

TD Mécanique

Simulation Multiphysique

Objectif de la séquence :

- Valider la compatibilité entre les modèles théoriques et les résultats de simulation,
- Simuler, analyser les résultats associés et modifier le cas échéant le modèle.

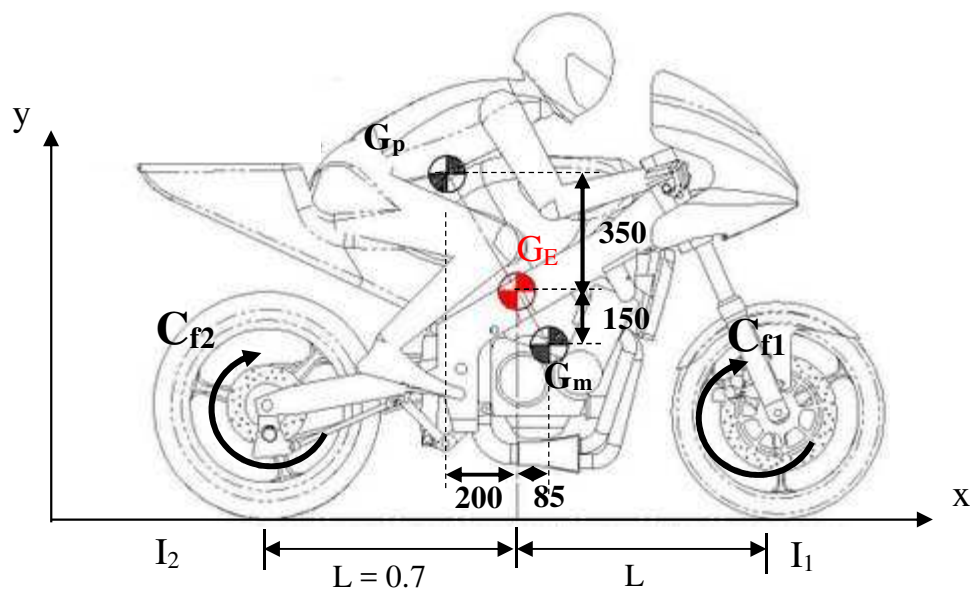


On étudie le comportement d'une moto lors d'un freinage. Dans un premier temps on étudiera le modèle 1D d'une suspension soumise à différentes sollicitations.

Ensuite, à l'aide d'un modèle 2D, on étudiera les apports d'un système d'aide au freinage: le transfert de charge.

Données :

- Masse du pilote : $m=90$ kg
- Masse de la moto : $M=210$ kg
- Masse d'une roue : $m_R = 12$ kg
- Pour le calcul des inerties, on assimile la moto à un parallélépipède de dimension $h \times L \times l = 50 \times 150 \times 40$ cm de centre de gravité G_m et le pilote à un autre parallélépipède de dimension $130 \times 40 \times 30$ cm de centre de gravité G_p .
- Diamètre de la roue : $D = 50$ cm
- Raideur des ressorts de chaque suspension : $20\,000$ N/m

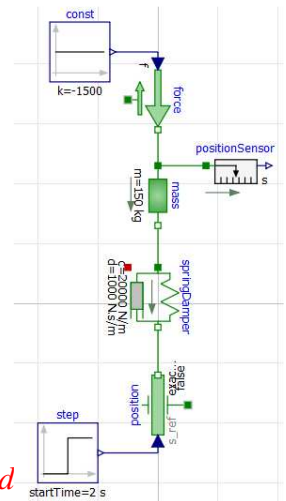


PARTIE 1 : Modèle 1D

Le modèle ci-contre (fichier « suspension_simple.mo ») représente une suspension soumise à un échelon en position de 5 cm (passage d'un trottoir)

Question 1 : Simuler le modèle pour différentes valeurs de raideur et d'amortissement et relever la fréquence des oscillations, l'amplitude du déplacement, le nombre d'oscillations avant le retour à l'équilibre.

