10 %, soit : 158 kg/h.

L'apport en air neuf doit donc absorber la différence, soit : 453 kg/h. Cela signifie, sachant que le débit d'air neuf est de 97 986 m³/h, l'air extérieur doit avoir une humidité spécifique inférieure à celle de l'air intérieur de l'ordre de : 5 g/kgas.

Par conséquent, pour des airs extérieurs ayant une humidité spécifique supérieure à 0,011 g/kgas, il y a des risques d'une augmentation de l'humidité relative intérieure au-delà de 70 %.

Ceci implique donc que, pour les conditions extérieures en question, les risques de condensation sur les parois froides peuvent devenir importants.

Néanmoins, si la température extérieure est supérieure à 26 °C, une solution consistera à ouvrir les bassins sur l'extérieur.

Il reste donc à observer la fréquence des autres cas, afin de valider la mise en place d'une puissance de déshumidification supplémentaire associée à une augmentation du débit de la CTA N°2.

Cette question faisait la synthèse de la partie. Il s'agissait de valider ou invalider de manière argumentée, la faisabilité technique de la solution proposée par le CCTP, tant du point de vue du principe que de ses dimensions. A peine 10 % des candidats ont abordé cette partie.

Partie B3- Etude des réalisations

Voile courbe - généralités

Fonctions du voile.

Séparation, mécanique, support d'équipements (sièges, jets ...), esthétique ...

Afin de faciliter sa réalisation, indiquer à quel moment il est préférable de bétonner le voile.

Il est nécessaire de prendre en compte la non planéité du support (fond de bassin), le poids des coffrages disponibles (transport à la grue), la courbure de l'élément coffré ...

85% des candidats ont abordé ces questions, mais les réflexions menées sont très largement incomplètes.

Solutions techniques possible.

Selon la qualité de parement définie dans le CCTP, le matériel disponible, le coût ..., on peut proposer les voiles courbes bétonnés en place dans des coffrages outils ou sur mesure, la réalisation de facettes qui seront enduites, la mise en place d'éléments préfabriqués ...

Calepinage de voiles courbes

Matériel à privilégier.

Le bassin est composé de multiples voiles courbes de rayons très variés. Aucun matériel ne convient à la variété de ces rayons. Par conséquent, en tenant compte du critère de hauteur et de rayon, nous privilégierons le coffrage Noé R110 pour le voile étudié.

Plan de calepinage.

Le plan de calepinage doit présenter les panneaux, éléments de stabilité, de sécurité, les abouts, les équipements (tiges, brides ...) ...

Cale de compensation.

Les cales de compensation à placer entre chaque panneau afin d'aligner les tiges de serrage seront de 3,7 cm environ.

Ces dernières questions ont été peu abordées.

Partie B4- Etude d'une structure porteuse Eléments de correction,

4.1 Généralités, modélisation de la structure

Cette étape, indispensable au calcul à proprement parler, permet de tester les connaissances des candidats sur la partie réglementaire. Les Eurocodes structurels constituent le corpus normatif de référence. Il est rappelé que « les calculs de béton armé » ne sont pas menés avec les seuls outils, même évolués, de la mécanique des structures mais avec le texte de référence qu'est la NF EN 1992 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton.

L'étude proposée est classique, celle d'une poutre continue hyperstatique, en particulier d'une travée courante. La problématique est « pratique » sur un cas courant, s'assurer que les candidats connaissent les principes calculatoires élémentaires d'une travée en béton armé complètement définie.

Durabilité et enrobage

Section 4 de « l'Eurocode 2 ».

Il est rappelé que la valeur de l'enrobage est définie dans l'article 4.4.1.1 alinéa 1(P), et qu'elle n'est pas choisie arbitrairement. Sa valeur peut être variable d'une zone à l'autre du même ouvrage.

La classe d'exposition (Tableau 4.1) définie en fonction des conditions d'environnement ouvre le calcul de vérification de l'enrobage, désigné par C_{nom} . L'article 4.4 donne la démarche procédurale complète.

Les valeurs retenues par les candidats sont généralement correctes. Il a été tenu compte des variabilités d'hypothèses possibles pour évaluer la suite des calculs. Hypothèses retenues : XD2,

$\Delta c_{dev} = 5 \text{ mm}$, $C_{min} = 35 \text{ mm}$

Caractéristiques géométriques de la section de calcul et de la travée d'étude P13-P14

C'est la section 5 de « l'Eurocode 2 » qui définit précisément les grandeurs de calcul avec leurs désignations réglementaires. Il convenait d'utiliser les informations issues du « plan de coffrage » fourni, pour transposer dans le règlement les grandeurs de calculs utiles.

Pour cette partie de l'étude, peu de candidats ont su organiser les calculs avec rigueur. Les grandeurs attendues sont : b_w , b_{eff} , h , h_{eff} , I_n , I_{eff} , ainsi que les schémas proportionnés associés.

4.2 Actions de calcul, sollicitations de calcul.

Valeurs de calcul des sollicitations agissantes à l'ELU :

Quelques candidats ont essayé de re-calculer les sollicitations agissantes de flexion et d'effort tranchant sur la travée hyperstatique. Toutes ces valeurs étaient données, sur le document réponse DR6, il s'agissait simplement d'identifier et de placer sur les axes des graphes les valeurs intéressantes pour les calculs suivants. Toute hypothèse et/ou simplification proposée a été prise en compte pour l'évaluation. Il fallait distinguer les nus d'appuis au droit desquels les valeurs sont lues.

En zone de moment de flexion positif : $M_{Ed,max} = 145 \text{ kN.m}$ environ

En zone de moment de flexion négatif coté P13 : $M_{Ed,max} = -145 \text{ kN.m}$ environ.

En zone de moment de flexion négatif coté P14 : $M_{Ed,max} = -120 \text{ kN.m}$ environ.

Enveloppe des sollicitations agissantes.

De toute évidence, la notion de courbe enveloppe n'est pas acquise (article de référence 9.2.1.3 de l'Eurocode 2). En outre le tracé de l'enveloppe décalée doit être mené rigoureusement pour obtenir une valeur « exacte ». La valeur de décalage est fixée par l'article 9.2.1.3 alinéa 2, les simplifications d'usage sont acceptées. La valeur de décalage possible est 220 mm si on considère $Z = 440 \text{ mm}$, le décalage est horizontal sur les zones d'études.

Sollicitations d'effort tranchant

La mise en forme du diagramme enveloppe en valeur absolue permet de « gagner de la place » sur la représentation graphique. Cette mise en forme « simplifie » en outre le tracé des efforts tranchants résistants pour construire la répartition des armatures transversales.

Il convenait dans un premier temps de repérer les nus d'appuis en abscisse. Un « écrêtage » était possible, conformément à l'article de référence 6.2.1 (8) de l'Eurocode 2, puisque les actions sont uniformément réparties. L'évaluation des rendus prend en compte cette possibilité lorsqu'elle est proposée par les candidats.

Les valeurs absolues des valeurs de calcul de l'effort tranchant agissant retenues à une distance d (où d est la hauteur utile de flexion) des nus d'appuis sont :

$$V_{Ed,max} = 235 \text{ kN côté P13}$$

$$V_{Ed,max} = 220 \text{ kN côté P14}$$

4.3 Détermination des armatures de flexion sur la travée P13-P14

Armatures de flexion en zone de moments positifs.

L'objectif de cette épreuve n'est pas d'évaluer les candidats sur des compétences professionnelles pures. Il s'agit d'évaluer la pertinence d'hypothèses choisies en les justifiant et l'approche du choix constructif. Les plans d'exécution dits « bons pour exé », nécessiteraient une étude approfondie et transversale.

En considérant les hypothèses suivantes : $C_{nom} = 40 \text{ mm}$, $b_w = 800 \text{ mm}$, $M_{Ed,max} = 145 \text{ kN.m}$, $b_{eff} = 1,78 \text{ m}$ avec $b_{eff,1} = b_{eff,2} = 490 \text{ mm}$, $b_w = 800 \text{ mm}$, $d = 440 \text{ mm}$, $h_f = 250 \text{ mm}$ les résultats des calculs sont :

- Moment réduit = 0,021 cette valeur indique une « bonne » utilisation du matériau acier, le plus cher. La figure 6.1 de l'article 6.1 de la section 6 permet d'identifier la zone des déformations relatives admissibles concernée.
- $\alpha = 2,65 \%$
- $Y = 12 \text{ mm}$
- $Z = 436 \text{ mm}$
- $A_{sI} = 7,6 \text{ cm}^2$ environ
- $A_{s min} = 4,71 \text{ cm}^2$

L'évaluation a pris en compte des hypothèses différentes mais cependant justifiées des candidats, Choix constructif possible en prédimensionnement : 5 HA10 + 5 HA 10 = 7,8 cm².

Si on fait l'hypothèse que 5 aciers HA 10 sont prolongés sur appuis, le deuxième lit de 5 HA 10 peut être arrêté avant les appuis. Il convient alors de tracer l'épure d'arrêt des barres. Il conviendrait aussi de mener les vérifications et justifications nécessaires, conformes aux sections 6, 8 et 9 de l'Eurocode en phase exécution. Ce n'est pas demandé dans le cadre de cette épreuve.

Le moment de flexion résistant en travée pour les deux lits vaut environ 148 kN.m.

Le moment résistant du seul lit prolongé sur appuis vaut environ 75 kN.m.

L'épure d'arrêt est tracée sur la courbe enveloppe décalée. La longueur de coupe du deuxième lit en travée est 2,20 m environ.

