

Epreuve écrite d'admissibilité :
ANALYSE ET CONCEPTION DES SYSTEMES
- Rapport du jury -

L'épreuve d'analyse et conception des systèmes, commune aux agrégations de mécanique et de génie mécanique, prenait appui sur un tramway monté sur pneumatiques, développé et réalisé par la société Lohr.

Cette épreuve, destinée à évaluer les connaissances des candidats dans les domaines de la mécanique du solide et de la construction, a été conçue de façon à ce que la difficulté soit graduelle, d'un niveau BTS à un niveau master.

L'objectif général consistait à mettre en évidence l'une des limites majeures d'une solution sur rails et de démontrer la faisabilité d'une solution sur pneumatiques.

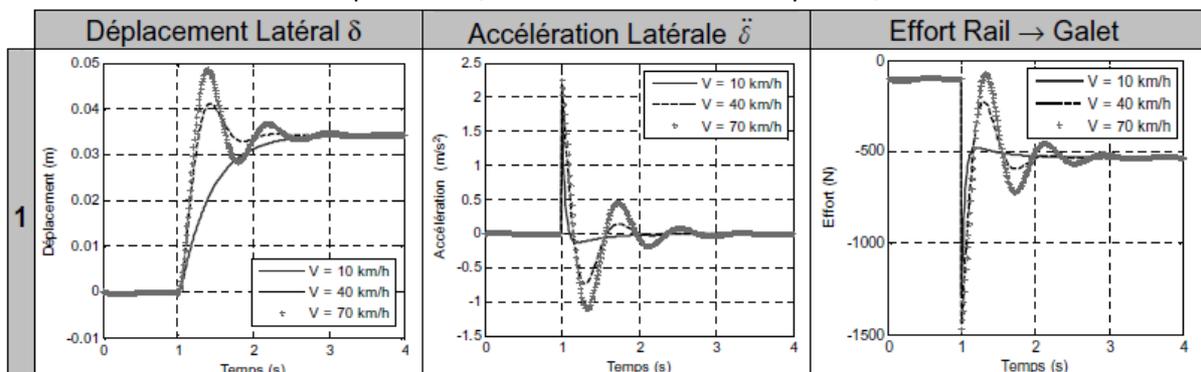
Les questions ont été rédigées à partir de problématiques auxquelles le constructeur a été confronté, parfois simplifiées afin de limiter la complexité des modèles correspondants.

La démarche adoptée est celle d'un bureau d'études. L'aspect purement mathématique de résolution d'une équation ou de systèmes d'équations plus ou moins complexes n'est donc pas demandé, étant traité par un ordinateur.

La démarche consiste à établir une modélisation du système étudié puis à effectuer sa mise en équations. Un outil de type schéma-blocs permet un tel travail de manière méthodique en identifiant, préalablement aux mises en équations proprement dites, les systèmes ou sous-systèmes qui nécessitent d'être successivement étudiés, les grandeurs dont la détermination s'avère nécessaire, et celles qui influent la détermination des précédentes. A l'issue de l'établissement des équations liant les grandeurs entrantes et sortantes, que celles-ci relèvent de la mécanique (cas de notre étude), de l'hydraulique, du génie électrique..., l'exploitation pourra se centrer sur :

⇒ Le calcul d'inconnues ;

