

TD N°19 - Ferromagnétisme

La suspension sur un véhicule est le terme donné au système composé des ressorts, des amortisseurs et des liaisons mécaniques qui connectent le châssis du véhicule aux roues.

Dans une suspension, l'amortisseur joue un rôle central en répondant à un double objectif : il contraint l'élasticité du ressort de suspension et limite ainsi les mouvements oscillatoires du véhicule ; il freine le rebond des roues sur les obstacles et maintient celles-ci en contact avec le sol.

La modification continue de l'état de la route et des exigences sur la tenue en virage oblige à modifier les caractéristiques de réponses des suspensions. C'est le cas de cette suspension qui est capable de faire varier la raideur de l'asservissement roue par roue. Pour contenir les mouvements de caisse et préserver le confort sur chaussée dégradée, la vitesse de déplacement de la suspension devra être très précise.

Ce sujet concerne donc la caractérisation d'un nouveau type de suspension utilisant un fluide magnéto-rhéologique et son asservissement.

Les exigences désirées par les constructeurs l'utilisant (Audi, Ferrari,...) sont fournies et représentées dans le **tableau 1**.

Exigences	Critères	Valeur
1.1 La suspension doit être rapide pour s'adapter à la route	Temps de réponse à un échelon ($Tr_{5\%}$)	< 35 ms
1.2 Le système doit résister au poids de la voiture	Charge maximale sur l'amortisseur	< 800 kg
1.3 L'asservissement du système doit être stable	Marge de phase	> 45°

Tableau 1

Objectif

Modéliser l'écoulement du fluide dans l'amortisseur et montrer que l'amortisseur exerce sur la roue une force d'amortissement de la forme $\vec{F} = -\alpha \vec{V}$ où $\vec{V}$ est la vitesse de la roue perpendiculairement à la route.

L'amortisseur est constitué d'un fluide enfermé dans un cylindre de révolution d'axe $(O\vec{z})$. À l'intérieur de ce cylindre se trouve un piston, de même diamètre que le cylindre, percé d'une valve. On suppose que le piston coulisse sans frottements à l'intérieur du cylindre.

Le fluide enfermé dans le cylindre est ici une huile, que l'on supposera newtonienne (en absence de champ magnétique) et incompressible. Lorsque le véhicule roule sur une anfractuosité de la route, le piston se déplace dans le cylindre et le fluide passe d'un coté à l'autre du piston en s'écoulant par la valve.

Le corps du piston est constitué d'un matériau ferromagnétique doux (acier) et d'une bobine parcourue par un courant électrique d'intensité i . Le tout forme un circuit magnétique dont la valve est l'entrefer.

Données et notations utilisées

Les données ci-dessous sont celles de l'amortisseur de taille réduite utilisé pour réaliser les expériences :

- coefficient de viscosité dynamique de l'huile MR : $\eta = 1,0 \text{ Pa.s}$;
- masse volumique de l'huile MR : $\rho = 3,0 \text{ kg.L}^{-1}$;
- perméabilité magnétique relative de l'acier : $\mu_1 \simeq 5\,000$;
- perméabilité magnétique relative de l'huile MR : $\mu_2 \simeq 2,5$;

- rayon du piston (S_p sa surface) : $r_p = 10 \text{ mm}$;
- rayon interne de la valve : $r_1 = 7,0 \text{ mm}$;
- rayon externe de la valve : $r_2 = 8,0 \text{ mm}$;
- rayon moyen de la valve : r_m ;
- circonférence moyenne de la valve : $w = 2\pi r_m$;
- épaisseur de la valve : $e = 1,0 \text{ mm}$;
- longueur du piston : $L = 20 \text{ mm}$;
- vitesse caractéristique de déplacement du piston : $0 < V_0 < 100 \text{ mm.s}^{-1}$;
- intensité du courant électrique circulant dans la bobine : i ;
- nombre de spires (jointives) de la bobine : N ;
- rayon interne de la bobine : $r_0 = 3,0 \text{ mm}$;
- hauteur de l'entrefer : $h = 1,0 \text{ mm}$;
- développements limités en 0 :
 - $(1+x)^\alpha \underset{x \rightarrow 0}{=} 1 + \alpha x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2} x^2 + o(x^2)$;
 - $\ln(1+x) \underset{x \rightarrow 0}{=} x - \frac{x^2}{2} + o(x^2)$;
- lors des applications numériques, on utilisera les données suivantes :
 - $16\pi \approx 50$;
 - $\frac{\pi}{16} \approx 0,1963$.