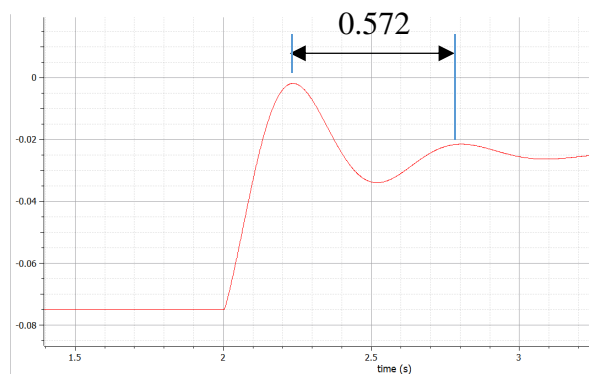
Conclure sur leur influence sur le comportement de la masse.



L'augmentation de la raideur du ressort diminue l'amplitude des oscillations et d période de la partie transitoire.

L'augmentation de l'amortissement diminue l'amplitude du dépassement et le nombre d'oscillations avant le retour au régime établi.

La fréquence de la partie transitoire est de 1.75 Hz (période de 0.572 s)



On souhaite maintenant analyser le comportement de la suspension à une source d'oscillation sinusoïdale (déformation de la route par exemple).

Application : Remplacer la source de type échelon par une source sinusoïdale (Blocks/sine) de demi amplitude 2.5 cm et de fréquence 0.55 Hz.

Question 2 : Simuler le modèle et interpréter les résultats.

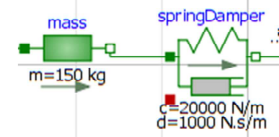
Question 3 : Simuler à nouveau le modèle en modifiant la fréquence de la source avec une fréquence de 1.1 Hz, 2Hz puis 4Hz.

Question 4 : Argumenter vos résultats de simulation en comparant vos résultats avec la pulsation propre de la suspension : $\sqrt{k/m}$. (en rad/s)

Le PFD de notre système s'écrit de la façon suivante :

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = F$$

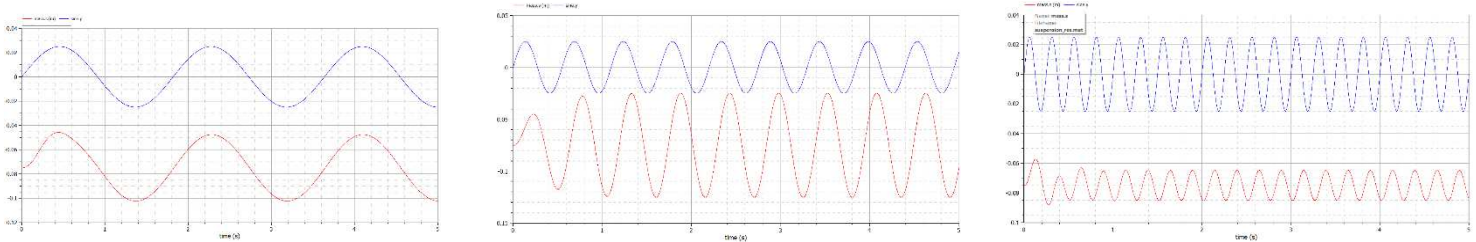
La résolution de cette équation nous amène à une réponse $x(t) = X_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$



Avec $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \sqrt{\frac{k}{m}}$ Dans notre cas, on retrouve $f = 1.84$ Hz. (Similaire question à la Q1)

Plus on s'écarte de cette fréquence de résonance, plus le signal d'entrée (aspérités de la route) est amorti. A l'approche de cette fréquence, il y a résonance, le signal d'entrée est amplifié. (voir courbes ci-dessous)

On cherche à limiter ce phénomène de résonance pour des soucis de confort et de détérioration accélérée des composants.

