

COMMENTAIRES DE L'ÉPREUVE ANALYSE ET CONCEPTION DES SYSTÈMES

Le sujet prenait appui sur un tunnelier destiné au percement d'un tunnel de la ligne 9 du métro de Barcelone. Le tunnelier assure trois fonctions principales :

- forer la galerie ;
- évacuer les déblais ;
- assurer la pose des voussoirs qui constituent la paroi interne du tunnel. C'est sur l'étude de cette dernière fonction que portait l'essentiel du sujet.

Le questionnement était structuré en quatre parties indépendantes :

- réalisation de la galerie ;
- étude de l'érecteur de voussoirs ;
- étude géométrique du préhenseur, partie terminale de l'érecteur de voussoirs ;
- étude de conception du vérin central de préhenseur.

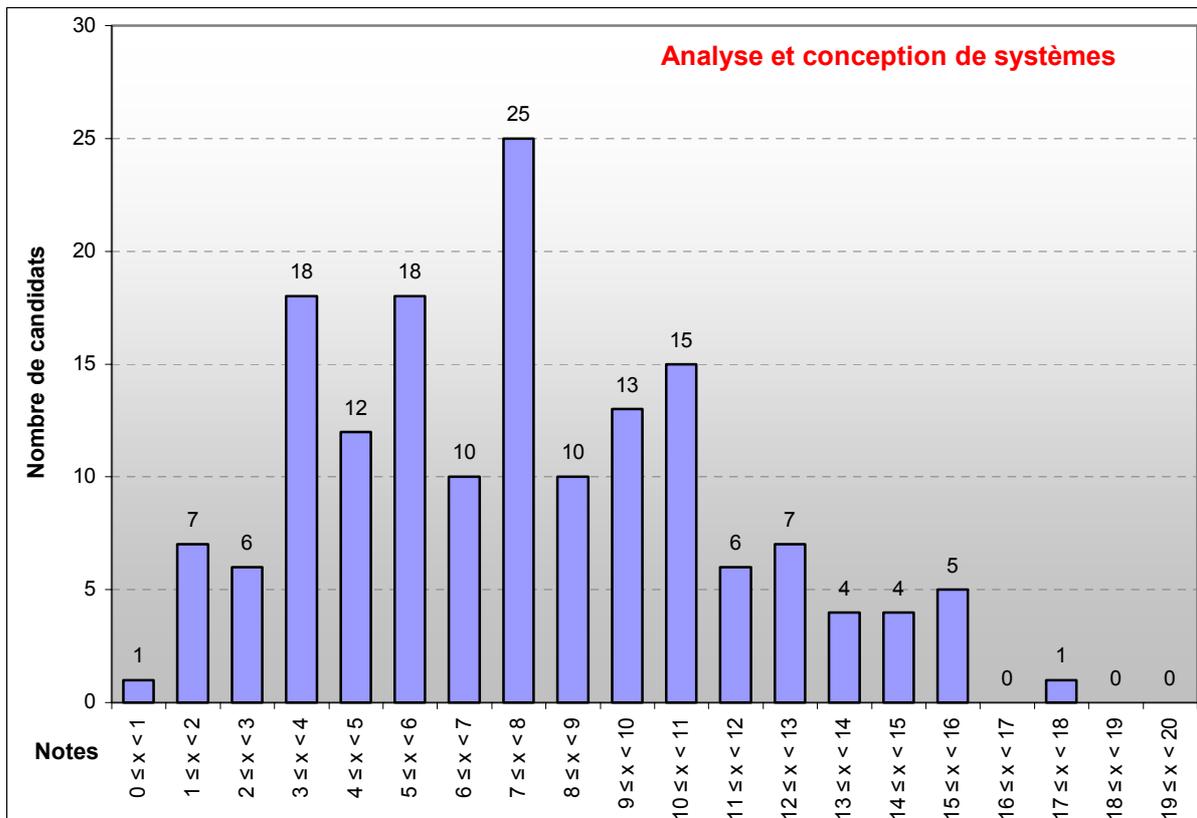
Résultats

162 candidats ont composé lors de cette épreuve.

