

Commentaires des correcteurs de l'épreuve « d'analyse et de 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.

Première partie – Réalisation de la galerie :

Dans cette partie, il s'agissait d'analyser le principe de réalisation de la paroi interne du tunnel par anneaux voussoirs, et en particulier l'association de plusieurs anneaux pour suivre une trajectoire en virage.

Question 1-1 : Cette première question proposait de décrire sous forme de schéma le principe de creusement du tunnelier en situation de virage. Cette description obligeait 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 pouvait préciser la nature des liaisons des vérins avec les éléments d'appui : rotules nécessaires...

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

Question 1-2 : Il s'agissait 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 était admise.

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 remarques sont d'ailleurs valables pour l'ensemble des applications numériques du problème.

Questions 1-3 : Plus délicate, cette question traitait du rayon d'un virage associé à un groupe de deux anneaux. Il y avait au moins deux façons de répondre à cette question :

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

Peu de candidats ont abordé cette question et rares sont ceux qui lui ont apporté une réponse correcte. La description du positionnement tridimensionnel des solides est pourtant un des aspects fondamentaux de la mécanique générale.

De plus, il est particulièrement 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.

Deuxième partie – Etude 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.

Questions 2-1 : Cette première question proposait de définir les propriétés de masse du voussoir le plus volumineux. La plupart des candidats ont abordé cette question très classique.

Quatre paramètres étaient attendus :

- la masse :

sa détermination 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 a été correctement posée par beaucoup des candidats. Par contre, la mise œuvre et le calcul de l'intégrale associée (simple et classique) étaient 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 qui doit être modélisée par un torseur. Par conséquent il était nécessaire de préciser le point de réduction et les éléments de réduction de ce torseur projetés dans un repère clairement défini. Ce manque de rigueur s'est révélé assez constant chez certains candidats et a été source d'ambiguïté.

- la matrice d'inertie :

seule la structure de la matrice d'inertie était attendue. 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.

Questions 2-2 : Le but de cette question était d'évaluer l'effort d'aspiration du préhenseur sur le voussoir. Pour cela, il convenait 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 : fallait-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 permettait de lever le doute, quand il existait.

Se posait également le problème de la définition de l'effort : cet aspect a été correctement traité par de nombreux candidats, par contre, d'autres se sont limités 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**. Il convient également de se souvenir des hypothèses effectuées pour déterminer les surfaces et de proposer une valeur numérique avec un nombre approprié de chiffres significatifs.

Question 2-3 : L'objectif de cette question était d'évaluer les actions de compression des joints situés entre les voussoirs. Le modèle retenu est celui d'une répartition d'effort linéique uniforme. Le calcul a généralement été traité correctement, toutefois, pour certains candidats, il s'est limité à la résultante de l'action, en oubliant moment et point de réduction, et parfois la base de projection.

Questions 2-4 : Il s'agissait simplement d'illustrer des résultats établis précédemment. Cette question a généralement été correctement traitée. Toutefois, les imprécisions de la question précédente se sont traduites par des représentations ambiguës ou fausses : point d'application, direction, actions réciproques. Sur ce dernier point, rappelons qu'il est d'usage de représenter les efforts extérieurs agissant sur l'élément isolé.

Questions 2-5 : Cette question, très classique dans ses objectifs, consistait 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 beaucoup de 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 a généralement été proposée.

La seconde partie de la question était une étude statique qui permettait 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 de les lister et d'énoncer le principe fondamental de la statique.

Questions 2-6 : Le modèle de liaison retenu pour l'encastrement présentait un degré d'hyperstaticité de 4, il s'agissait de développer les hypothèses à émettre pour lever l'indétermination, et de déterminer la situation limite de maintien-rupture du contact entre voussoir et préhenseur.

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

Cette question permettait d'évaluer la capacité du candidat à proposer des hypothèses valides, et à en analyser les conséquences sur le comportement statique du système.

Très peu de candidats ont suivi cette démarche, mais certaines analyses étaient particulièrement pertinentes.