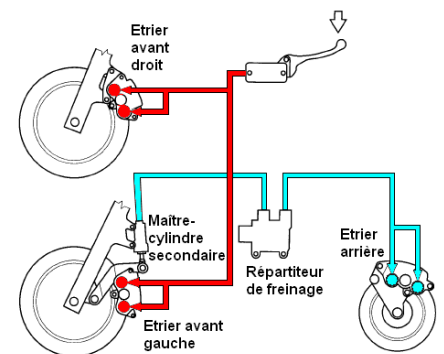


Signal d'entrée en bleu (sol) et sortie en rouge (masse) pour des fréquences de 0.55, 1.84 et 4 Hz

PARTIE 2 : Modèle 2D – Répartiteur de freinage

On souhaite maintenant étudier le système de répartition de l'effort de freinage d'une moto (il existe l'équivalent pour les voitures) nécessaire pour compenser le transfert de charge lors de la décélération plus ou moins violente de la moto.

Image ci-contre du système "Dual CBS" incluant le répartiteur de freinage



Paramètres du modèle :

Application : Ouvrir le modèle "suspension_moto". Ajouter les paramètres manquants (inerties et masses de l'ensemble {moto+pilote}) issus des TDs de préparation (partie moment d'inertie)

On ajoute la masse et le moment d'inertie de l'ensemble moto+pilote sur le composant « body » (300 kg et 78.5 kg.m² → voir la correction du TD moment d'inertie)

Simuler le modèle avec un temps de simulation de 5s sur 5000 points de mesure.

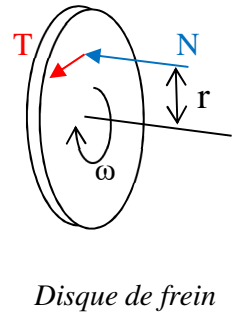
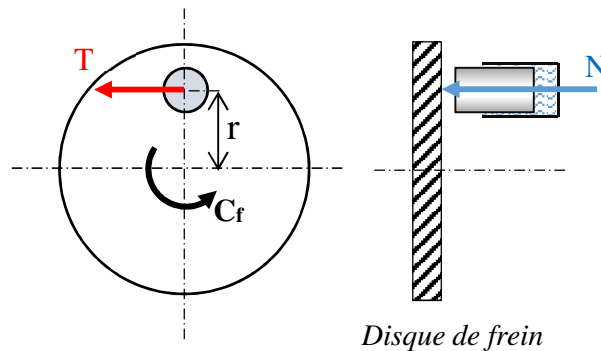
On simule un freinage appuyé (effort maxi obtenu en 0.1s)

Vérification du modèle :

Question 5 : Vérifier le résultat numérique obtenu sur les TDs de préparation (partie PFS – compression des ressorts)

Voir correction des TDs – partie PFS : L'équilibre statique est obtenu pour une compression des ressorts de 0.075 m. En traçant le s_rel des SpingDamper, on retrouve cette valeur à l'état initial du calcul.

La pression dans le circuit de freinage est de 14 bar. L'étrier de frein de la roue avant est composé de 4 pistons de diamètre 28 mm. Ils entrent en contact avec le disque sur un rayon moyen de $r = 120$ mm. Le coefficient de frottement plaquette / disque est de 0.5.



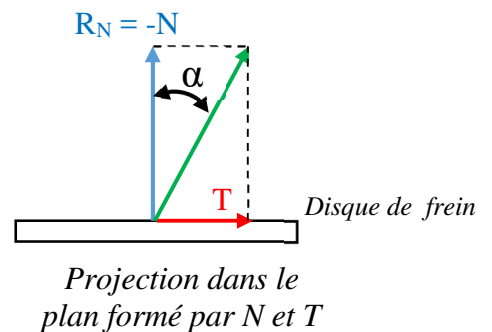
Question 6 : Calculer l'effort normal N sur un disque puis, à l'aide de la loi de coulomb, calculer l'effort tangentiel T et le couple de freinage C_f correspondants.