Si l'on excepte une copie totalement blanche, les notes s'échelonnent de 2 à 17, avec une moyenne à 7,0. 55 candidats ont obtenu une note supérieure ou égale à 10.

60 candidats ont abordé de façon significative les quatre parties du sujet, environ 20 l'ont traité dans sa quasi-totalité.

La répartition est illustrée par l'histogramme ci-dessous.



Première partie : réalisation de la galerie

Il s'agit d'analyser le principe de réalisation de la paroi interne du tunnel par anneaux voussoirs, en particulier l'association de plusieurs anneaux pour suivre une trajectoire en virage.

Question 1-1

Cette première question propose de décrire sous forme de schéma le principe de creusement du tunnelier en situation de virage. Cette description oblige le candidat à faire une synthèse de la présentation du sujet, et à en proposer une traduction graphique.

Pour être schématique, cette représentation n'en est pas moins rigoureuse : distinction des trois éléments de la partie foreuse (tête de coupe, bouclier frontal et bouclier arrière), situation précise des vérins, en faisant apparaître leurs appuis sur les voussoirs à l'arrière, sur le bouclier frontal à l'avant.

Un court commentaire peut préciser la nature des liaisons des vérins avec les éléments d'appui : rotules nécessaires...

D'une façon générale, les schémas proposés sont trop sommaires et se contentent de montrer l'empilage des voussoirs, sans réellement s'attacher à la cinématique du tunnelier. Les vérins, lorsqu'ils sont représentés sont très souvent en appui dans le vide, notamment à la partie arrière.

Question 1-2

Il s'agit de quantifier le rayon moyen du virage associé à un anneau isolé. Cette question très simple a été correctement traitée par la quasi-totalité des candidats.

Compte tenu de la très faible valeur de l'angle des plans du voussoir, une expression approchée du résultat est admise. Cette indication de la part du candidat est appréciée...

L'application numérique donne parfois des résultats surprenants :

- rayon de virage de 8 m, souvent du à la confusion degrés - radians.
- emploi d'unités peu adaptées (mm), avec parfois 8 chiffres significatifs...

Ces dernières remarques valent pour l'ensemble des applications numériques du problème.

Question 1-3

Plus délicate, cette question traite du rayon d'un virage associé à un groupe de deux anneaux.

Il y a au moins deux façons de répondre à cette question :

- en définissant les rotations de repères successifs ;
- par analyse de "l'épaisseur" des voussoirs dans un plan contenant son axe, après rotation.

Peu de candidats ont abordé cette question (25), et rares sont ceux qui lui ont apporté une réponse correcte (8).

La maîtrise de la géométrie tridimensionnelle est pourtant l'un des piliers du génie mécanique.

Principale critique : il est très osé de considérer deux situations particulières simples (rotation nulle, et rotation d'un demi-tour), puis de prétendre arbitrairement que l'évolution entre les deux est linéaire en fonction de l'angle ou sinusoïdale.

Deuxième partie : étude de l'érecteur de voussoirs

L'érecteur est un bras manipulateur à trois degrés de liberté. Un aspect original tient au système de préhension, qui assure le maintien du voussoir par "aspiration". L'objectif de cette étude consiste à analyser le comportement du système, en statique et dynamique, pour évaluer son aptitude à maintenir le voussoir.

Question 2-1

La première étape propose de définir les propriétés de masse du voussoir le plus volumineux. Tous les candidats ont abordé cette question très classique.

Quatre paramètres étaient attendus :

- la masse :

Elle n'a pas soulevé de difficulté, le volume du voussoir étant une fraction simple de celui d'un anneau cylindrique. Tout au plus un facteur multiplicatif 2 ou π a-t-il pollué l'expression, souvent par étourderie.