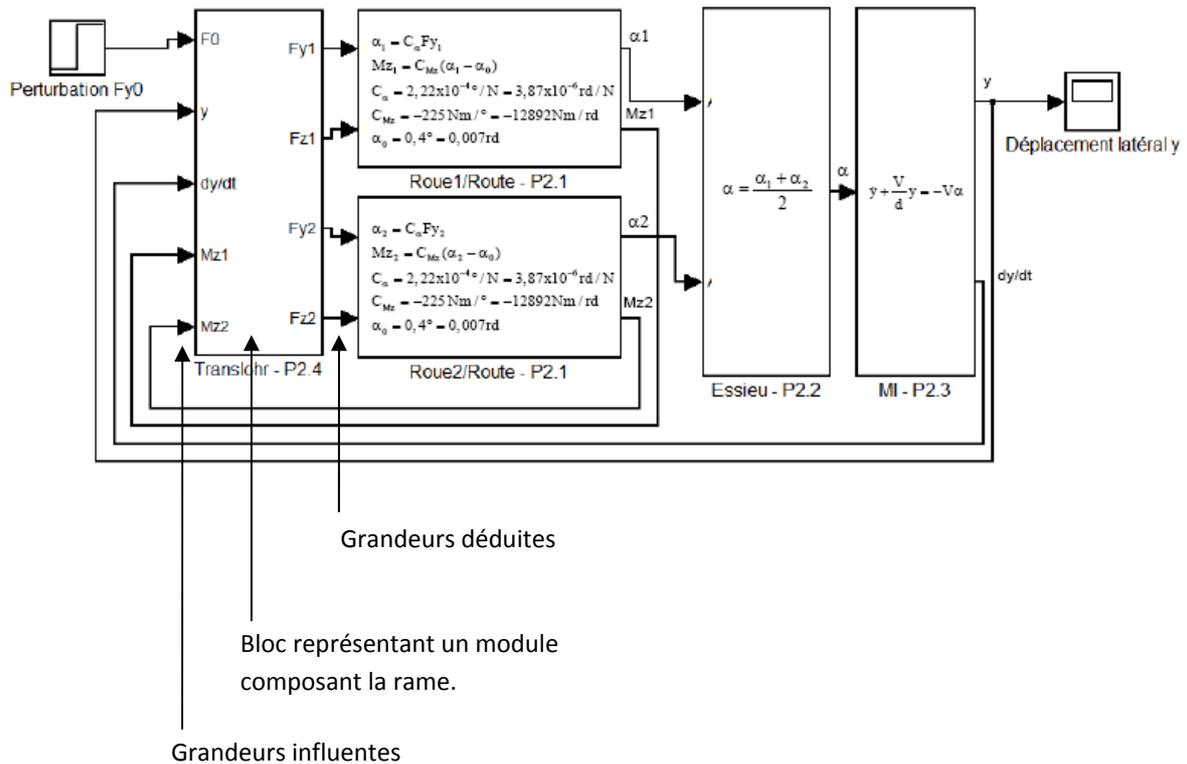
⇒ L'étude de l'influence d'un paramètre, voire la recherche d'un optimal ;



Extrait de DT6

⇒ La validation du modèle établi (ou la remise en cause de celui-ci) par confrontation avec des relevés de mesures.

Exemple de schéma blocs : l'objectif est l'étude du comportement dynamique de la rame sous l'effet d'une perturbation de type vent latéral.



Des résolutions simples, telles la solution d'une équation différentielle linéaire du premier ordre ou l'étude de l'équilibre d'un système soumis à l'action de trois forces ont néanmoins été demandées dans le sujet, l'utilisation d'outils de simulation, tel celui évoqué ci-dessus, ne se justifiant pas pour des calculs élémentaires.

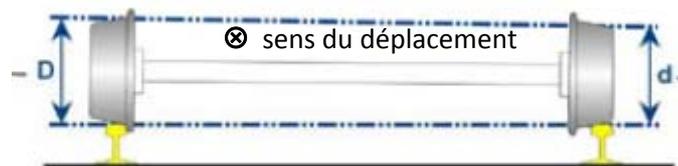
Partie 1 Etude comparative : solution sur rails - solutions sur pneus

La solution sur rail est, dans le cas d'un essieu, stable. Cela peut se démontrer de façon élémentaire, sans calculs :

Comportement souhaité : l'essieu est centré par rapport aux rails. Aucun des boudins ne frotte contre les rails.



Lors d'un déport, par exemple vers la gauche, le diamètre de la roue gauche au niveau du contact avec le rail droit est supérieur au diamètre de la roue droite au niveau du contact avec le rail, du fait de la conicité des roues. Comme les deux roues sont assujetties à tourner à la même vitesse, cette différence de diamètre provoque un déplacement de l'essieu vers la droite, le ramenant vers la position médiane.



Cette approche simple, si elle est valable sur le principe, ne peut se suffire à elle-même. Les questions Q1 à Q6 permettent de confirmer ce comportement mais mettent en évidence la nécessité d'un amortissement (au sens de l'automatisme) permettant d'éviter des oscillations entretenues. Cet amortissement est en particulier dû au frottement des roues sur les rails. Une étude dynamique plus complexe est alors nécessaire pour analyser précisément le comportement. Elle est en particulier fondamentale dans le cas de trains roulant à grande vitesse pour lesquels les oscillations latérales peuvent être génératrices d'inconfort.

Dans le cas d'un plancher plat les deux roues ne peuvent plus être reliées et ne sont donc plus assujetties à tourner à la même vitesse. Une étude très simple, par exemple en traduisant la minimisation de l'énergie potentielle de pesanteur de la rame, montrerait en quelques lignes que l'un des boudins vient nécessairement en contact avec le rail, ce qui engendre usure et grincement. Une autre conséquence est la vitesse maximale tolérée, bien inférieure à celle du Translohr.