L'application d'un effort N sur le disque de frein génère une force de frottement T sur le disque, proportionnelle au coefficient de frottement « f » entre le piston de l'étrier et le disque. On a :

$$f = \tan(\alpha) = \frac{R_N}{T}$$

Cette force de frottement T génère un couple de freinage autour de l'axe de rotation de la roue :

$$C_f = T \cdot r = r \cdot R_N / f$$

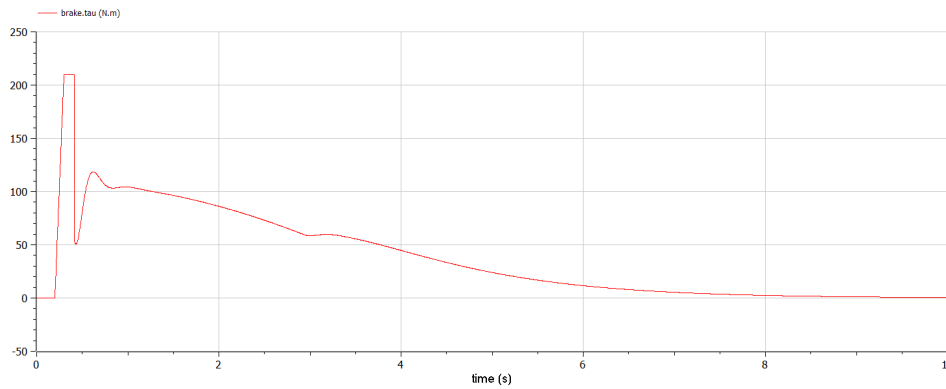


*Avec $N = 3500$ N (14 bar sur 4 diamètre de 28mm $\rightarrow 14 \cdot 10^5 * 4 * \pi * 0.028^2 / 4$), $r = 0.012$ m et $f = 0.5$, on a :*

$$C_f = 210 \text{ N.m}$$

Vérifier le résultat numérique sur la simulation

En traçant le résultat « tau » sur les composants « brake », on retrouve cette valeur de 210 N.m



Question 7 : En traçant différentes courbes, **relever les différentes informations** suivantes :

- ✓ Distance d'arrêt de la moto → *33.8 m (body, r[1])*
- ✓ Inclinaison maximale de la moto lors du freinage → *0.085 radians (body, phi)*
- ✓ Décélération de la moto en régime établi → *-3.6 rad/s² en moyenne (body, a[1])*

On souhaite vérifier cette dernière valeur.

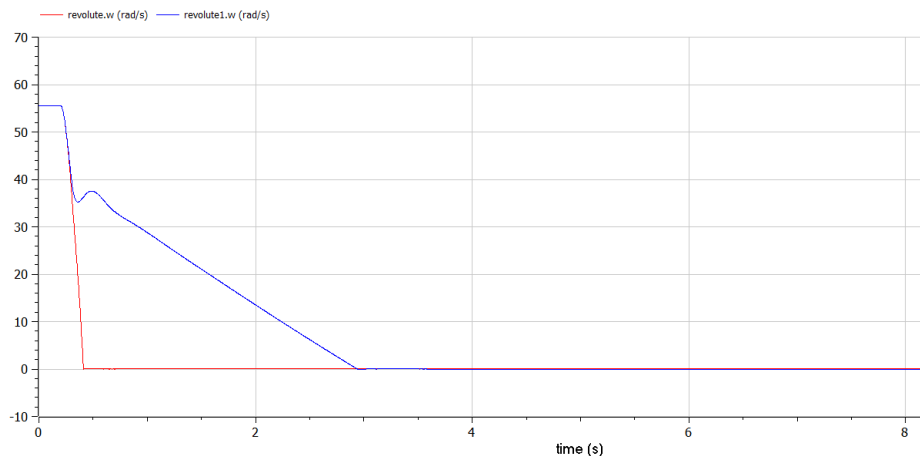
Par application du théorème de l'énergie cinétique sur un modèle simple sans suspension, vous avez montré lors des TDs précédents que la décélération de la moto est fonction des couples de freinage appliqués sur les roues par la relation :