Armatures de flexion en zone de moments négatifs

Hypothèses : $b_w = b_{eff} = 800 \text{ mm}$, $M_{Ed,max} = 145 \text{ kN.m}$ côté P13

- Moment réduit = 0,047 - cette valeur indique une « bonne » utilisation du matériau acier, le plus cher. La figure 6.1 de l'article 6.1 de la section 6 permet d'identifier la zone des déformations relatives admissibles concernée.
- $\alpha = 6 \%$
- $Y = 26 \text{ mm}$
- $Z = 430 \text{ mm}$
- $A_{sI} = 7,8 \text{ cm}^2$ environ
- $A_{s min} = 5,3 \text{ cm}^2$

Choix constructif possible en prédimensionnement : 5 HA 10 + 5 HA 10 = 7,8 cm². Un autre choix possible, conforme celui-là, est 4 HA 14 en lit supérieur sur appuis + 2 HA 14 en lit inférieur des armatures tendues en appuis soit 9,2 cm² pénalisant.

D'autres solutions constructives possibles consistent à choisir des diamètres supérieurs pour augmenter le diamètre moyen, et dans certains sous détails de prix d'influer sur les temps unitaires. L'arrêt des barres est concerné par ces choix implicitement avec l'article 8.4 de l'Eurocode 2, que ce soit en travée ou en appuis. En effet les longueurs d'ancrage tiennent compte des conditions d'adhérence, donc des procédés constructifs : préfabrication de la retombée en usine ou un ensemble coulé en place. Les bonnes ou mauvaises conditions d'adhérence dépendent de ces hypothèses.

Le moment résistant total sur appui P13 vaut 148 kN.m.

La longueur de coupe des aciers supérieurs dits de chapeau, d'une manière générale, prend en compte la largeur réelle d'appui et l'épure d'arrêt sur la travée adjacente si elle existe.

Détermination des armatures d'effort tranchant sur la travée P3-P14

C'est dans la section 6 de l'Eurocode 2 que les éléments de vérification sont présentés – en particulier en 6.2.

Hypothèses retenues : $V_{Ed,0} = 354$ kN $V_{Ed,d} = 315$ kN (Eurocode 2 article 6.2.1 (8))

$V_{Rd,c} = 146$ kN avec $C_{Rd,c} = 0,12$, $V_{Rd,max} = 1858$ kN

Ratio $A_{sw}/S = 1,83$ mm, issu de la relation (6.15)... de l'Eurocode 2 article 6.2.3.

Avec un choix constructif de 6 brins HA10, l'espacement maxi vaut 257 mm.

Si on choisit un espacement égal à 250 mm alors $V_{Rd,(S=250mm)} = 324$ kN, valeur supérieure à la valeur maxi retenue. L'espacement maximal étant de 330 mm, une première solution, non optimisée mais sécuritaire, consiste à disposer cette section (6 brins HA10 = 4,71 cm²) avec un espacement constant de 250 mm. Les espacements au voisinage des nus d'appuis étant réduits, du fait même de l'utilisation du modèle de treillis.

Les dispositions constructives courantes peuvent simplifier la mise en œuvre, par exemple l'adoption du système constructif de la figure 9.1 et/ou 9.5 de l'Eurocode 2.

Schéma de ferrailage de principe

La représentation de la retombée préfabriquée de la poutre peut être faite en trait fin. Les reprises de bétonnage sont mentionnées sur les élévations et les coupes transversales.

Des armatures de peau peuvent être mises en place pour le cas de poutres de grande hauteur et comportant des armatures de gros diamètres (voir annexe J.1 de l'Eurocode 2).

Des réservations peuvent être faites dans la retombée elle-même pour placer ensuite les gardes corps alors que la pièce est en cours de déchargement. D'autres réservations peuvent être mises en œuvre à la préfabrication pour les réseaux du second œuvre.

Un becquet de rive peut être réalisé dans le cas d'une poutre de rive. Les crochets de levage ou douilles de levage sont représentés et leur emplacement coté.

Les armatures dites de chapeau sont en général livrées avec la retombée de poutre sur laquelle elles seront mises en œuvre. Les armatures déterminées sur l'épure d'arrêt sont cotées sur le schéma de ferrailage pour faciliter le travail des personnels de chantier.

Précisions indispensable de l'enrobage C_{nom} , du ou des types de béton...

Rapport du jury de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation

1. Présentation du sujet

Le sujet proposé cette année était composé de 4 grandes parties amenant les candidats à s'exprimer sur des domaines de compétence variés et complémentaires de la spécialité Ingénierie des Constructions :

- dimensionnement de réseaux, étude de prix ;
- conception et dimensionnement d'un système de climatisation ;
- étude de réalisation ;
- conception et dimensionnement de structures en béton armé.

2. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

Le jury souhaite rappeler que dans le cadre de cette épreuve, il attend des candidats une démarche de projet. C'est-à-dire que les candidats doivent prendre le temps de s'imprégner des différentes contraintes du dossier (CCTP, contexte réglementaires, contraintes architecturales, règles de calcul...) avant de proposer : des solutions, des démarches de conception, des choix ...

Les candidats sont évalués sur les solutions qu'ils proposent, les démarches qu'ils adoptent et sur leurs capacités à argumenter et justifier leurs choix.

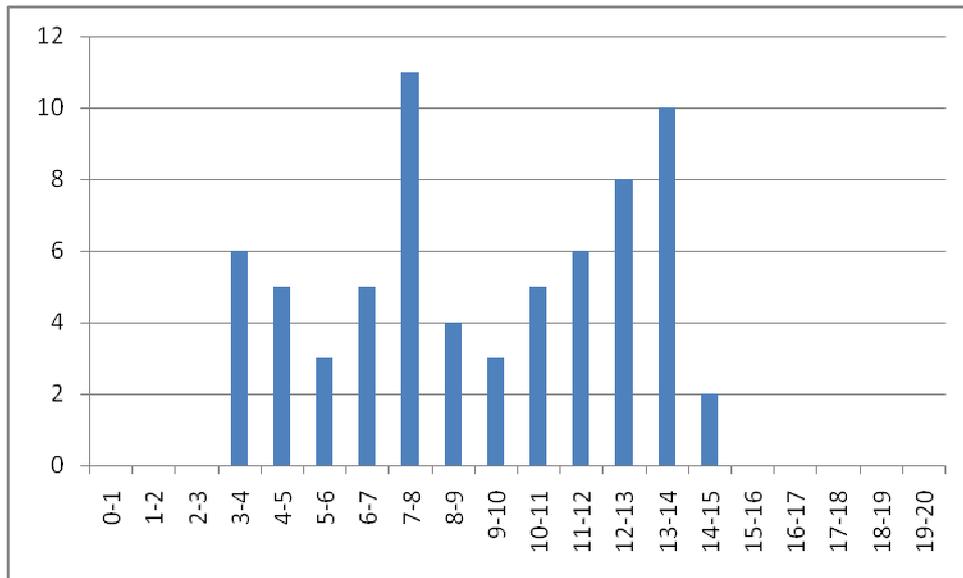
Le jury constate que les candidats sont en général assez marqués par les anciennes spécialités Structure Ouvrage et Equipement Technique Energie de l'ancienne agrégation. Ceci se traduit par le traitement totalement dissymétrique des parties de sujet, volontairement axées sur l'une de ces spécialités. Le jury invite donc les candidats à élargir leurs champs de compétence pour les années à venir, afin de faire la différence sur cette épreuve.

3. Résultats

68 candidats ont composé pour cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 9,1/20 et l'écart-type 3,4/20 avec :

- 14,9 comme meilleure note ;
- 3,2 comme note la plus basse.

Il apparaît clairement deux groupes de candidats. Pour le groupe ayant obtenu les résultats les plus faibles, le jury observe un manque flagrant de préparation à cette épreuve.



Rapport du jury de l'épreuve d'exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnique

1. Présentation de l'épreuve

L'épreuve « exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnique » permet au jury d'évaluer l'aptitude des candidats à :

- mettre en œuvre et conduire une expérimentation, une analyse de comportement d'un système réel ou d'un équipement, notamment à l'aide de systèmes informatiques associés à des logiciels de traitement, de simulation, de représentation ;
- analyser et vérifier ou comparer les performances de tout ou partie de ce système pluritechnique, notamment à partir de modèles de comportement et de mesures ;
- justifier ou critiquer les solutions constructives retenues et les choix relatifs à la réalisation (hypotheses, comparaison multicritère des choix techniques et des organisations, évaluations économiques, etc.) en regard du cahier des charges ;
- exploiter les résultats obtenus et formuler des conclusions ;
- concevoir et organiser le plan d'une séquence de formation pour un objectif pédagogique imposé à un niveau de classe donné. Elle prend appui sur les investigations et les analyses effectuées au préalable par le candidat au cours des activités pratiques.

L'exploitation pédagogique proposée, directement liée aux activités pratiques réalisées, est relative aux enseignements de technologie du collège ou aux enseignements technologiques transversaux du cycle terminal « sciences et technologies de l'industrie et du développement durable (STI2D) » et/ou sciences de l'ingénieur de la voie scientifique (SSI) du lycée et des classes préparatoires aux grandes écoles.

Déroulement de l'épreuve

Cette épreuve, de coefficient 2, dure 6 heures et comporte trois phases :

- phase 1 - mise en œuvre des équipements du laboratoire (durée 4 h) ;
- phase 2 - préparation dans la salle de mise en loge (durée 1 h) ;
- phase 3 - présentation des travaux devant un jury (durée 1 h).

L'utilisation d'une calculatrice est autorisée (conformément à la circulaire n°99-186). Durant toute cette épreuve les candidats ont accès à Internet.

La phase 1 – Manipulation expérimentale au laboratoire. Cette première phase d'une durée totale de 4 h se déroule en trois parties.

Cette phase 1 se déroule dans le laboratoire où sont mis à disposition des candidats les différents supports étudiés. Ceux-ci permettent au candidat de proposer une séquence pédagogique.