- la position du centre de masse ;
sa définition est correctement posée par la moitié des candidats environ. Par contre, la mise œuvre et le calcul de l'intégrale associée (simple et classique) sont moins satisfaisants :
 - non prise en compte de la symétrie de la géométrie (bornes d'intégration $[0, 2\beta]$ au lieu de $[-\beta, +\beta]$;
 - oubli de la projection sur z ($\cos \theta$) du vecteur position du point courant du volume.
- le poids ;
faut-il rappeler que le poids est une action mécanique, modélisable par un torseur, et que par conséquent il nécessite la donnée d'un point de réduction et deux vecteurs, projetés dans un repère clairement défini.
Si on peut admettre que les propriétés du poids sont connues (résultante verticale descendante, moment nul en G centre de gravité), ce manque de rigueur se révèle assez constant au cours du problème, et source d'ambiguïté.
- la matrice d'inertie :
il n'est attendu que la structure de la matrice d'inertie, compte tenu des propriétés géométriques du voussoir. Bon nombre de candidats évoquent à juste titre les symétries du volume par rapport à deux plans du repère proposé. Mais les conséquences ne sont pas toujours pleinement exploitées, certains candidats ne proposant que deux produits d'inertie nuls...
D'autres en déduisent que la matrice d'inertie est **symétrique**... Faut-il rappeler qu'elle l'est toujours, et que les propriétés de symétrie la rendent **diagonale**.

Question 2-2

Le but de cette question consiste à évaluer l'effort d'aspiration du préhenseur sur le voussoir.

Pour cela, il convient d'estimer la surface des chambres d'aspiration, puis d'en déduire l'effort, connaissant les valeurs des pressions.

L'évaluation de l'étendue de la surface n'a pas posé de problème de principe, par décomposition additive ou soustractive en éléments simples. Certaines copies montrent un souci de précision très au delà de l'objectif consistant à quantifier l'effort. D'où une certaine perte de temps et un risque accru d'erreurs de calcul.

Le calcul de l'effort a révélé certaines surprises : faut-il prendre en compte la "dépression" p , la somme avec la pression atmosphérique ($p+p_0$), ou la différence ($p-p_0$) ? Une fois de plus, une modélisation simple mais précise du champ de pression permet de lever le doute, quand il existe.

Se pose également le problème de la définition de l'effort : pour la quasi-totalité des candidats, elle se limite à la valeur numérique de la résultante. Qu'en est-il du moment et du point de réduction du torseur ? Même si une estimation précise de ces éléments est délicate faute d'outils appropriés, **des hypothèses sont toujours possibles et appréciées**...

Question 2-3

L'objectif consiste à évaluer les actions de compression des joints situés entre les voussoirs. Le modèle retenu est celui d'une répartition d'effort linéique uniforme.

Une fois de plus, le calcul se limite à la résultante de l'action, en oubliant moment et point de réduction, et parfois la base de projection.

Les calculs pour mettre en place ces éléments sont pourtant relativement simples.

Question 2-4

Elle consistait en une simple illustration des résultats établis précédemment. Souvent correctement traitée, elle montre parfois des sens d'efforts de compression des joints ambigus ou faux :

- ambigus, car représentant l'action du voussoir isolé sur ses voisins, ce que précise les annotations du candidat. Rappelons qu'il est d'usage de représenter les efforts extérieurs agissant sur l'élément isolé ;
- faux, car de direction ou sens incorrect.

L'illustration des efforts sur cette figure permet d'anticiper certaines réponses aux questions suivantes, étude statique et condition de maintien de contact...

Question 2-5

Cette question, très classique dans ses objectifs, consiste à analyser le modèle de liaison proposé par l'énoncé, prévoir son caractère iso-hyperstatique, puis traiter l'étude statique du voussoir et **écrire le système d'équations associé**.

La première partie de la question, abordée par l'ensemble des candidats, a souvent été correctement traitée, en évaluant le degré d'hyperstaticité à 4. Une justification de ce résultat à partir des méthodes classiques d'analyse des mécanismes est appréciée. A contrario, l'absence de justification a amené une pénalité.

Il est à noter qu'un nombre non négligeable de candidats a estimé le degré de mobilité à 1... Sans doute ont-ils mal perçu la frontière du système isolé, et confondu le voussoir avec l'ensemble du préhenseur, qui est en liaison glissière avec son support.