Questions 2-7 : Les résultats numériques de l'étude statique étaient 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 apparues :

- 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

Questions 2-8 : L'autre situation susceptible de provoquer la rupture de la liaison préhenseur – voussoir était la phase dynamique de déplacement du voussoir. Pour vérifier l'aptitude du système, il convenait 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 était relativement simple et a été correctement effectué par certains candidats qui ont ensuite correctement traité cette question.

Questions 2-9 : Analogue à la partie statique, cette question proposait 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.

Parmi les candidats qui ont abordé cette question, certains ont proposé une analyse pertinente mais beaucoup se sont contentés de décrire la courbe fournie au lieu de la commenter.

Troisième partie – Etude géométrique du préhenseur

Cette partie de l'étude était 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 était proposé, le but étant de montrer l'aptitude du système à effectuer ces réglages.

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

Les deux tiers des candidats ont abordé cette question, la définition du torseur des petits déplacements a été généralement correcte, mais les conditions géométriques de déplacement des vérins ne sont que rarement bien exploitées.

La discussion finale portait 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 portait sur les courbes de simulation et montrait le caractère quasi linéaire des relations géométriques.

La moitié des candidats a abordé cette question mais certains d'entre eux 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 certains candidats ont manqué d'esprit d'analyse sur les trois graphiques en simultané.

Question 3-3 : Un tiers seulement des candidats a abordé cette question, certainement parce qu'ils n'avaient pas répondu à la question 3.1.

Question 3.4 : Cette dernière question a été abordée par les deux tiers des candidats mais elle a été traitée de manière très hétérogène. Certains candidats ont su mener correctement une analyse des conditions fonctionnelles afin d'établir les conditions géométriques à mettre en place et à partir de ses conditions, ils ont écrit des spécifications. Mais il est à noter que l'écriture des spécifications ISO n'est généralement pas complètement maîtrisée. D'autres candidats se sont limités à écrire un ensemble de spécifications sans justification et sans cohérence. Il est important pour les futurs candidats d'avoir une démarche structurée permettant de mettre en évidence les spécifications géométriques relatives aux conditions de montage et de fonctionnement. La mise en place des spécifications n'est pas unique, les spécifications étant liées aux conditions fonctionnelles, aussi deux modèles possibles sont proposés dans le corrigé.

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. Les deux tiers des candidats ont abordé cette partie de conception. Il est important de constater que certains 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. Ils ne sont d'ailleurs 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 : étanchéité entre le piston et le fût mais pas entre le fût et la tige.

En dehors de sa taille, généralement inadaptée, la liaison rotule a posé moins de problèmes aux candidats.

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, en dehors de ces dimensions importantes.

Conclusion générale

En complément ou en rappel des recommandations déjà effectuées les années précédentes, les auteurs souhaitent insister sur le fait qu'une bonne préparation à l'épreuve de conception des systèmes conduit à :

- Posséder une culture des solutions techniques et une connaissance fine du comportement des composants technologiques.
- Etre capable de développer les supports schématiques adaptés à un besoin donné et ne pas se limiter au seul schéma de principe. En particulier savoir créer des schémas technologiques ou cinématiques comportant les éléments de repérage et de paramétrage utiles à la caractérisation du comportement d'un composant ou d'un système.
- Maîtriser les outils de décodage et d'écriture de spécifications ainsi que les procédés d'obtention.
- Développer des démarches d'analyse et de calcul rigoureuses en s'appuyant sur des connaissances précises des différents domaines de la mécanique.
- Consacrer un temps significatif à la lecture du sujet de manière à s'approprier les supports et à développer une vision globale de l'étude proposée.
- Respecter l'importance relative des différentes parties, les auteurs indiquent d'ailleurs systématiquement le temps qu'il convient de leur accorder.

Résultats

210 candidats ont composé lors de cette épreuve.

Si l'on excepte une copie totalement blanche, les notes s'échelonnent de 0,5 à 19, avec une moyenne à 8,0.

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