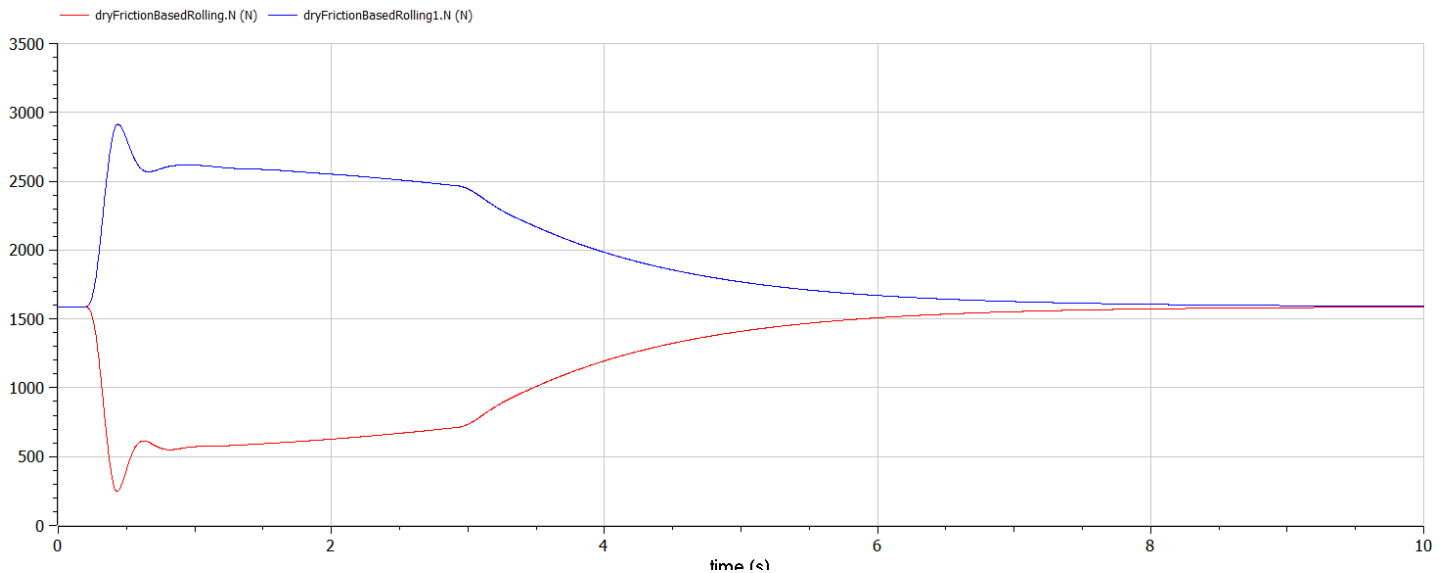
$$\ddot{x} = - \frac{C_{f1} + C_{f2}}{(M + m + 4 \cdot m_R) \cdot R}$$

Question 8 : Calculer la **décélération** correspondante pour cet effort de freinage (couple identique sur les deux roues) et comparer à la valeur obtenue par simulation. **Commenter** *on obtient $\ddot{x} = -4.6 \text{ m/s}^{-2}$*

Plus haut que la valeur trouvée par simulation. Une partie de l'énergie apportée par le freinage est dissipée dans les amortisseurs et en frottement route/pneu et donc ne sert pas à décélérer la moto. Sur le modèle théorique, la moto est rigide (pas de suspension) et le contact roue/sol est parfait (roulement sans glissement)

Question 9 : **Tracer** sur un premier graphique les vitesses de rotation des deux roues (dans les blocks « revolute ») et sur un second graphique la résultante normale de l'effort de contact roue/sol (dans les blocks « dryFrictionBasedRolling »). **Détailler** le comportement de la moto lors du freinage (distance d'arrêt, rotation/blocage des roues, ...)





On remarque que la vitesse de rotation de la roue arrière arrive rapidement à 0 alors que la moto est encore en mouvement :

--> blocage de la roue arrière

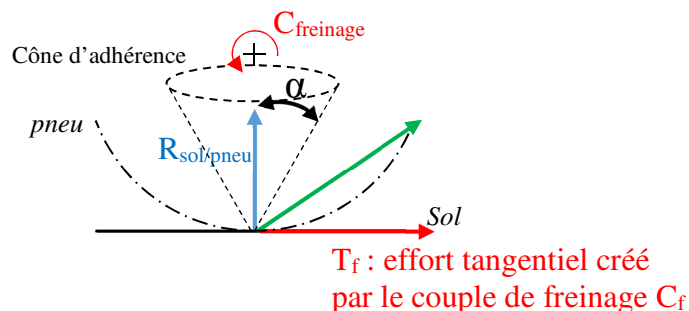
La vitesse de rotation de la roue avant est dans un premier temps en lien avec la vitesse de la moto ($V=R.\omega$) mais arrive également à 0 avant l'arrêt total de la moto

Le second graphe nous montre que l'effort de contact roue/sol de la roue arrière est proche de 0N à $t = 0.42s$

--> Roue à la limite de décoller du sol.

