LP01 - Contact entre deux solides, frottements

Cléments (Colléaux et de la Salle)

8 juin 2020

Niveau : L2

Bibliographie

- Andreotti, p.20
- Pérez, chap 19
- vidéééo
- vidéoooo

Prérequis

- Mécanique du point
- Base de mécanique du solide (moment d'inertie)

Expériences

- Tout plein de manip !

Table des matières

Introduction

Sans doute un le domaine de la physique le plus concret... Les forces de contacts sont littéralement présentes à chaque instant de la vie (sauf pour les oiseaux OMG) : la marche, rouler en voiture, taper une leçon sur son ordi un 3 mars 2020... Bref c'est cool, et pourtant c'est un phénomène qui peut sembler parfois contre-intuitif !

Historiquement, c'est DA VINCI (1493) qui étudie (et publie) en premier les frottements solides... Mais il faudra attendre au moins le formalisme de NEWTON (1687) pour que d'autres scientifiques énoncent les lois telles que nous les connaissons. C'est tout d'abord AMONTON (1699)qui se retrouve les travaux de DA VINCI puis plusieurs scientifiques s'attachent à décrire les phénomènes de frottements au cours du XVIII^e siècle (BÉLIDOR, EULER...). Mais celui qui poussa l'étude plus est COULOMB en 1785, qui donne alors son nom au lois des frottements solides.

1 Lois de AMONTON-COULOMB

1.1 Mise en évidence

Le but est ici de réaliser quelques expériences afin de supposer une forme des lois de AMONTON-COULOMB. On va passer beaucoup de temps dans cette partie parce que je trouve que c'est comme ça qu'on retient mieux.

De le cadre de toute cette leçon, on notera $\mathbf{T}$ la force tangentielle et $\mathbf{N}$ la force normale.

1.1.1 Présence de forces seuil

Manip' : Seuils de mouvement

On pose une masse (suffisamment lourde) sur un table. On essaye de la faire bouger en poussant dessus. On remarque qu'il donner une force minimale pour enclencher le mouvement, mais qu'une fois que c'est fait, la masse glisse plus facilement. Pour arrêter le mouvement, il faut repasser en dessous d'un seuil, plus faible que le précédent.

Dans ce cas, on a toujours $\mathbf{N} = -m\mathbf{g}$ et $\mathbf{T} = -\mathbf{F}$ avec $\mathbf{F}$ la force de l'opérateur. Voici ce qu'on peut en tirer :

1. En dessous du seuil, le cube est à l'équilibre, les forces se compensent donc T augmente au fur et à mesure que je pousse plus fort.
2. Arrivé au seuil, T n'arrive plus à augmenter, elle atteint une valeur limite $T_{1,lim}$, que l'on peut, représenter naïvement par un cylindre sur le schéma
3. Quand le mouvement est lancé, T est plus faible que F, en supposant que je soit resté à $F = T_{1,lim}$, c'est que pendant le mouvement, $T < T_{1,lim}$
4. Pour arrêter le mouvement, il faut repasser en dessous d'un autre seuil, plus bas que le premier : $T_{2,lim} < T_{1,lim}$

On peut donc tracer deux cylindres de rayons $T_{1,lim}$ et $T_{2,lim}$. Lorsque F dépasse le premier, le mouvement est lancé. Puis si F repasse en dessous du deuxième, le bloc s'arrête à nouveau. Il faut penser à une armoire qu'on essaye de bouger : lorsqu'on a réussi à enclencher le mouvement, il faut à tout prix continuer à pousser car on sait que si elle s'arrête on aura du mal à relancer le mouvement...

Remarque

On a dès lors un phénomène d'hystérésis qui apparait : si on se situe entre les deux cônes, le bloc peut très bien être au repos (si le mouvement n'a pas été amorcé) mais aussi en mouvement (dans le cas contraire).