La durée de l'épreuve ne permettant pas une étude complète du comportement d'un tramway sur rail, seule une mise en évidence de ce problème de stabilité latérale est demandée, faisant l'objet des questions Q1 à Q8.

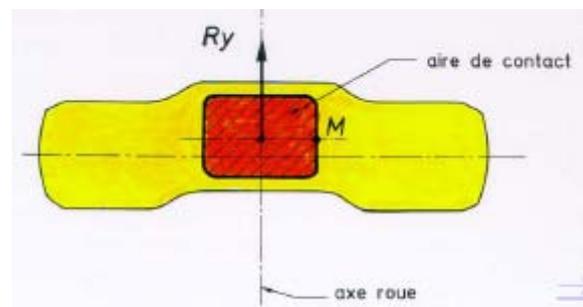
Ces questions, assez élémentaires, ont été traitées par la quasi totalité des candidats, et la plupart du temps avec succès, à l'exception de la question Q8 : peu de candidats ont compris la conséquence d'un désaccouplement des roues d'un même essieu.

La solution retenue par Lohr est une solution sur pneus.

Le pneumatique est un solide déformable au comportement complexe. Intéressons-nous à son comportement sous l'action d'une sollicitation latérale :

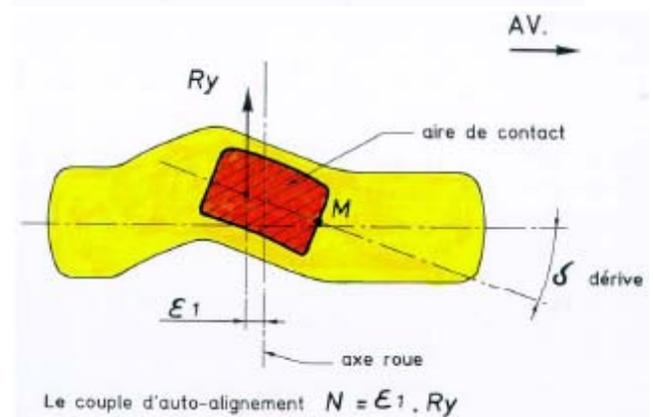
Comportement statique

Soumis à un effort latéral, le pneumatique se déforme. Apparaît fort logiquement un déplacement latéral.



Comportement dynamique

Lors d'un déplacement du véhicule, la partie arrière de la zone de contact du pneumatique avec le sol est plus déformée que la partie avant, qui vient d'entrer en contact avec le sol et était donc préalablement non déformée. La résultante des actions exercée par la chaussée sur le pneumatique n'est donc plus centrée. Apparaît alors un moment, appelé moment d'auto-alignement.



On se rapportera utilement à la littérature relative à la modélisation de la déformée d'un pneumatique ("*Dynamique des véhicules routiers*" de Charles Deutsch et "*Dynamique du véhicule – Modélisation des systèmes complexes*" de Jean-Pierre Brossard en particulier).

Le moment d'auto-alignement est à prendre en compte dans l'étude du comportement dynamique de la rame. C'est l'objet de la seconde partie du sujet.

Les questions Q9 à Q14 ont pour objet une étude purement cinématique du comportement du système de guidage imaginé par Lohr.

Celle-ci ont été traitées par une très grande partie des candidats, et plutôt correctement.

Le Translohr possède des caractéristiques propres intéressantes, telles :

- une vitesse maximale importante : 70 km/h
- une capacité de franchissement de pentes importantes : 13%
- un faible rayon de giration : 10,5 m

L'emprise à réserver sur la chaussée pour la circulation de ce tramway dépend du rayon de giration minimal, de la largeur des rames ainsi que du déport des modules composant la rame dû au choix du système de guidage.

Les questions Q15 à Q18 avaient pour objectif la détermination de cette emprise. Correspondant à des constructions géométriques, ces questions ont été plutôt bien traitées par les candidats qui les ont abordées (environ 40 %).

Partie 2 Validation du comportement du Translohr

Cette partie avait pour objectif d'établir un modèle du Translohr exploitable numériquement, permettant de simuler et valider son comportement. Le comportement dynamique de la rame sous l'effet d'une perturbation de type vent latéral était en particulier analysé.

Chaque sous-partie permet de construire une partie du modèle global présenté sous la forme d'un schéma-blocs.