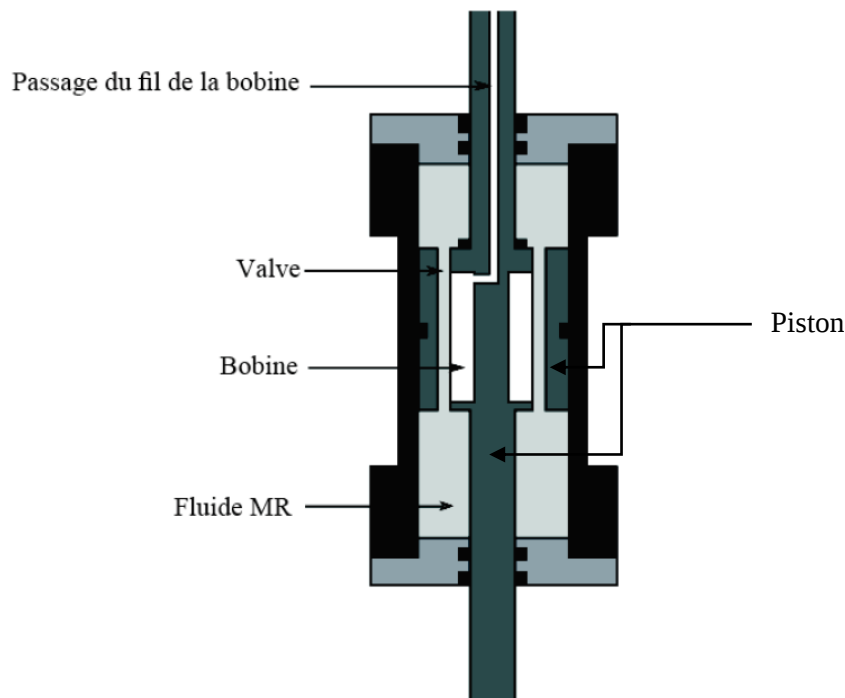


Figure 4 – Amortisseur à fluide magnétorhéologique

Sur les **figure 5.(b)** et **figure 5.(c)** et dans toutes les suivantes, le fluide circule dans la partie annulaire en gris foncé.

III.2 Influence du caractère ferromagnétique du fluide

Objectif

Caractériser le facteur d'amortissement α de l'amortisseur.

Le fluide magnétorhéologique est une suspension colloïdale de particules ferromagnétiques (typiquement du fer) d'un diamètre compris entre $0,1 \mu\text{m}$ et $10 \mu\text{m}$. Les particules ferromagnétiques s'organisent sous forme d'agrégats sous l'action d'un champ magnétique et altèrent les propriétés du fluide qui semble changer de viscosité d'un point de vue macroscopique. Sous l'action d'un champ magnétique, les particules ferromagnétiques s'organisent sous forme de chaînes selon la direction du champ magnétique $\vec{B}$ (figure 7). Le mécanisme de formation des agrégats lors de l'application d'un champ magnétique est représenté figure 8.