La seconde partie de la question est une étude statique qui permet de valider l'analyse précédente, et de discuter ensuite du moyen de lever l'indétermination, puis de prévoir le mode de décollement du (des) contact(s).

Le nombre important d'actions à prendre en compte (10) a, semble-t-il, rebuté un grand nombre de candidats qui se sont contentés d'énoncer le principe fondamental de la statique.

Pourtant, les torseurs modélisant les actions ont des structures très simples, et conduisent à des calculs sans difficultés particulières. Par ailleurs, les quatre ponctuelles présentaient des analogies certaines dans leurs composantes et leurs positions. Le calcul du moment de la première pouvait s'appliquer aux autres, sous réserve d'adapter certains signes. Il en était de même pour les deux rotules.

Une étude de ce type met en évidence les capacités calculatoires du candidat, mais également ses qualités de rigueur et de méthode.

La correction des copies montre clairement que ceux qui ont traité cette question ont le plus souvent atteint le résultat.

Question 2-6

Le modèle de liaison retenu pour l'encastrement présente un degré d'hyperstaticité de 4... Quelles hypothèses peut-on émettre pour lever l'indétermination, et quelle sera la situation limite de maintien-rupture du contact entre voussoir et préhenseur.

Cette question est très ouverte dans la mesure où la réponse dépend des hypothèses formulées sur le comportement des liaisons.

Ce qui est attendu du candidat, c'est montrer sa capacité à proposer des hypothèses valides, et à en déduire les conséquences sur le système statique.

Une quinzaine de candidats seulement ont suivi cette démarche...

Question 2-7

Les résultats numériques de l'étude statique sont proposés sous la forme d'une courbe montrant l'effort d'aspiration nécessaire au maintien du contact, pour les positions successives du mécanisme.

Deux types d'attitude sont apparus :

- les tenants du premier groupe ont supposé que l'effort d'aspiration représenté était l'effort "réel", et qu'il variait au cours du mouvement. Difficile dans ces conditions de commenter la courbe et de proposer un coefficient de sécurité...
- les adeptes du second groupe ont correctement interprété la courbe, et la définition du coefficient de sécurité s'imposait d'évidence. La valeur numérique correcte (de l'ordre de 2) dépendait bien sûr d'une réponse exacte à la question 2-2 (effort d'aspiration).

La valeur de ce coefficient est évidemment insuffisante si du personnel se trouve dans la zone d'évolution de l'érecteur.

Ceci a conduit le constructeur à définir une procédure de pose des voussoirs très rigoureuse, excluant les opérateurs de la zone d'évolution de l'érecteur pendant leur mise en place, et en limitant l'intervention humaine à la phase de boulonnage.

Question 2-8

L'autre situation susceptible de provoquer la rupture de la liaison préhenseur - voussoir est la phase dynamique de déplacement du voussoir. Pour vérifier l'aptitude du système, il convient de traiter l'étude dynamique du voussoir...

Pour limiter les calculs, il était proposé de considérer globalement la liaison comme un encastrement, en lieu et place des quatre ponctuelles et deux rotules. Par ailleurs dans cette phase, les actions des joints de voussoirs ont disparu. Le nombre d'actions se réduit à 3 : pesanteur, aspiration et encastrement...

Le calcul du torseur dynamique est simple, sous réserve de connaître le principe de dérivation de vecteurs mobiles, et de ne pas projeter systématiquement dans le repère galiléen.

25 candidats seulement ont abordé cette question. La peur traditionnelle de la dynamique n'y est sans doute pas étrangère.

Question 2-9

Analogue à la partie statique, cette question propose d'évaluer le coefficient de sécurité du système dans la phase dynamique. L'analyse de la courbe montre que les effets dynamiques sont très modestes, et que le coefficient de sécurité est voisin de 3,5.

Troisième partie : étude géométrique du préhenseur

Cette partie de l'étude est destinée à valider la partie terminale de l'érecteur sous deux aspects :

- amplitude et principe de la commande du déplacement fin du voussoir ;
- définition de spécifications géométriques nécessaires au bon fonctionnement d'un élément de l'ensemble (vérin de balance).