L'exploitation pédagogique proposée est liée aux activités pratiques réalisées.

Première partie (durée ≈ 0h30)

Pour cette partie, les manipulations ainsi que les activités proposées ont pour objectif de faciliter la compréhension du fonctionnement global du système. À la fin de cette première partie, l'examineur

s'assure que le candidat s'est bien approprié le support des activités pratiques ainsi que la problématique proposée.

Deuxième partie (durée ≈ 2h00)

Pour cette partie, après la présentation du système à l'examineur, le candidat doit répondre au questionnement proposé afin de répondre aux problématiques proposées. Cette partie permet au candidat, par la mobilisation de compétences caractéristiques du niveau de l'agrégation, de résoudre les problèmes posés puis d'en exploiter les résultats obtenus (hypothèses, modèles, valeurs numériques, ...).

Troisième partie (durée ≈ 1h30)

Pour cette partie, le candidat doit préparer la trame détaillée de sa séquence de formation, en s'aidant des manipulations nécessaires, en précisant et en validant un ou plusieurs protocoles de mesure permettant de répondre à la problématique.

La phase 1 se déroule dans le laboratoire dans lequel figurent des supports¹. Ceux-ci permettent de proposer des séquences pédagogiques. L'exploitation pédagogique proposée est liée aux activités pratiques réalisées.

Les candidats disposent de l'ensemble des moyens nécessaires à l'expérimentation et d'un poste informatique doté des logiciels courants de bureautique et des logiciels plus spécifiques liés au sujet qui leur est proposé.

La phase 2 se déroule dans la phase de mise en loge (durée 1 h).

Le candidat prépare, dans une salle, l'intervention qu'il effectuera devant le jury. Durant cette phase de préparation de l'exposé en salle, le candidat **n'a plus accès aux matériels, bancs et simulations**. Il dispose d'un poste informatique relié à Internet et doté des logiciels courants de bureautique. Il dispose des résultats obtenus lors de la phase 1 qu'il aura stockés dans un espace qui lui est dédié.

La phase 3 se déroule dans la salle d'exposé devant le jury.

L'exposé oral, d'une durée maximale de 40 minutes, comporte :

- la présentation du système (durée maximale 5 minutes) ;
- le compte-rendu des manipulations effectuées et l'analyse des résultats obtenus dans la deuxième partie de la première phase des activités pratiques (durée maximale 15 minutes) ;
- l'exploitation pédagogique (durée maximale 20 minutes).

L'entretien avec le jury est d'une durée maximale de 20 minutes.

Le candidat est amené au cours de sa présentation orale à expliciter sa démarche méthodologique, à mettre en évidence les informations, données et résultats issus des investigations conduites au cours des activités pratiques qui lui ont permis de construire sa séquence de formation, à décrire et à situer la séquence de formation qu'il a élaborée.

¹ systèmes réels distants ou non avec éventuellement sous-ensembles et composants industriels ; systèmes réels instrumentés ; systèmes didactisés ; systèmes sous forme de maquette et systèmes simulés.

Au cours de l'entretien, le candidat est interrogé plus particulièrement pour préciser certains points de sa présentation ainsi que pour expliquer et justifier les choix de natures didactique et pédagogique qu'il a opérés dans la construction de la séquence de formation présentée.

Pour la présentation devant le jury, les candidats ont à leur disposition un tableau, un ordinateur et un vidéoprojecteur. Ils disposent d'un poste informatique relié à Internet et doté des logiciels courants de bureautique, et des résultats obtenus lors des phases 1 et 2 qu'ils ont stockés dans l'espace qui leur est dédié.

Supports retenus pour la session 2013:

- banc structure ;
- banc de transmission thermique ;
- barrière de péage ;
- pompe à chaleur ;
- panneau solaire asservi ;
- plaque chauffante ;
- télescope à monture motorisée.

Ces supports ont permis aux candidats de mettre en œuvre leurs compétences à haut niveau scientifique sur les activités suivantes :

- identification des comportements de constituants ou d'un système ;
- mesure de comportement de constituants ou d'un système ;
- détermination des paramètres significatifs d'une chaîne de mesure ;
- détermination des paramètres significatifs d'une chaîne d'énergie ;
- détermination des paramètres significatifs d'une modélisation ;
- recalage d'un modèle ;
- choix des modèles de comportement ou de connaissance ;
- validation de modèles ;
- simulation et prédiction de performances ;
- évaluation des écarts.

2. Analyse des résultats

Le jury observe une grande disparité dans les prestations des candidats.

Sur cette épreuve, trois populations ressortent :

- une partie des candidats est bien préparée à la conduite des expérimentations et à l'exploitation des résultats aux plus hauts niveaux d'expertise, mais n'aborde que partiellement l'exploitation pédagogique des manipulations (représentant pourtant près de 40% du temps alloué en laboratoire) ;
- une autre partie des candidats ne réalise que quelques rares manipulations liées généralement à une connaissance parcellaire des champs scientifiques et techniques à mobiliser. De plus, la qualité de raisonnement et la rigueur ne sont pas au niveau que l'on peut attendre d'un candidat à l'agrégation. L'exploitation pédagogique associée est souvent décevante : par exemple les séquences et séances sont souvent confondues ;
- une dernière partie mobilise à bon escient connaissances et compétences pour répondre à la problématique demandée en positionnant leur future exploitation pédagogique. Seuls ces derniers sont en rapport avec les attendus scientifiques et pédagogiques de candidats admissibles à l'agrégation et ont généralement produit une présentation orale de qualité.

3. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

Sur la compréhension du système

Pour cette partie, les manipulations proposées ainsi que les activités proposées ont pour objectif de faciliter la compréhension du fonctionnement global du système, de s'appropriier le support du travail pratique et de la problématique proposée. Les candidats disposent pour cette phase de compréhension du système d'un dossier technique, et d'un dossier ressource ainsi que diverses ressources numériques. Le système proposé au candidat peut être le système réel ou un système didactisé à partir du système réel.

Pour cette phase, le jury tient à porter à l'attention des candidats les points suivants :

- l'extraction des informations pertinentes dans les ressources mises à disposition constitue un préalable indispensable à l'appropriation du système et de la problématique ;
- la contextualisation des activités et supports proposés, souvent omise, permet de correctement appréhender le fil directeur des activités et manipulations proposées ;
- les analyses externes et internes des systèmes gagnent en pertinence lorsqu'elles sont appuyées sur des outils formalisés.

Sur les travaux pratiques de résolution des problèmes posés et d'exploitation des résultats

Pour cette partie de l'épreuve, le candidat peut être amené à :

- utiliser une instrumentation spécifique dédiée à la mesure de grandeurs physiques sur les systèmes instrumentés ;
- mettre en œuvre différents outils informatiques (logiciels de pilotage et/ou d'acquisition dédiés aux supports, logiciels de simulation, tableurs, traitements de textes, logiciels de calcul ou de visualisation...).

La maîtrise de ces logiciels n'est pas exigée. Une aide d'utilisation est fournie et le jury assiste le candidat en cas de difficultés matérielles ou de mise œuvre des différents outils informatiques.

Lors des travaux pratiques, les candidats doivent mobiliser l'ensemble des connaissances fondamentales des sciences de l'ingénieur de manière transversale.

Lors des manipulations, résolutions des problèmes et exploitations des résultats, le jury constate :

- une lecture et une analyse partielle du sujet proposé ;
- une maîtrise perfectible des outils d'analyse courants ;
- des analyses partielles et réductrices des résultats des expérimentations et des mesures ;
- une exploitation limitée des équipements due à des manipulations approximatives, des analyses superficielles et des interprétations peu rigoureuses des résultats obtenus, résultant d'une pratique insuffisante de la démarche à caractère expérimental ;
- de fortes difficultés à passer du modèle au réel, entraînant l'absence de corrélation entre les phénomènes physiques et les mesures effectuées par les logiciels d'acquisition.

Les candidats ayant réussi les travaux pratiques de résolution des problèmes posés et d'exploitation des résultats se sont attachés à :

- maîtriser la durée consacrée à chaque activité et à structurer l'exposé à partir d'un plan ;
- présenter la démarche de résolution du problème technique posé ;
- présenter et/ou justifier les protocoles et présenter les résultats de façon claire et précise ;
- faire une analyse critique de ces résultats.

Le jury tient à préciser que les supports de travaux pratiques sont principalement issus des laboratoires des filières S option sciences de l'ingénieur, STI2D, STS, CPGE et couvrent l'ensemble des champs disciplinaires transversaux des sciences industrielles de l'ingénieur.

Sur la réalisation d'une activité pédagogique à caractère expérimental

Une problématique pédagogique expérimentale étant proposée, le candidat doit préparer la trame détaillée de la globalité de sa séquence pédagogique dans laquelle il devra décrire plus particulièrement une séance pédagogique à caractère expérimental en s'aidant des manipulations nécessaires et en précisant et validant un ou plusieurs protocoles de mesure permettant de répondre à la problématique.

Le jury constate régulièrement que les candidats :

- ne définissent pas la place de la séquence proposée dans le plan de formation annuel pour le niveau proposé ;
- ne précisent pas de façon argumentée la place de l'exploitation pédagogique dans la séquence ;
- ne connaissent ni les horaires officiels, ni les épreuves du baccalauréat relatives aux classes de STI2D et S option sciences de l'ingénieur ;
- ne dégagent pas et ne formalisent pas suffisamment les objectifs et les connaissances à transmettre ;
- ont des difficultés à structurer une démarche cohérente conduisant à la transmission de compétences nouvelles au niveau imposé et à identifier les centres d'intérêt associés au système étudié ;
- proposent des protocoles expérimentaux qu'ils ne mettent pas en œuvre et ne valident pas ;
- réduisent leur temps consacré à la préparation de l'exploitation pédagogique ce qui les pénalise.