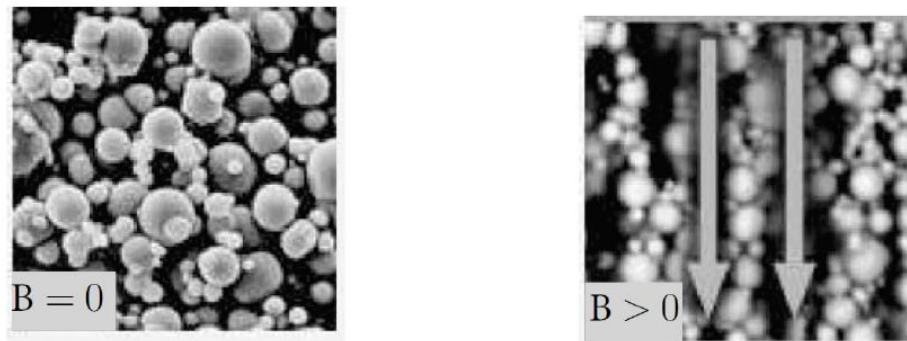


Figure 7 – Image au microscope électronique des particules ferromagnétiques du fluide MR sans champ magnétique (à gauche) et en présence d'un champ magnétique (à droite)

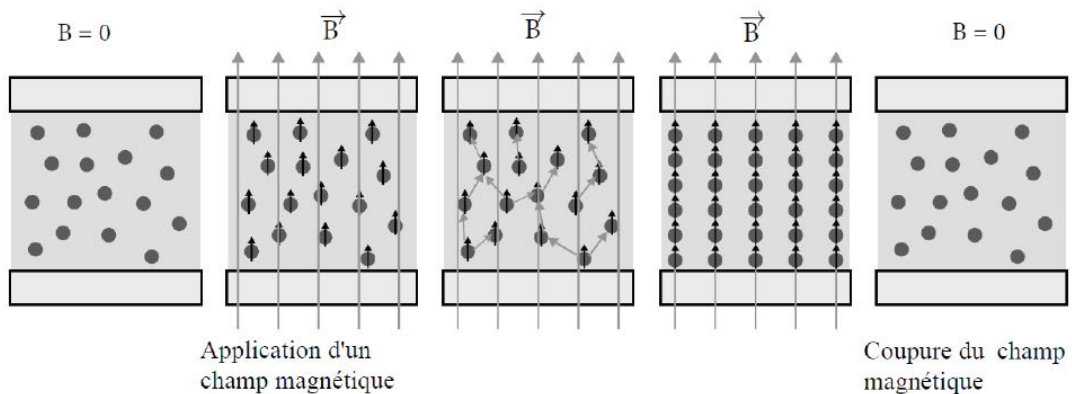


Figure 8 – Schématisation de la formation des agrégats de particules de fer lors de l'application d'un champ magnétique

- Q16.** En présence d'un champ magnétique, expliquer qualitativement la formation des agrégats de particules ferromagnétiques (figure 8).
- Q17.** En considérant la figure 9, sur quelle plage de vitesse peut-on considérer que l'amortisseur exerce sur la roue une force d'amortissement de la forme $\vec{F} = -\alpha(H)\vec{V}$? Est-ce acceptable?
- Q18.** Le temps de formation caractéristique des agrégats est de 3 ms. Ce temps de réponse est-il acceptable?