Ce comportement n'est pas bon car le blocage de la roue arrière va entraîner une difficulté de contrôle de l'arrière de la moto qui risque de « chasser ». Le pneu va également se détériorer.

Le blocage de la roue arrière provient du fait que la résultante de l'effort tangentiel (créé par le couple de freinage au point de contact roue/sol) et de l'effort normal sort du cône d'adhérence lié au coefficient de frottement roue/sol :



Pour retrouver l'adhérence, il faut diminuer le couple de freinage sur la roue arrière afin de diminuer l'effort tangentiel et revenir dans le cône de frottement.

A l'aide des paramètres de la moto, on montre que les couples de freinage limites à appliquer pour éviter la perte d'adhérence suivent les lois suivantes :

$$C_{f1,lim} = -13.\ddot{x} + 245 \quad \text{et} \quad C_{f2,lim} = 7.\ddot{x} + 153$$

Question 10 : A l'aide du graphe en bas de page :

- Déterminer pour quelles valeurs de décélération le couple de freinage est trop important sur la roue arrière,
- Justifier que les répartiteurs de freinage appliquent en moyenne 70% du couple du freinage sur la roue avant et 30% sur la roue arrière,
- Choisir des couples de freinage optimaux à appliquer sur les deux roues en vous basant sur la décélération obtenue lors de la première simulation.

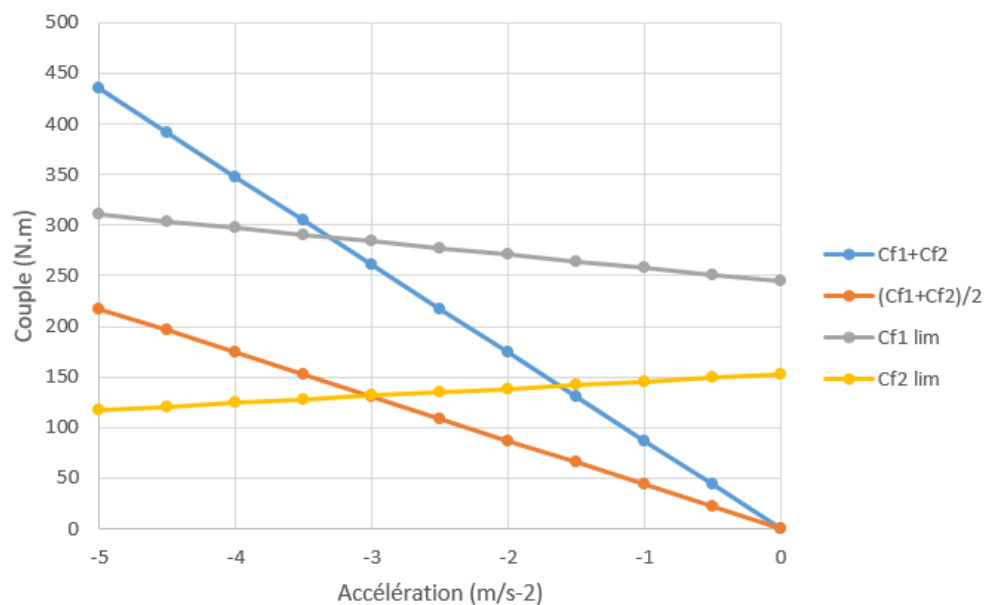
Les courbes suivantes nous permettent de retrouver les informations suivantes :