> *Tient mais d'ailleurs, en parlant d'armoire, c'est quand même plus difficile à pousser qu'une petite masse sur la table non ?*

1.1.2 Influence de la force normale sur les seuils

On sent bien que si on appuie très fort sur une surface (normalement), il sera plus difficile de faire glisser l'objet : c'est le principe des barres de traction qu'on sert dans l'encadrement d'une porte, ou encore des serre-joints...

Manip' : Barre de traction ou serre-joint

Se suspendre à une barre de traction que l'on fixe dans l'encadrement de la porte pour montrer au jury que c'est beau la physique... Bon y a de fortes chances que ça passe moyen alors pour les plus peureux, faire avec un serre-joint.

On peux donc faire l'hypothèse suivante : les seuils $T_{1,lim}$ et $T_{2,lim}$ sont proportionnels à la force normale N.

Définition : Coefficients de frottement

Au vu de ce qui vient d'être dit, on dispose de deux coefficients que l'on va appeler **coefficient de frottement statique** μ_s et **coefficient de frottement dynamique** μ_d tels que

$$T_{1,lim} = \mu_s N \qquad T_{2,lim} = \mu_d N$$

Remarque

Évidemment ces paramètres dépendent des matériaux, du type d'interface (mouillage)...
Et de la surface de contact ?...

Dès lors, dire que les cylindres on des rayons qui varient en fonction de la composante normale est équivalent à les identifier à des cônes appelés **cône de frottement** :

— Avant le mouvement : si la résultante des frottements $\mathbf{R} = \mathbf{T} + \mathbf{N}$ est contenue dans le plus large, le bloc est au repos.
— Dès que la résultante sort de ce cône, le mouvement commence et $\mathbf{R}$ se colle sur le cône intérieur
— Si on diminue la contrainte, dès que $\mathbf{R}$ peut compenser celle-ci, le mouvement s'arrête.

Ces cônes font des angles α_s et α_d tels que :

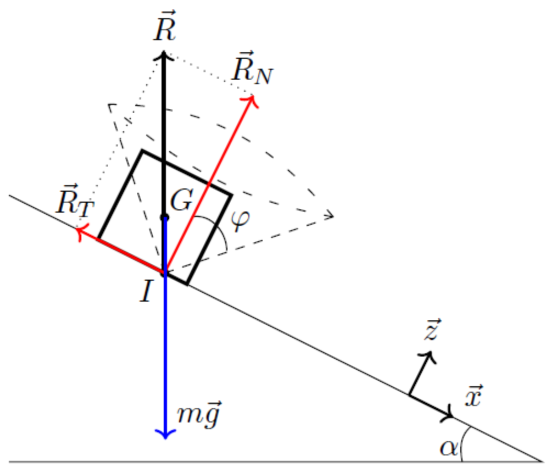
$$\tan \alpha_s = \mu_s \qquad \tan \alpha_d = \mu_d$$

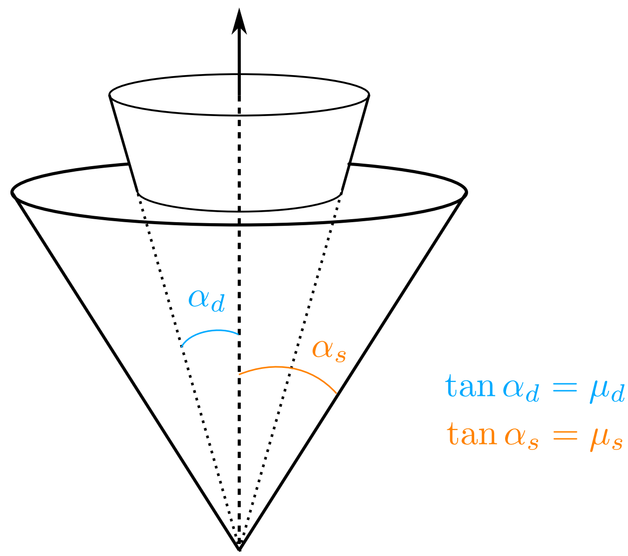
Cette vision en cônes est pratique et permet de comprendre facilement la dynamique de deux solides en contact.