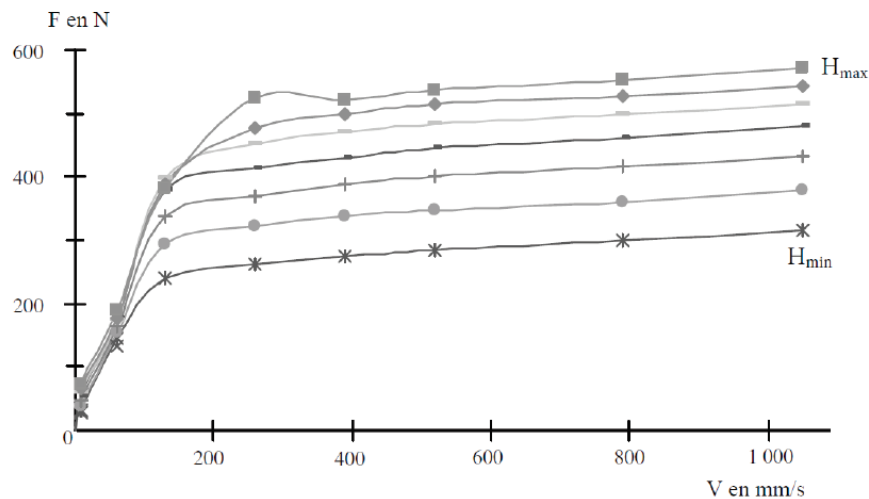


Figure 9 – Évolution de la norme de la force d’amortissement F en fonction de celle de la vitesse du piston V pour différentes valeurs de l’excitation magnétique H dans la valve

III.3 Modélisation du circuit magnétique et du circuit électrique de la bobine

Objectif

Modéliser le circuit magnétique et le circuit électrique permettant de contrôler α . Vérifier que le temps de réponse du système est en accord avec le cahier des charges.

Le circuit magnétique du piston est représenté **figure 10**. On supposera que l’acier et le fluide MR sont des milieux ferromagnétiques doux. Le vecteur excitation magnétique est noté $\vec{H}$ et on suppose que le circuit magnétique canalise la totalité des lignes de champ magnétique. On négligera les pertes fer dans l’acier.

Les matériaux doux seront supposés linéaires de perméabilité magnétique $\mu = \mu_0 \mu_r$, où μ_r est la perméabilité magnétique relative.

Q19. Rappeler la relation liant le champ magnétique et l’excitation magnétique dans ces milieux. Donner les équations de Maxwell-Ampère et Maxwell-Thomson correspondant à ces deux champs.

Q20. Définir ce qu’est l’approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS) et simplifier l’équation de Maxwell-Ampère dans ce cadre.

On se place maintenant et pour toute la suite dans le cadre de l’ARQS.

Q21. Démontrer le théorème d’Ampère à partir de l’équation de Maxwell-Ampère ci-dessus.

On considère un solénoïde infiniment long de section circulaire de rayon δ , comportant n spires jointives par unité de longueur régulièrement réparties et parcourues par un courant d’intensité i .

Ce solénoïde est rempli d’un noyau de matériau ferromagnétique doux.

Q22. Que pouvez-vous dire des lignes de champ des vecteurs excitation magnétique et champ magnétique dans ce solénoïde infini ?

- Q23.** Déterminer l'expression du champ magnétique à l'intérieur de ce solénoïde en supposant le champ nul à l'extérieur.
- Q24.** Dessiner l'allure des lignes de champ magnétique dans le cas d'un solénoïde de longueur finie. Rappeler le lien entre l'équation de Maxwell-Thomson et l'allure des lignes de champ que vous venez de tracer.
- Q25.** Dans le cas du solénoïde infini, exprimer le flux magnétique φ à travers une spire.