- ✓ *On remarque que pour la décélération de notre modèle (environ 3.6 m/s²) le couple de la courbe (Cf1+Cf2)/2 (répartition équivalente avant/arrière) est supérieur au couple limite de freinage de la roue arrière → perte d'adhérence.
De manière générale, une décélération supérieure à 3 m/s² entraîne un blocage de la roue arrière (croisement des courbes orange et jaune)*
- ✓ *Le couple limite de freinage sur la roue avant (droite grise) est environ 2 fois plus important que celui de la roue arrière (droite jaune). Cela justifie d'utiliser un ratio de 2/3 1/3 sur les efforts de freinage avant/arrière.*

Pour maintenir une décélération de 3.6 m/s², il faut garder la même somme Cf1 + Cf2. Avec le ratio 70-30%, on obtient : Cf1 = 290 N.m et Cf2 = 124 N.m

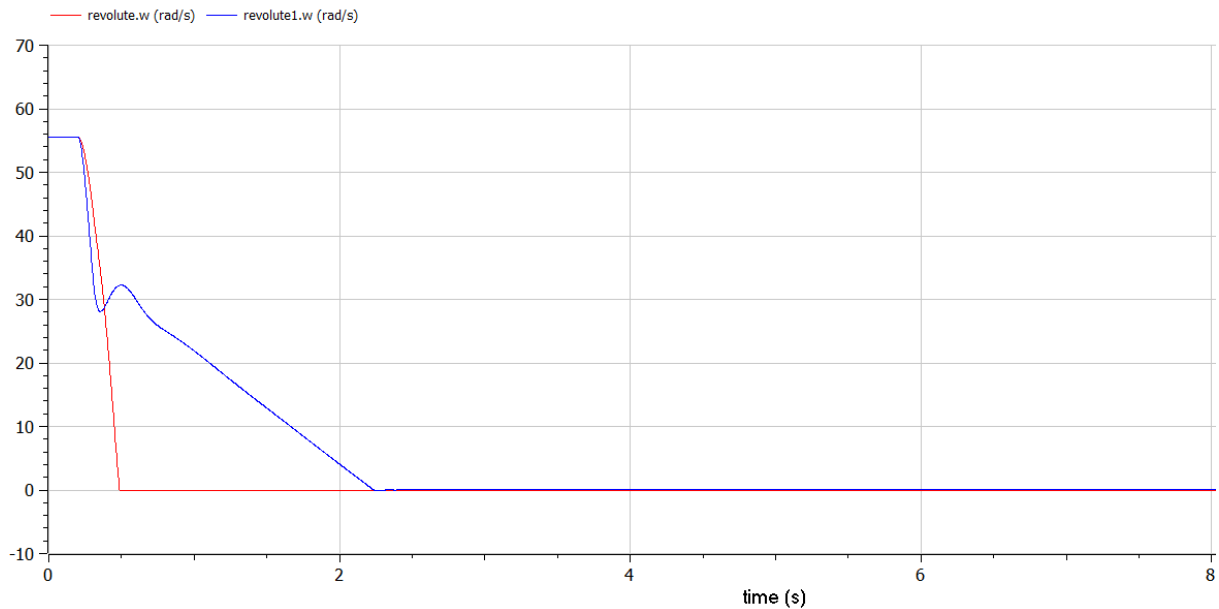
Simuler votre modèle.

Question 11 : Relever les mêmes résultats que précédemment et **conclure** sur l'action de ce répartiteur de freinage.



Ce nouveau modèle nous donne les résultats suivants :

	Sans répartiteur	Avec répartiteur de freinage
Distance d'arrêt	33.8 m	30.5 m
Inclinaison moto	0.085 radians	0.095°
Décélération maxi de la moto	-3.6 m/s ²	-4.35 m/s ²



On remarque que la vitesse de rotation de la roue arrière chute moins brutalement lors de la première partie du freinage, là où la vitesse est encore relativement élevée. On maintient une adhérence de la roue arrière, donc un meilleur contrôle de la moto.

Il serait nécessaire de continuer à ajuster ce couple de freinage pour superposer les deux courbes, en appliquant par exemple un effort de freinage proportionnel à la décélération. (Système mis en place sur de nombreux véhicules actuels)

Le tableau ci-dessus montre qu'en augmentant le freinage sur la roue avant, on maintient les performances obtenues lors de la première simulation.

La distance de freinage est également améliorée.