Question 3-1

La partie terminale du préhenseur est chargée d'assurer un positionnement fin du voussoir au moment de son accostage avec les éléments voisins. Le modèle cinématique du mécanisme est proposé, le but étant de montrer l'aptitude du système à effectuer ces réglages.

L'analyse s'appuie sur l'exploitation de petits déplacements, modélisables par des torseurs.

55% des candidats seulement ont abordé cette question, peut-être par manque de temps, peut-être par méconnaissance du principe.

La définition du torseur des petits déplacements est généralement correcte, mais les conditions géométriques de déplacement des vérins ne sont que rarement bien exploitées.

La discussion finale porte sur le choix des paramètres connus et des inconnues à déterminer :

- les translations des vérins sont connues, quels sont les déplacements du voussoir ? Dans cette situation, il y a six équations et six inconnues, composantes du torseur des petits déplacements.
- le déplacement du voussoir est connu, quelles translations faut-il imposer dans les vérins ? Dans ce cas de figure, le problème comporte 6 équations et quatre inconnues (Δi). Il s'agit du problème posé à « l'opérateur », qui constate le déplacement à imposer pour amener le voussoir dans la position souhaitée, et doit en déduire la commande des vérins.

Question 3-2

L'analyse porte sur les courbes de simulation et montre le caractère quasi linéaire des relations géométriques.

46% des candidats ont abordé cette question et un certain nombre n'ont pas su interpréter les courbes et se sont trompés dans les valeurs de courses des vérins. Cette question pouvait être traitée sans avoir répondu à la précédente, mais les candidats ont manqué d'esprit d'analyse sur les trois graphiques en simultané.

Question 3-3

Seulement 32% des candidats ont abordés cette question, certainement parce qu'ils n'avaient pas répondu à la question 3.1. C'est dommage car l'exploitation devait se faire à partir des courbes. Le

principe de la méthode des petits déplacements n'est pas acquise pour bon nombre de candidats, ce qui fait qu'ils n'ont pas vu que le système de six équations n'était pas inversible et que seules les rotations étaient pilotées.

Question 3-4

Cette dernière question a été abordée par 80% des candidats et globalement, elle a été relativement bien traitée. L'analyse des conditions fonctionnelles a été bien faite, et ensuite les candidats ont mis en place des spécifications sur le plan sans conduire une démarche analytique permettant de mettre en évidence les spécifications géométriques relatives aux conditions de montage. Ceci est certainement lié à un manque de temps. La mise en place des spécifications n'est pas unique, aussi, dans le corrigé, il est fait état de deux modèles.

Il serait donc pertinent de mieux conduire une démarche formalisée pour obtenir ces spécifications géométriques.

Quatrième partie : conception du vérin central et de la liaison tête d'érecteur / table

Le travail de conception qui devait être réalisé portait sur deux vérins coaxiaux et la mise en place d'une liaison rotule. Les efforts étaient rappelés ainsi que la pression d'alimentation. Environ 60% des candidats ont abordé cette partie de conception. Il est important de constater que beaucoup de candidats ne savent pas calculer le diamètre du vérin à partir de la pression et de l'effort et qu'ils n'ont aucune notion d'ordre de grandeur. Certains ne sont pas surpris de trouver un diamètre de l'ordre du centimètre. D'autres appliquent ce qu'ils connaissent sur un vérin, c'est un fût, une tige avec un piston et une liaison rotule à chaque extrémité, sans regarder l'application. D'autres mettent un piston dans un fût totalement fermé, comment réalise-t-on le montage ?

La fonction étanchéité du vérin n'est pas bien traitée ou alors partiellement, c'est à dire que l'on met une étanchéité entre le piston et le fût mais pas entre le fût et la tige.

La liaison rotule a posé moins de problèmes aux candidats, à part sa taille.

Aucune réflexion n'a été menée sur les vis de fixation (nombre et diamètre), là aussi, les candidats n'ont pas de notion d'ordre de grandeur.

Globalement, il est dommage que les candidats n'aient pas mieux réussi ce travail car il ne comportait pas de grande difficulté de conception, le travail demandé était classique mais sur un mécanisme aux dimensions importantes.