Le jury conseille aux futurs candidats d'étudier préalablement et attentivement les programmes et les objectifs de formation des baccalauréats S option sciences de l'ingénieur, STI2D, et des CPGE, ainsi que les commentaires associés. Cette étude, ainsi que la lecture des documents « Ressources pour faire la classe » et des guides d'équipement, leur permettra de proposer une exploitation pédagogique qui soit en adéquation avec le niveau imposé. Une réflexion pédagogique sur les objectifs de formation de ces séries et classes post bac est indispensable pour cette partie.

Sur la présentation orale devant un jury

Le jury attend lors de cette phase de restitution des investigations et de la réalisation de l'activité pédagogique menées durant la phase de préparation que le candidat soit capable :

- de décrire le système et de rappeler le contexte de l'étude réalisée ;
- de décrire les mesures effectuées en rappelant la problématique donnée et en précisant la démarche mise en œuvre et les conclusions obtenues ;
- de situer la séquence dans une progression pédagogique cohérente ;
- de situer l'activité expérimentale dans la séquence pédagogique ;
- d'explicitier les compétences, et les connaissances associées, visées par la séance, les moyens de leur évaluation et de s'assurer du respect des textes officiels en vigueur ;
- de définir l'enchaînement des activités réalisées par les élèves dans la séance ;
- de proposer, justifier et valider un ou des protocoles expérimentaux.

Le jury attend également du candidat qu'il mette en œuvre des compétences professionnelles en matière de communication :

- produire un discours clair, précis et rigoureux en sachant attirer l'attention son auditoire ;

- être pertinent et réactif aux questions posées ;
- être capable de dégager l'essentiel et de donner du sens aux connaissances développées.

Les candidats qui ont bien réussi dans cette présentation de l'exploitation pédagogique se sont attachés à :

- situer l'exploitation dans une séquence inscrite dans une progression pédagogique cohérente et en accord avec la philosophie générale des niveaux d'enseignement demandés ;
- construire leur exposé à partir des résultats expérimentaux obtenus dans la troisième partie de la première phase de l'épreuve ;
- présenter l'organisation pédagogique générale de la séance (objectifs opérationnels, pré requis, connaissances nouvelles, organisation matérielle pour un groupe d'élèves) ;
- proposer un plan de déroulement de la séance avec les points clés ;
- développer la partie expérimentale de la séance qui amène les compétences nouvelles, en présentant les manipulations, résultats expérimentaux et conclusions attendues ;
- préciser les travaux donnés aux élèves et les modes d'évaluation.

Sur le comportement des candidats

De trop nombreux candidats manquent de méthode et de rigueur pour appréhender un système pluri technologique dans sa globalité et dans sa complexité. Cette exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale et transversale d'un système pluri technologique ne s'improvise pas. Elle doit se préparer tout au long de la formation post-baccalauréat conduisant à l'agrégation.

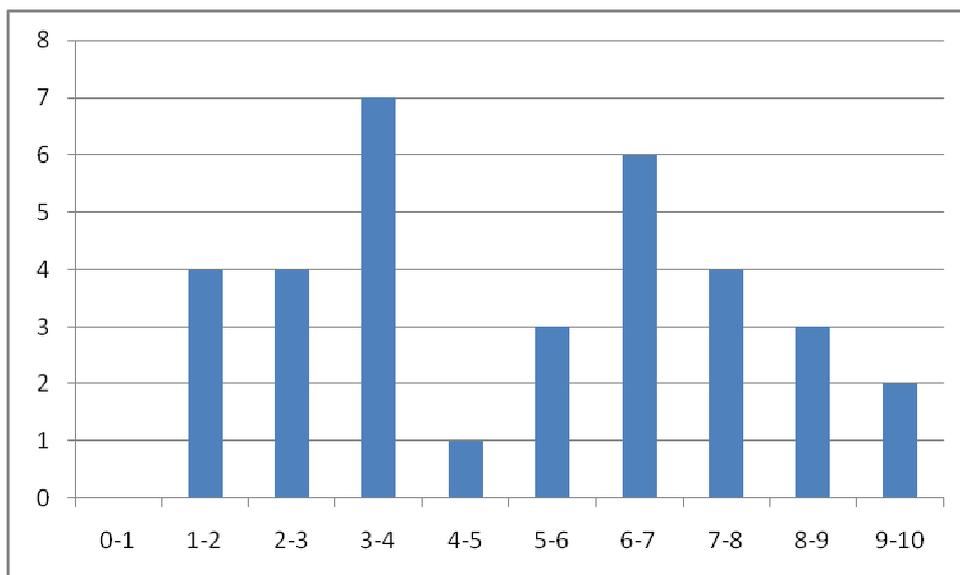
4. Conclusion

Cette première session marque une évolution forte par rapport aux épreuves antérieures, il semble nécessaire que les candidats s'approprient tous les champs disciplinaires transversaux des sciences de l'ingénieur portant sur la matière, l'énergie et l'information. Les candidats doivent également approfondir leurs connaissances des différents référentiels de formation et des objectifs généraux de ceux-ci.

5. Résultats

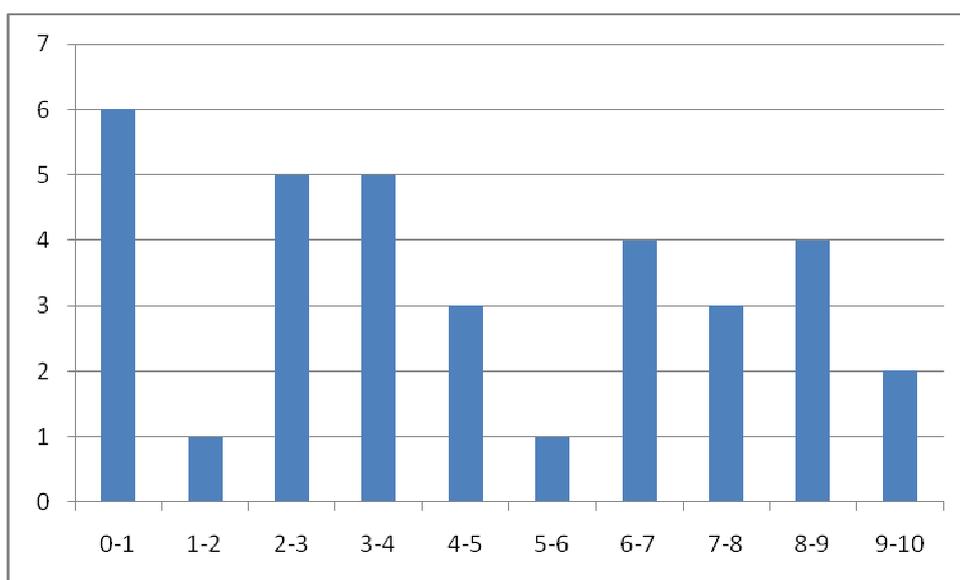
34 candidats ont composé pour la première partie de cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 5,2/10 avec :

- 10 comme meilleure note ;
- 1,2 comme note la plus basse.

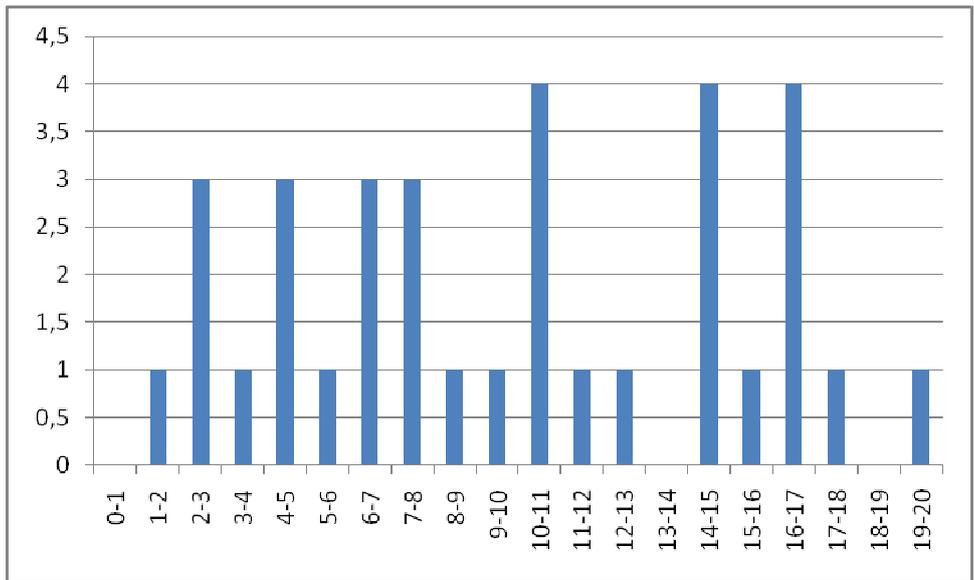


34 candidats ont composé pour la seconde partie de cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 4,7/10 avec :

- 10 comme meilleure note ;
- 0,4 comme note la plus basse.



Les notes globales pour cette épreuve vont de 1,9/20 à 20/20 avec une moyenne de 9,8/20.



Rapport du jury de l'épreuve d'activité pratique et exploitation pédagogique relatives à l'approche spécialisée d'un système pluritechnique

1. Présentation de l'épreuve

L'épreuve d'activité pratique et d'exploitation pédagogique prend appui sur un système technologique du domaine de la spécialité. Il vise à évaluer les compétences que les candidats mettent en œuvre pour concevoir une activité pédagogique à caractère expérimental. Pour cela, ils sont amenés à résoudre un problème technique posé au niveau d'exigence de l'agrégation, à communiquer les démarches mises en œuvre et à analyser les résultats obtenus.