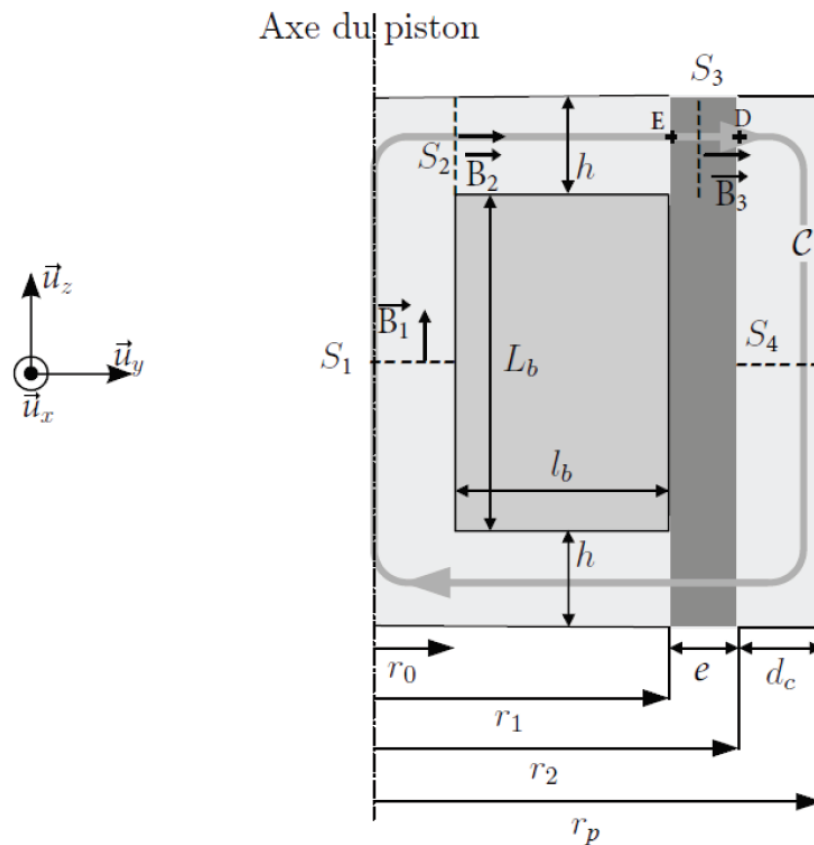


Figure 10 – Schématisation du circuit magnétique du piston

- Q26.** On note N_t le nombre total de spires et l la longueur du solénoïde. Exprimer, toujours en considérant le solénoïde comme infini, le flux propre Φ_p à travers les N_t spires. En déduire l'expression de l'inductance propre L_p de ce solénoïde.

On considère que le vecteur excitation magnétique et le champ magnétique sont uniformes au niveau de la bobine et dans l'entrefer.

On note :

$$\vec{H}_1 = H_1 \vec{u}_z \text{ et } \vec{B}_1 = B_1 \vec{u}_z \text{ au niveau de la bobine ;}$$

$$\vec{H}_3 = H_3 \vec{u}_r \text{ et } \vec{B}_3 = B_3 \vec{u}_r \text{ entre E et D (entrefer).}$$

- Q27.** Au vu de ce qui précède, justifier cette modélisation.

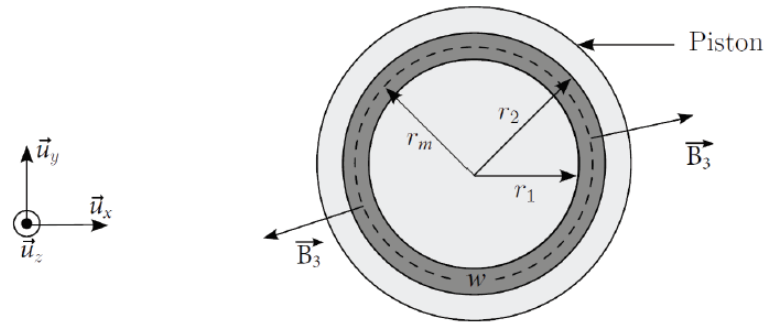


Figure 11 – Vue en coupe transversale du piston

Q29. Donner la relation liant B_3 , B_1 , la section $S_1 = \pi r_0^2$ de la partie interne du piston, le rayon moyen r_m de l'entrefer et la hauteur h de l'entrefer. Une vue en coupe transversale du piston est représentée **figure 11**.

Q30. Évaluer la norme du champ magnétique le long du contour C , représenté sur la **figure 10**. En déduire que la circulation de $\vec{H}$ sur le contour C , vérifie :

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} \approx 2eH_3. \quad (8)$$

Q31. Appliquer le théorème d'Ampère au contour C . En déduire qu'une modification de l'intensité du courant circulant dans la bobine permet de modifier le facteur d'amortissement α de l'amortisseur.

Q32. Montrer que l'inductance propre L' de la bobine vérifie, en présence du fluide, $L' = \mu_2 L_0$ où L_0 est l'inductance propre de la bobine en absence de fluide ($\mu_2 = 1$).