Exemples

— Un bloc sur un table que l'on pousse de plus en plus fort

— Un bloc sur une pente que l'on incline de plus en plus





Remarque

Le point de contact I est défini comme dans l'alignement du poids... S'il ce n'est pas possible (imaginez un angle plus grand par exemple), il se situe au bout, mais du coup il va y avoir un bras de levier donc un moment non nul. Le cube va pivoter autour de l'angle !

1.1.3 (Non)-influence de la surface de contact

Pour l'instant, on a l'impression que ces forces peuvent s'identifier à des forces surfaciques (plus la surface de contact est grande, plus les frottements sont forts)... Et bien vérifions ça tout de suite !

Expérience : Expérience de DA VINCI

✍ Pas trouvé ⏲ 42

Il s'agit de positionner des blocs sur une table, de les relier entre eux et de les tirer grâce à un système de pois/poulie. On remplit petit à petit un gobelet de sable (sans à-coup !) et on note le masse à partir de laquelle les blocs commencent à glisser. De but est de faire cette expérience dans deux configurations où la masse totale est inchangée mais la surface de contact varie (cf. Schéma de notre ami Léonard qui se débrouillait bien sans INKSCAPE).

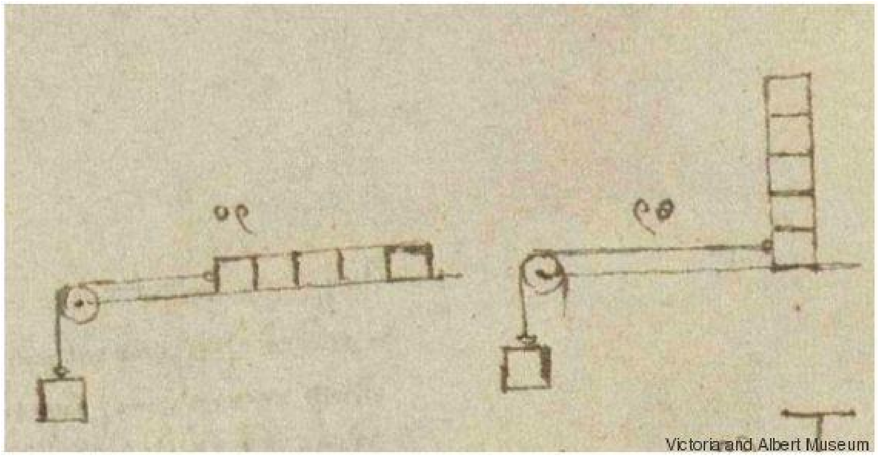


FIGURE 1.1 – Expérience de DA VINCI pour comparer l'influence de la surface de contact et laisser les autres paramètres égaux par ailleurs.

Laisser le temps au élèves de pronostiquer leurs résultats et pourquoi pas faire un sondage dans la classe... Ah ça va être marrant d'être prof <3

Et BIM contre toute attente, on se rend compte que la masse seuil est la même dans les deux cas ! Bon bah ça veut dire que μ_s et μ_d ne dépendent pas de la surface de contact !

Aller on a fait joujou avec du sable, des blocs et des barres de traction, maintenant passons au vrai fun !

1.2 Énoncé

On introduit ici une notion dont on n'a pas encore parlé : le notion de **vitesse de glissement** d'un solide par rapport à un autre.