L'épreuve a pour but d'évaluer l'aptitude du candidat à :

- mettre en œuvre des matériels ou équipements, associés si besoin à des systèmes informatiques de pilotage, de traitement, de simulation, de représentation ;
- conduire une expérimentation, une analyse de fonctionnement d'une solution, d'un procédé, d'un processus, dans la spécialité du concours, afin d'analyser et vérifier les performances d'un système technique ;
- exploiter les résultats obtenus et formuler des conclusions ;
- concevoir et organiser une séquence de formation pour un objectif pédagogique imposé à un niveau de classe donné et présenter de manière détaillée un ou plusieurs points-clefs des séances de formation constitutives. Elle prend appui sur les investigations et les analyses effectuées au préalable par le candidat au cours d'activités pratiques relatives à un système technique.

Le support de l'activité pratique proposée permet, à partir d'une analyse systémique globale, l'analyse d'un problème technique particulier relatif à la spécialité du concours dans l'option choisie.

Cette épreuve d'activité pratique demande aux candidats de mobiliser compétences, et les connaissances associées, à mettre en œuvre dans le cadre d'un enseignement pouvant être confié à un professeur agrégé SII d'ingénierie mécanique. Pour répondre à cet objectif, les supports utilisés lors de cette épreuve sont relatifs aux champs du comportement mécanique des systèmes, de la conception, de la pré-industrialisation et de l'industrialisation des produits.

Déroulement de l'épreuve

Cette épreuve, de coefficient 2, dure 6 heures et comporte trois phases :

- phase 1 - mise en œuvre des équipements du laboratoire (durée 4 h) ;
- phase 2 - préparation dans la salle de mise en loge (durée 1 h) ;
- phase 3 - présentation des travaux devant un jury (durée 1 h).

L'utilisation d'une calculatrice est autorisée (conformément à la circulaire n°99-186). L'utilisation d'une calculatrice est autorisée (conformément à la circulaire n°99-186). Durant toute cette épreuve les candidats ont accès à Internet.

La phase 1 – Manipulation expérimentale au laboratoire. Cette première phase d'une durée totale de 4 h se déroule en trois parties.

Cette phase 1 se déroule dans le laboratoire où sont mis à disposition des candidats les différents supports étudiés. Ceux-ci permettent au candidat de proposer une séquence pédagogique. **L'exploitation pédagogique proposée est liée aux activités pratiques réalisées.**

Première partie (durée ≈ 0h30)

Le candidat doit mettre en œuvre les matériels ou équipements, associés si besoin à des systèmes informatiques de pilotage, de traitement, de simulation, de représentation.

Pour cette partie, les manipulations ainsi que les activités proposées ont pour objectif de faciliter la compréhension du fonctionnement global du système. À la fin de cette première partie, l'examineur s'assure que le candidat s'est bien approprié le support des activités pratiques ainsi que la problématique proposée.

Deuxième partie (durée ≈ 2h00)

Le candidat doit conduire une expérimentation, une analyse de fonctionnement d'une solution, d'un procédé, d'un processus, dans la spécialité du concours, afin d'analyser et vérifier les performances d'un système technique ; exploiter les résultats obtenus et formuler des conclusions.

Pour cette partie, après la présentation du système à l'examineur, le candidat doit répondre au questionnement proposé afin de répondre aux problématiques proposées dans les activités pratiques. Cette partie permet au candidat, par la mobilisation de compétences caractéristiques du niveau de l'agrégation, de résoudre les problèmes posés puis d'en exploiter les résultats obtenus (hypothèses, modèles, valeurs numériques, ...).

Troisième partie (durée ≈ 1h30)

Pour cette partie, le candidat doit concevoir et organiser une séquence de formation pour un objectif pédagogique imposé à un niveau de classe donné et présenter de manière détaillée un ou plusieurs points-clefs des séances de formation constitutives. Elle prend appui sur les investigations et les analyses effectuées au préalable par le candidat au cours d'activités pratiques relatives à un système technique.

La phase 1 se déroule dans le laboratoire dans lequel figurent des supports². Ceux-ci permettent de proposer des séquences pédagogiques.

L'exploitation pédagogique proposée est liée aux activités pratiques réalisées.

Les candidats disposent de l'ensemble des moyens nécessaires à l'expérimentation et d'un poste informatique doté des logiciels courants de bureautique et des logiciels plus spécifiques liés au sujet qui leur est proposé.

La phase 2 se déroule dans la phase de mise en loge (durée 1 h).

Le candidat prépare dans une salle l'intervention qu'il effectuera devant le jury. Durant cette phase de préparation de l'exposé en salle, le candidat **n'a plus accès aux matériels, bancs et simulations**. Il

² systèmes réels distants ou non avec éventuellement sous-ensembles et composants industriels ; systèmes réels instrumentés ; systèmes didactisés ; systèmes sous forme de maquette et systèmes simulés.

dispose d'un poste informatique relié à l'internet doté des logiciels courants de bureautique. Il dispose des résultats obtenus lors de la phase 1 qu'il aura stockés dans un espace qui lui est dédié.

La phase 3 se déroule dans la salle d'exposé devant le jury.

L'exposé oral, d'une durée maximale de 40 minutes, comporte :

- la présentation du système (durée maximale 5 minutes) ;
- le compte-rendu des manipulations effectuées et l'analyse des résultats obtenus dans la deuxième partie de la première phase des activités pratiques (durée maximale 15 minutes) ;
- l'exploitation pédagogique (durée maximale 20 minutes).

L'entretien avec le jury est d'une durée maximale de 20 minutes.

Le candidat est amené au cours de sa présentation orale à expliciter sa démarche méthodologique, à mettre en évidence les informations, données et résultats issus des investigations conduites au cours des activités pratiques qui lui ont permis de construire sa séquence de formation, à décrire et à situer la séquence de formation qu'il a élaborée.

Au cours de l'entretien, le candidat est interrogé plus particulièrement pour préciser certains points de sa présentation ainsi que pour expliquer et justifier les choix de natures didactique et pédagogique qu'il a opérés dans la construction de la séquence de formation présentée.

Pour la présentation devant jury, les candidats ont à leur disposition un tableau, un ordinateur et un vidéoprojecteur. Ils disposent d'un poste informatique relié à Internet et doté des logiciels courants de bureautique, et des résultats obtenus lors des phases 1 et 2 qu'ils ont stockés dans l'espace qui leur est dédié.

Compétences attendues par le jury

Lors de cette épreuve d'activité pratique, le jury évalue chez les candidats les compétences suivantes :

- s'approprier un support ;
- identifier une problématique pertinente par rapport au questionnement proposé ;
- mettre en œuvre des outils informatiques et logiciels métiers ;
- élaborer, conduire, justifier un protocole expérimental ;
- exploiter des résultats expérimentaux et formuler des conclusions ;
- élaborer, justifier, analyser de manière critique un modèle ;
- évoluer en autonomie en mobilisant toutes ses connaissances et ses compétences ;
- faire preuve d'ingénierie pédagogique en élaborant **une séance d'activités pratiques** dans une séquence cohérente, inscrite dans une progression pédagogique ;
- dégager l'essentiel de la problématique identifiée en s'appuyant sur les expériences menées et les modèles utilisés ;
- présenter oralement ses travaux (clarté, précision, rigueur) ;
- être réactif et pertinent dans les réponses aux questions posées.

Supports retenus et activités demandées

Pour la session 2013, les supports retenus pour cette épreuve d'activité pratique ont été les suivants :

- banc d'essai en géotechnique - Définition des paramètres de cisaillement d'un sol en vue d'estimer la contrainte de rupture sous une fondation superficielle des sollicitations en RDM ;
- banc d'essai du béton - Caractérisation de la résistance à la compression d'un béton de chantier ;
- banc d'essai en acoustique - Qualité acoustique d'une paroi en béton de chanvre ;
- banc d'étude en énergétique - Etude d'une pompe à chaleur ;

- banc d'étude de structures – Etude théorique, expérimentale et règlementaire du phénomène de flambement ;
- banc d'étude de structures – Etude d'une poutre treillis.

Ces supports ont permis aux candidats de mettre en œuvre leurs compétences à haut niveau scientifique sur les activités suivantes :

- détermination des caractéristiques d'une chaîne de mesure ;
- détermination des paramètres significatifs dans une modélisation ;
- identification du comportement de composants ;
- mesure du comportement d'un système ;
- modélisation d'un système ;
- simulation et prédiction de performances ;
- validation d'un modèle.