La première sous-partie était centrée sur la modélisation pneumatique-sol. En effet, un pneumatique étant déformable (indépendamment de la déformation latérale sous effort évoquée précédemment), son comportement est complexe et ne peut pas être modélisé par un simple roulement sans glissement dès lors qu'on cherche à obtenir un modèle réaliste.

Les questions Q19 à Q20 avaient pour objectif de modéliser la liaison pneumatique-sol en utilisant le modèle de Pacejka. Il s'agissait ici d'analyser le modèle proposé et de le linéariser au vu des conditions d'utilisation.

60 % des candidats ont abordé cette partie. Ces questions ont été bien traitées par 35 % d'entre eux.

Les seconde et troisième sous-parties reprenaient l'étude de la partie 1 relative au comportement cinématique du translohr, mais en remplaçant le modèle de roulement sans glissement par le modèle de Pacejka étudié précédemment.

Les questions Q21 à Q22 permettaient de visualiser graphiquement les vitesses des centres des roues en utilisant la notion d'angle de glissement.

80 % des candidats ont abordé cette partie et environ 40 % l'ont traitée correctement.

Concernant la mise en équation, objet des questions Q23 à Q24, 17 % des candidats l'ont réalisée intégralement et correctement.

La partie 2.4 était scindée en trois sous-parties.

La première permettait, à partir d'une étude dynamique très simplifiée, d'étudier l'incidence des différents paramètres sur le comportement du Translohr et d'en déduire des préconisations techniques permettant d'améliorer son comportement.

La seconde s'attachait à définir un modèle de comportement dynamique complet utilisable industriellement. Dans cette partie, seule la démarche était demandée afin d'éviter que les candidats ne se lancent dans des calculs longs et complexes.

Les questions Q25 à Q30 constituaient la partie difficile du sujet. 20 % des candidats les ont abordées. Deux candidats ont proposé un modèle réellement pertinent à la question Q29.

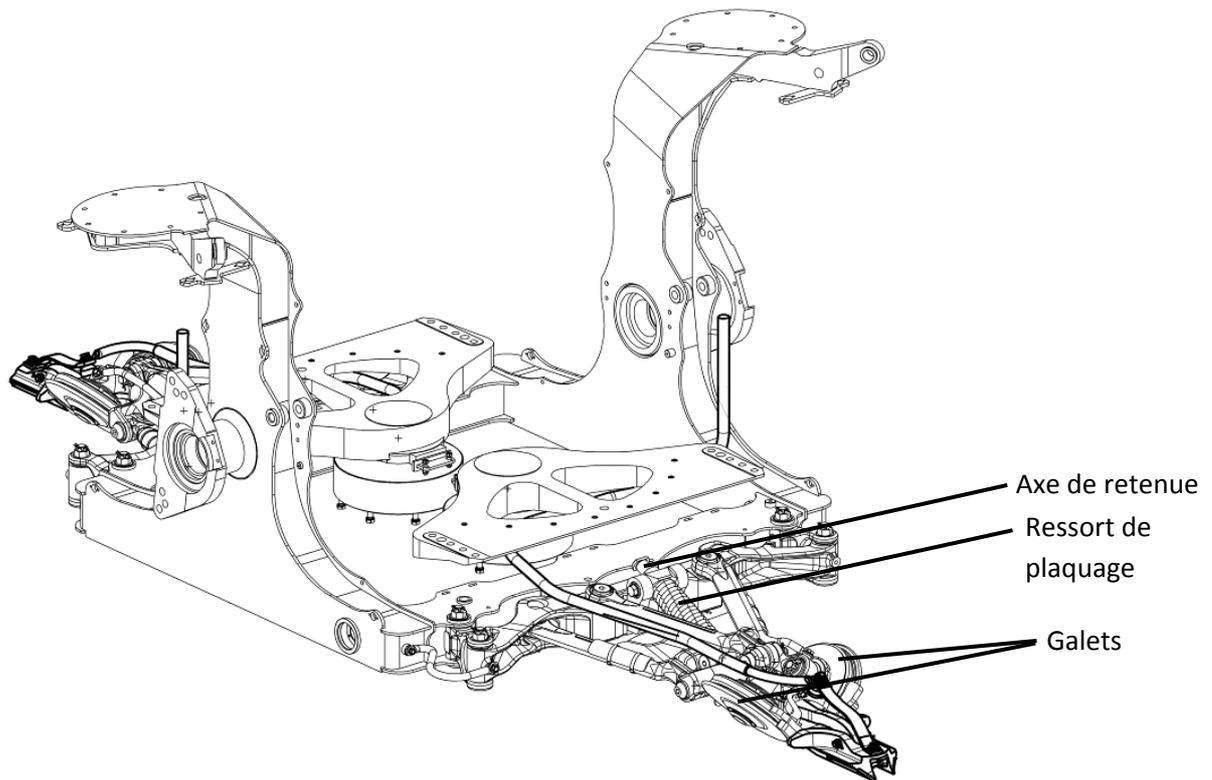
La dernière sous-partie consistait à analyser les résultats de simulation issus du modèle élaboré précédemment.