2. Commentaires et conseils aux futurs candidats

A l'issue de la session 2013, le jury attire particulièrement l'attention des futurs candidats sur les points suivants :

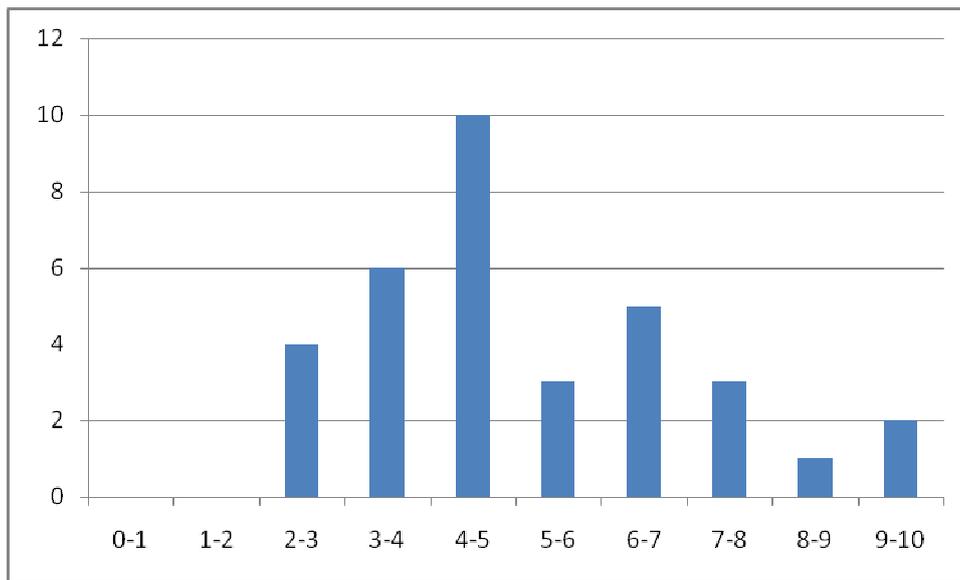
- **le jury rappelle que cette épreuve n'est pas un compte-rendu de laboratoire au sens strict mais la contextualisation pédagogique d'une problématique donnée, basée sur une manipulation expérimentale ;**
- pour la première phase, les candidats doivent veiller à équilibrer le temps consacré à l'expérimentation et celui consacré à la conception de leur séquence pédagogique ;
- pour la troisième phase, les candidats disposent d'un temps de parole de 40 minutes maximum. Le jury regrette une mauvaise gestion générale du temps pour certains candidats qui n'utilisent pas pleinement les 40 minutes. A contrario, d'autres candidats cherchent à meubler artificiellement ce temps de parole au détriment de la qualité et de la rigueur de leur exposé ;
- il est déconseillé de tout écrire au tableau. Ceci est source de perte de temps et le contexte n'est pas celui d'une leçon faite devant des élèves. Le candidat doit exploiter au mieux les outils informatiques de présentation fournis ;
- on constate trop souvent un déséquilibre entre la présentation des résultats expérimentaux, souvent trop détaillée, et leur exploitation pédagogique qui reste peu développée (pas de support formalisé, idées trop générales, pas d'application concrète,...) ;
- l'exploitation pédagogique est l'objectif principal de cette épreuve, mais reste trop succincte chez la majorité des candidats. En particulier, les candidats doivent s'attacher :
 - à préciser l'insertion de leur séquence dans le référentiel indiqué ;
 - à préciser et à détailler la construction de leur séquence pédagogique (combinaison de CM, TD, TP) en détaillant notamment l'organisation pratique en présence d'élèves ou d'étudiants ;
 - à situer l'intégration de cette séquence pédagogique dans le contexte proposé, à préciser ses objectifs et son intérêt en situation réelle ;
 - à préciser et à justifier les modalités d'évaluation et/ou de remédiation.

3. Résultats

34 candidats ont composé pour la première partie de cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 5/10 avec :

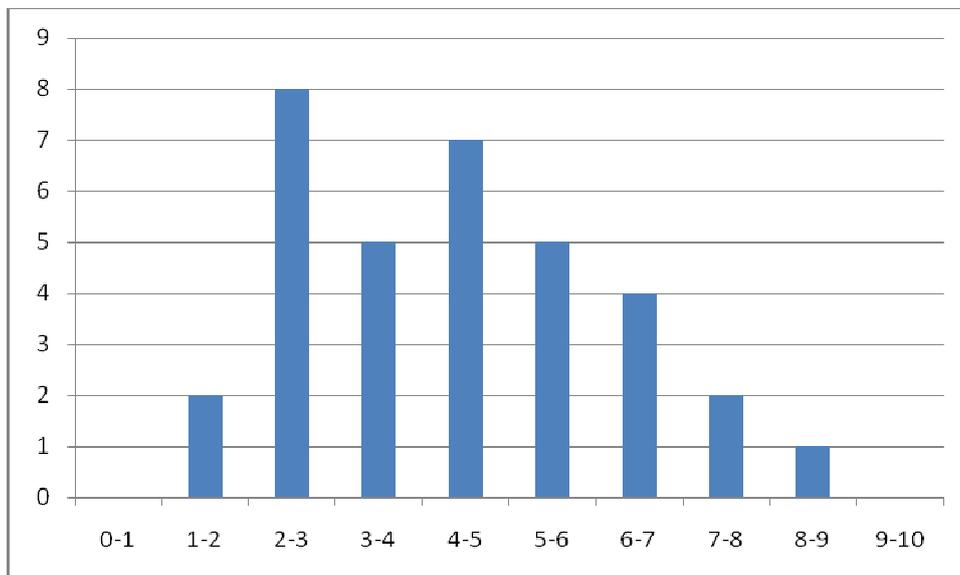
- 9,3 comme meilleure note ;

- 2 comme note la plus basse.

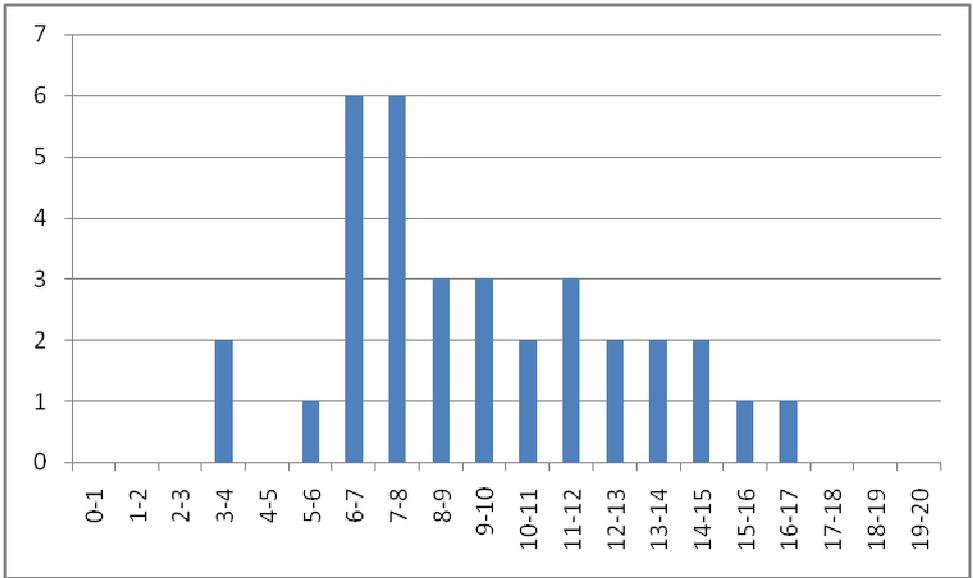


34 candidats ont composé pour la seconde partie de cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 4,4/10 avec :

- 8,5 comme meilleure note ;
- 1 comme note la plus basse.



Les notes globales pour cette épreuve vont de 3,7/20 à 16,2/20 avec une moyenne de 9,4/20.



Rapport du jury de l'épreuve sur dossier comportant deux parties

1. Présentation de l'épreuve

Cette épreuve est constituée de deux parties distinctes, évaluées séparément.

La première impose aux futurs professeurs de s'engager, dès leur début de carrière, dans un processus de rapprochement avec le monde de l'entreprise. Elle doit amener le candidat à conduire personnellement une analyse technique et économique d'un problème technique authentique. Pour cela, il est indispensable que les candidats prennent contact avec des responsables (ingénieurs, chercheurs, ..) au sein d'une entreprise. Un dossier élaboré à partir de ressources téléchargées sur Internet ne répond pas à l'esprit de cette épreuve.

Cette analyse peut être soit à l'initiative de l'entreprise soit à celle du candidat. Elle s'appuie sur la résolution d'un problème technique identifié. La justification de la solution à ce problème est conduite par le candidat.

La deuxième partie prend appui sur une problématique contextualisée, tirée au sort, qu'il s'agit pour le candidat d'analyser en fonction de textes et documents fournis.

Ce compte-rendu vise à mettre en évidence les caractéristiques de l'épreuve et les attentes du jury, afin de permettre aux candidats de conduire leur préparation dans les meilleures conditions.

Les textes réglementaires définissant l'épreuve

Le jury rappelle l'évolution des textes réglementaires concernant cette épreuve dans l'encadré ci-dessous et ayant pris effet à la session 2013.

Durée de la préparation : 1 heure 30

Durée de l'épreuve : 1 heure maximum

L'épreuve se déroule en deux parties. La première partie est notée sur 15 points, la seconde sur 5 points.

Première partie : soutenance devant le jury d'un dossier technique et scientifique réalisé par le candidat dans un des domaines de l'option préparée, suivie d'un entretien

Durée de la présentation : 20 minutes maximum

Durée de l'entretien avec le jury : 20 minutes

L'épreuve a pour but de vérifier que le candidat est capable de rechercher les supports de son enseignement dans le milieu économique et d'en extraire des exploitations pertinentes pour son enseignement en collège ou en lycée.

Le dossier présenté par le candidat est relatif à un système technique dont la dominante est choisie par le candidat. Son authenticité et son actualité sont des éléments décisifs.

L'exposé et l'entretien permettent d'apprécier l'authenticité et l'actualité du problème choisi par le candidat, sa capacité à en faire une présentation construite et claire, à mettre en évidence les questionnements qu'il suscite et à en dégager les points remarquables et caractéristiques. Ils permettent également au candidat de mettre en valeur la qualité de son dossier et l'exploitation pédagogique qu'il peut en faire dans le cadre d'un enseignement.

En utilisant les moyens courants de présentation (vidéoprojecteur et informatique associée, en particulier), le candidat présente le support technique qu'il a choisi pour l'épreuve ainsi que les investigations et développements qu'il a conduits pour s'en approprier le fonctionnement et les évolutions potentielles. Lors de la présentation, le candidat justifiera le choix du support d'étude et les investigations conduites qui pourraient, selon lui, donner lieu à des exploitations pertinentes en

collège ou en lycée.

Pendant l'entretien, le jury conduit des investigations destinées à se conforter dans l'idée que le dossier présenté résulte bien d'un travail personnel du candidat et s'en faire préciser certains points.

Les éléments constitutifs du dossier sont précisés par note publiée sur le site internet du ministère chargé de l'éducation nationale. Les dossiers doivent être déposés au secrétariat du jury cinq jours francs avant le début des épreuves d'admission.

Seconde partie : interrogation portant sur la compétence "Agir en fonctionnaire de l'État et de façon éthique et responsable"

1. *Durée de la présentation : 10 minutes*

2. *Durée de l'entretien avec le jury : 10 minutes*

Le candidat répond pendant dix minutes à une question, à partir d'un document qui lui a été remis au début de l'épreuve, question pour laquelle il a préparé les éléments de réponse durant le temps de préparation de l'épreuve. La question et le document portent sur les thématiques regroupées autour des connaissances, des capacités et des attitudes définies, pour la compétence désignée ci-dessus, dans le point 1 de l'annexe de l'arrêté du 12 mai 2010 (MENH1012598A).

Arrêté du 12 mai 2010

L'exposé se poursuit par un entretien avec le jury pendant dix minutes.

Le déroulement de l'épreuve de la session 2013

Pour cette session, le candidat disposait d'une heure et trente minutes pour préparer le sujet relatif à l'interrogation portant sur la compétence « agir en fonctionnaire de l'État de façon éthique et responsable (AEFE) » et installer l'environnement matériel de son exposé sur le dossier industriel. Pour sa préparation, le candidat bénéficiait d'un poste informatique multimédia.

Les sujets « AEFE » comportaient tous les textes ou extraits de textes susceptibles d'être exploités comme ressources et le candidat pouvait formuler ses réponses aux questions posées sur un document numérique.

Avant la soutenance proprement dite, le candidat disposait de 30 minutes pour préparer l'environnement nécessaire à son exposé. Un poste informatique avec vidéo projecteur est mis à sa disposition.

À l'heure prévue pour la soutenance, le jury rejoint le candidat dans la salle ainsi préparée. Le candidat choisit alors l'ordonnancement des deux parties. À l'issue de chaque exposé, le jury s'entretient avec le candidat sur différents points qu'il aura pu exposer :

- vingt minutes sont consacrées au dossier. Le jury s'assure qu'il s'agit bien d'un travail personnel résultant d'un échange approfondi avec une entreprise industrielle sur un problème de production authentique ;
- dix minutes sont consacrées à l'épreuve « Agir en fonctionnaire de l'état de manière éthique et responsable ». Le jury s'assure de la connaissance des acteurs du système éducatif, de leur rôle, et de leurs comportements attendus selon la situation-problème proposée.

2. Analyse globale des résultats

Pour la première partie de l'épreuve, les candidats ont montré un investissement certain. Mais l'esprit de ce qui est attendu n'est pas toujours bien compris.

La deuxième partie a donné des résultats plus contrastés, mais globalement les prestations des candidats étaient de qualité.

3. Première partie : soutenance du dossier industriel

3.1. Les attentes du jury, les critères d'évaluation

Le dossier présenté doit résulter d'un travail personnel du candidat ; le jury le vérifie. Le dossier est réalisé dans le cadre d'un échange avec une entreprise. Le candidat doit montrer les investigations et développements qu'il a conduits pour s'en approprier totalement le fonctionnement et les évolutions potentielles. Ces investigations doivent déboucher sur un travail personnel d'analyse sérieuse, de propositions de solutions techniques répondant aux problèmes posés, le tout démontrant la maîtrise d'une démarche scientifique pertinente complétée si cela est possible par des résultats d'expérimentation. Le niveau de confidentialité ne devra pas nuire à la constitution du dossier et au dialogue avec le jury. **Le travail personnel attendu du candidat prend sens par la présentation argumentée des conclusions et non par la liste des actions menées.**

Le dossier doit contenir les études conduites exploitant les connaissances attendues d'un professeur agrégé dans le domaine de la conception, de l'industrialisation et de la mécanique industrielle. Ceci ne doit pas être compris comme la nécessité d'une étude mécanique théorique lorsqu'elle ne se justifie pas.

Le support de l'étude doit permettre au candidat de **faire preuve de réelles connaissances en technologie dans un contexte industriel** choisi pour sa pertinence technique et pédagogique. Le candidat doit s'attacher à produire des documents techniques conformes aux normes en vigueur.

L'épreuve s'appuie sur un **dossier personnel de 40 pages au maximum** réalisé par le candidat. Le dossier est préparatoire à l'épreuve. Le jury demande au candidat de faire parvenir les **dossiers en deux exemplaires et un CD-ROM ou une clé USB**. Le CD-ROM ou la clé USB contient le fichier du dossier *a minima* au format Pdf, la maquette numérique 3D dont le fichier complet est fourni, les fichiers de simulation et tout document jugé utile par le candidat. Le CD-ROM ou la clé USB est à structurer en quatre répertoires : CAO, simulations, dossier, et éventuellement annexes.

Les compétences évaluées

Parmi les compétences d'un futur enseignant, l'épreuve de soutenance d'un dossier industriel permet d'évaluer plus particulièrement celles décrites ci-après à l'aide des points d'observation précisés.

- Imaginer des activités pédagogiques pratiques à partir d'un système :
 - o relation activités – référentiels visés ;
 - o démarches pédagogiques ;
 - o progression pédagogique ;
 - o documents techniques fournis ;
 - o environnement numérique lié à l'activité pédagogique.
- Construire un dossier technique du système :
 - o choix du support ;
 - o développements scientifiques et technologiques ;
 - o problématiques techniques ;
 - o relations partenariales ;
 - o performances obtenues.
- Communiquer une idée, un principe, une solution technique ou un projet :
 - o présentation écrite et orale ;
 - o environnement de présentation ;
 - o argumentation et réactivité.

3.2. Constats et recommandations du jury

Les dossiers, dans leur majorité, sont bien présentés et leur construction est assez souvent cohérente. Cependant, ils souffrent parfois d'une structure archétypique qui ôte trop de liberté aux développements. Il n'y a pas de modèle unique tant les préoccupations, et donc les poids relatifs des parties, peuvent être différentes. Le jury regrette principalement la pauvreté des développements technologiques et rappelle que l'aspect modélisation et calcul n'a de sens que pour aboutir à la validation puis à la définition d'une solution technologique cohérente vis-à-vis de l'agrégation présentée.

Les candidats doivent veiller à proposer des documents graphiques aux normes en relation avec l'étude menée. Le jury pourra toutefois être amené à demander les documents originaux de l'entreprise. En cas d'informations mentionnées « confidentielles », le jury s'engage à ne pas les reproduire ou les divulguer à des personnes extérieures pour que cet aspect ne constitue pas un obstacle pour le candidat.

Voici quelques conseils pour la rédaction du dossier écrit :

- le dossier commence par une page de garde contenant, entre autre, un titre, le nom du candidat et son numéro d'inscription ;
- il est suivi d'une autre page de garde, identique à la première, mais sans le nom du candidat ;
- le numéro d'inscription du candidat est rappelé en pieds de pages ;
- le plan du dossier peut avantageusement dégager 3 parties :
 - o la première partie contextualise et justifie l'intérêt du dossier support choisi ;
 - o une seconde partie développe les aspects techniques et scientifiques. En plus d'une description, des justificatifs sont produits (sur une variante par exemple) et montrent des connaissances calculatoires, réglementaires, techniques, environnementales applicables au dossier. Les hypothèses posées sont claires. Des outils numériques peuvent avantageusement être utilisés, mais ne peuvent se substituer totalement à une véritable analyse présentée oralement ;
 - o une troisième partie explique les potentialités pédagogiques du dossier tant au niveau STI2D que BTS et IUT. Celles-ci doivent pouvoir être pluridisciplinaires. Une exploitation pédagogique au choix du candidat doit être plus particulièrement détaillée. Le cadencement des séances, leurs durées, les prérequis, les objectifs, des documents élève sont présentés, les modalités d'évaluation. Cette partie doit montrer une bonne maîtrise des programmes et des méthodes d'apprentissage.
- les plans de l'ouvrage support du dossier (propres et cotés) sont placés en annexe.
- Le candidat n'oubliera pas de préciser les contacts professionnels qu'il a développés grâce à ce travail.

Le jury a constaté la présence de dossiers sans aucun apport scientifique, ni technologique. Une simple description de l'ouvrage ou du chantier n'est pas suffisante à ce niveau. De même, un travail ne s'appuyant pas sur un ouvrage concret est "hors sujet".

La modélisation via un BIM (Building Information Model) est vivement encouragée.

Le candidat choisissant le thème de son dossier, il doit maîtriser le cadre réglementaire associé. Dans le même esprit, il est évident que le choix des photographies techniques présentées doit être réfléchi. Toute photographie peut amener un questionnement de la part des membres du jury sur des connaissances associées aux programmes dans lesquelles elles s'inscrivent. Les aspects technologiques ne sont pas toujours maîtrisés par les candidats, alors même qu'ils choisissent les photographies pour illustrer des points techniques, le risque est important, dès lors, de ne pas pouvoir justifier oralement tout ou partie des aspects techniques présentés.

Le jury souligne néanmoins que certains dossiers étaient de qualité exceptionnelle. Les exploitations pédagogiques ainsi que les thèmes développés doivent montrer l'intérêt du dossier technique support choisi.

Les fichiers informatiques font partie du dossier. Ils ne peuvent donc pas se limiter au dossier proprement dit. S'ils peuvent aider à une présentation du contexte, ils doivent aussi contribuer à une bonne perception des études et des simulations avec les conditions de leur réalisation.