La plupart des candidats qui ont abordé la question Q31 (40% environ) l'ont traitée correctement. Le jury a particulièrement apprécié les réponses des candidats qui ont fait une critique détaillée et argumentée des simulations proposées.

Partie 3 Définition du système de guidage

Le guidage d'un module intermédiaire MI est assuré par deux dispositifs de guidage disposés symétriquement par rapport à l'axe de l'essieu, assurant l'interface rail / essieu porteur. L'organe de guidage lié au rail est composé de deux galets à axes inclinés.

Les galets sont plaqués sur le rail grâce à un ressort. L'axe de retenue permet de limiter le débattement vertical du dispositif de guidage.



Le travail demandé dans cette partie consistait à définir et dimensionner certains éléments du dispositif de guidage. Il s'agissait en particulier de :

- dimensionner le ressort de plaquage ;
- dimensionner l'axe de retenue ;
- spécifier le porte galet ;
- concevoir le système de débrayage du système de guidage.

Détermination du ressort de plaquage

Il s'agissait ici de déterminer l'effort minimal que doit fournir le ressort de plaquage à partir des données du cahier des charges.

La plupart des candidats ont traité correctement la question Q32. En revanche seul 15% d'entre eux ont été capables de traiter un problème de statique plane simple, objet de la question Q33.

Même si aujourd'hui les outils de simulation permettent de s'affranchir des calculs lourds, il reste primordial d'être capable de conduire des calculs simples analytiquement ou graphiquement lorsque l'usage de la simulation ne s'impose pas.

Dimensionnement de l'axe de retenue

Cette partie, consistait à :

- définir les critères intervenant dans le choix du matériau de l'axe de retenue ;
- proposer un mode de réalisation, les traitements éventuels ainsi que les essais à réaliser ;
- calculer la limite élastique minimale.

La plupart des candidats ont traité correctement les questions Q34 et Q35 concernant les critères de choix de matériaux et les procédés. En revanche, comme pour la partie précédente, seuls 20% des candidats arrivent au bout du calcul de dimensionnement (Q36).

Spécifications du porte galets

Dans cette partie, il s'agissait de calculer le degré d'hyperstatisme du mécanisme de guidage et d'en **déduire** les contraintes géométriques à imposer aux différentes pièces constituant le mécanisme.

La question Q37 sur le calcul du degré d'hyperstatisme a été abordée par la plupart des candidats mais beaucoup ne conduisent pas une analyse rigoureuse. De nombreuses conclusions s'avèrent, de ce fait être non pertinentes. D'autre part, un trop grand nombre de candidats tentent de coter la pièce sans analyse préalable et sans s'appuyer sur le calcul demandé alors que la cotation est le résultat d'une analyse rigoureuse et ne peut se faire "à l'instinct".

Enfin, beaucoup de candidats ne maîtrisent pas les rudiments propres à l'écriture d'une spécification géométrique.

Conception du mécanisme de débrayage du système de guidage

Il s'agissait de proposer sous forme de croquis ou schémas légendés deux solutions technologiques du dispositif de verrouillage.

La question Q38 a été abordée par 45% des candidats. La plupart de ceux-ci ont proposé des solutions intéressantes.

Résultats globaux

De très nombreux candidats ont abordé l'ensemble du sujet, ce qui mérite d'être souligné.

Le jury a apprécié : les qualités d'analyse de beaucoup d'entre eux vis à vis des résultats de simulations, des propositions de critères de choix de matériaux ainsi que des propositions de solutions techniques.

En revanche, beaucoup de candidats ne savent pas conduire un calcul de statique simple, ce que l'on peut regretter, de même que la grande difficulté à comprendre la méthodologie d'identification de la nécessité de telle ou telle spécification géométrique.

Histogramme et statistiques

75 candidats ont composé cette épreuve.

Moyenne : 7,5

Note mini : 0,4

Note maxi : 15,5

Ecart type : 4,0

La distribution des notes est la suivante :