L'aspect technologique et scientifique

Le jury conseille au candidat :

- de rechercher un support moderne attrayant dès la décision d'inscription au concours ;
- de choisir un support dont l'authenticité et l'actualité sont des éléments décisifs. Il se caractérise par une compétitivité reconnue, par la modernité de sa conception et par sa disponibilité réelle ;
- de vérifier les potentialités du support au regard des développements scientifiques, technologiques et pédagogiques possibles ;
- d'utiliser une ou plusieurs problématiques techniques pour guider l'étude répondant à un cahier des charges précisé et explicite. L'expérience montre que sans problématique technique, il est difficile d'éviter le piège de la validation de l'existant ;
- de rechercher une pertinence et une authenticité des problèmes posés ;
- de mettre en œuvre de manière lisible les méthodes de résolution de problème et les outils associés. Il est utile de rappeler que les outils numériques ne doivent pas être utilisés comme des « boîtes noires ». En particulier, pour les codes « Éléments Finis », il convient de maîtriser la mise en données et les algorithmes de résolution ;
- d'utiliser des schémas et ne pas se limiter à des photos annotées et légendées ou à une description textuelle ;
- de justifier les modèles d'étude, les solutions technologiques retenues et les méthodologies utilisées ; le développement des calculs associés au cours de l'exposé doit être réduit aux étapes essentielles (l'utilisation d'outils de simulation numérique est appréciée lorsqu'elle est pertinente) ;
- de s'appuyer sur une maquette numérique, permettant l'utilisation d'outils de simulation de comportement pour la partie étudiée ;
- de placer l'étude d'une manière adaptée dans le cadre général d'une méthode moderne de développement de produit ;
- de prendre un soin particulier à l'orthographe et à la typologie (notamment à l'écriture des unités de mesure).

L'aspect pédagogique

Dans sa partie pédagogique, le dossier doit présenter des propositions. Au moins une d'entre elles doit faire l'objet d'un développement conséquent, c'est une séquence complète qu'il s'agit de développer. Outre la situation calendaire et la conformité aux référentiels et programmes, il est impératif de mettre en situation la ou les activités proposées, leurs finalités pédagogiques et d'intégrer cette séquence dans une progression pédagogique formalisée.

La pertinence de l'application pédagogique au regard du support proposé et du problème technique associé est appréciée par le jury. La partie pédagogique ne peut pas être entièrement décorrélée de la problématique investiguée dans la partie étude scientifique et technique.

Le jury conseille au candidat :

- d'identifier des propositions d'exploitation pédagogique, pré et post baccalauréat pertinentes en relation avec les points remarquables du dossier. L'exhaustivité n'a pas à être recherchée ;
- de détailler les intentions pédagogiques ;
- de préciser les objectifs pédagogiques et d'être attentif à leur formulation ;
- d'identifier les difficultés prévisibles afin de scénariser la séquence et choisir la pédagogie la plus adaptée ;
- de privilégier les activités pédagogiques utilisant un problème technique réel posé par le support ;
- d'envisager des travaux pratiques sur le réel lorsque le support et la problématique le permettent ;
- de proposer les exploitations pédagogiques dans le respect des référentiels et des directives pédagogiques ;
- de prendre en compte la réforme du lycée et particulièrement celles des séries STI2D et S SI.

L'expression et la communication dans le dossier

La qualité du dossier et le respect des règles qui lui sont imposées (nombre de pages, date d'envoi, CD-ROM) montrent la maîtrise par le candidat des outils de la communication écrite et la façon dont il s'inscrit dans une institution.

La prestation du candidat, à l'oral, permet au jury d'évaluer qu'il saura maîtriser la communication dans une classe et exercer de manière efficace et sereine sa fonction de professeur.

Les questions posées par le jury permettent d'approfondir quelques-unes des informations données par le candidat, dans le dossier autant que dans l'exposé, et de renforcer au sein du jury la conviction que le dossier présenté résulte bien d'un travail personnel.

Les réponses évasives relatives au contexte de la conception, l'industrialisation ou de la réalisation sont peu appréciées, car elles témoignent d'un réel manque d'investigation et de curiosité au sein de l'entreprise.

Les candidats doivent :

- profiter des temps de préparation, qui ne sont pas des temps d'attente ; en particulier, ouvrir les fichiers annexes (CAO, vidéo, BIM...) qui peuvent être utiles pour répondre à certaines questions ;
- préparer des documents multimédias adaptés à une soutenance d'une durée de vingt minutes maximum ;
- préparer des animations aidant à comprendre le fonctionnement ;
- lors de la présentation, limiter le nombre de diapositives.

Pour conclure, le jury conseille aux candidats :

- de s'assurer de l'existence d'une problématique technique réelle dans le cadre d'un partenariat avec une entreprise ;
- de s'assurer que cette problématique permet des développements scientifiques et technologiques adaptés au niveau de l'agrégation. Une analyse simpliste est un écueil à éviter ;
- de conserver un regard critique par rapport au travail réalisé en lien avec l'entreprise ;
- pour ceux qui souhaitent présenter à nouveau un dossier élaboré pour une précédente session, de continuer à faire vivre le partenariat engagé, de faire évoluer le dossier et de prendre en compte les échanges avec le jury lors des entretiens précédents ;
- de s'assurer, pour les candidats issus des milieux de l'industrie ou de la recherche, que la constitution du dossier ne se réduit pas à une simple présentation de leurs expériences professionnelles. Un mémoire de M1 ne saurait constituer un fond de dossier suffisant.

4. Deuxième partie : interrogation portant sur la compétence « agir en fonctionnaire de l'État et de façon éthique et responsable »

Le jury constate globalement une bonne préparation de cette partie de l'épreuve par les candidats en amont du concours et observe que ces derniers ont su tirer profit des ressources mises à leur disposition.

Les synthèses présentées - à l'aide d'un diaporama - sont généralement bien formulées et font référence aux textes réglementaires. On peut cependant regretter un manque de clarté dans la définition des rôles et missions des différentes instances d'un EPLE (conseil d'administration, conseil pédagogique, conseil de discipline, commission permanente,...). Il en est de même pour ce qui concerne le comité de vie lycéenne.

Le jury a apprécié la volonté des candidats à prendre une position franche dans l'expression de leurs recommandations et conclusions.

Les candidats ayant accès à internet durant l'épreuve, une connaissance approfondie de la réglementation n'est pas indispensable.

Les candidats gagneraient à approfondir leur maîtrise des procédures et des organisations (instances notamment). La commission d'interrogation attend de la part des candidats un exposé d'attitudes et de réactions professionnelles contextualisées.

Le jury interroge les candidats à l'issue de leur présentation et apprécie la précision des réponses, la qualité de l'analyse du problème posé, et la pertinence des actions proposées. La pondération et la mesure propre à la prise de décision dans un milieu complexe (enseignants, élèves, parents) est appréciée.

Le jury conseille notamment aux futurs candidats :

- de s'informer du fonctionnement d'un EPLE afin de mieux connaître les rôles et missions des différentes instances qui s'y rattachent : conseil d'administration, CESC, conseil de discipline, conseil pédagogique, CHSCT, commission permanente, CVL, ... ;
- d'avoir une connaissance approfondie des droits et des devoirs d'un fonctionnaire de l'Éducation nationale ;
- de s'informer et d'approfondir « les compétences professionnelles des maîtres » du bulletin officiel N°29 du 22 juillet 2010 ;
- d'affirmer avec conviction leur point de vue en le fondant sur les droits et devoirs du fonctionnaire de l'Éducation nationale dans l'exercice de sa fonction.

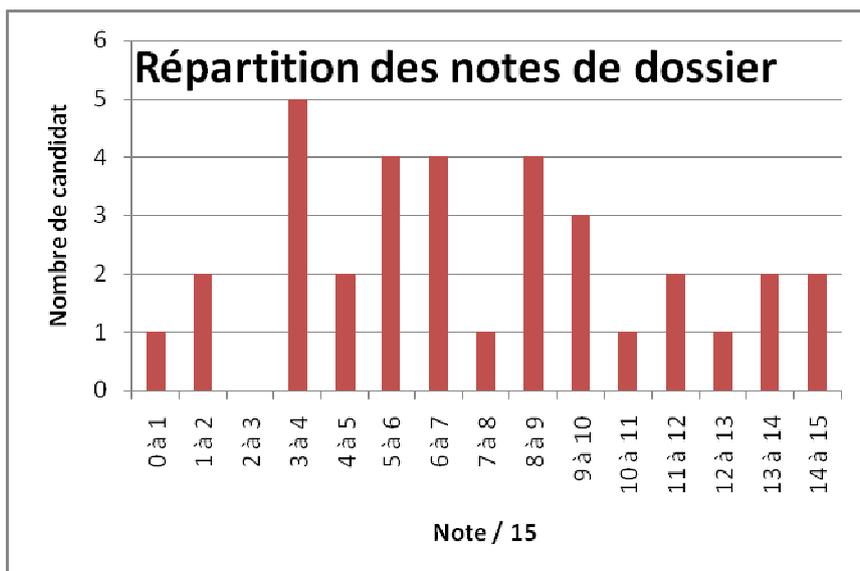
5. Conclusion

La forme et l'esprit de cette épreuve seront maintenus pour la session 2014. Le jury conseille aux futurs candidats de s'imprégner de ce rapport et de se préparer en conséquence.

6. Résultats

34 candidats ont participé à la première partie de cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 7,4/15 avec :

- 15 comme meilleure note ;
- 0,7 comme note la plus basse.



34 candidats ont participé à la seconde partie de cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 2,8/5 et avec :

- 5 comme meilleure note ;
- 0,4 comme note la plus basse.