Définition : Vitesse de glissement

Si un solide (1) se déplace contre un autre solide (2), on note I le point de contact. Alors la vitesse de glissement de (1) par rapport à (2) est

$$\mathbf{v_{1/2}} = \mathbf{v}(\mathrm{I} \in 1) - \mathbf{v}(\mathrm{I} \in 2)$$

Bon bah voilà ce qu'à dit COULOMB en 1785 :

S'il n'y a pas de glissement $\mathbf{v}_{1/2} = \mathbf{0}$, elle le reste tant que

$$T \leq \mu_s N$$

Si frottement il y a, alors $\mathbf{T}$ est dirigée dans le sens opposé à la vitesse de glissement (force résistante) et sa norme est

$$T = \mu_d N$$

Remarque

Comme le souligne le BUP mars 2000, souvent les élèves oublient que la troisième loi de NEWTON s'applique aussi aux frottements... Si un solide crée une résultante $\mathbf{R}$ sur un autre, alors le second crée $-\mathbf{R}$ sur le premier !

<u>OG</u>

Contact	μ_d	μ_s
Acier - Acier	0.2	0.4
Bois - Bois	0.3	0.5
Garniture frein - Acier	0.45	0.6
Caoutchouc - Bitume (chaussée sèche)	0.7	1
Caoutchouc - Bitume (chaussée humide)	0.3	0.7

Tout ça c'est bien beau, mais d'où ça vient alors ?...

1.3 Origine

Déjà commençons par répondre à la question que tout le monde se pose (dans la classe (snif))... De quelle force s'agit-il ? Et bien c'est la **répulsion électrostatique**. Voilà.

Bon très bien essayons d'aller plus loin, en particulier, tâchons d'expliquer la non-influence de la surface de contact A

En vrai, on a bien $T \propto A$...

Mais comme les matériaux sont jamais vraiment lisses, les contacts n'ont lieux que sur des petites aspérités, donc la surface de contact réelle A vaut à peine 1% de la surface de contact apparente !

Ainsi, la force normale se distribuant sur seulement quelques points de contact, la contrainte sur ces points est tout de suite très grande et dépasse le seuil de déformation... Ainsi, chaque point de contact s'étale sous l'effet de la contrainte normale.

Donc on a aussi $A \propto N$. Ce qui fait bien au final que $T \propto N$ indépendamment de la surface de contact !

1.4 Aspect énergétique

Paraît que le jury aime bien... Bon why not ? Blablabla si je déplace un solide (1) par rapport à un solide (2) avec une vitesse de glissement $\mathbf{v_{1/2}}$, en notant $\mathbf{R}$ la résultante des forces de (2) sur (1)

— la puissance reçue par (1) est

$$P_1 = \mathbf{R} \cdot \mathbf{v}(\mathrm{I} \in 1)$$

— la puissance reçue par (2) est

$$P_1 = -\mathbf{R} \cdot \mathbf{v}(\mathrm{I} \in 2)$$

Donc finalement, la puissance totale dissipée vaut, d'après les lois de Coulomb

$$P = \mathbf{R} \cdot v_{1/2} = -||\mathbf{T}|| \; ||\mathbf{v_{1/2}}||$$

OdG de frein sur une roue : 1500 W

2 Applications

2.1 Balle qui revient

Manip' : Balle qui revient

Lancer une balle sur la table en la faisant tourner de sorte à ce qu'elle revienne !

On suppose qu'on lance une balle de masse m et de moment d'inertie J avec une vitesse initiale v_0 et une rotation initiale ω_0. On note x la distance qu'à parcourue la balle.

slip Le PFD indique que l'on a

$$\left\{ \begin{array}{l} m\ddot{x} = -\mu_d mg \\ J\dot{\omega} = -\mu_d mga \end{array} \right. \implies \left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = v_0 - \mu_d gt \\ \omega = \omega_0 - \frac{\mu_d mga}{J} t \end{array} \right.$$

stick Le mouvement va s'accrocher lorsque l'on aura $\dot{x} + a\omega = 0$, on peut donc tracer les droites $v(t)$ et $-a\omega(t)$ et voir quand elle se croisent (notons t_1 ce temps)...

On a alors deux cas possibles :

1. Au moment de l'accrochage, la balle continuait d'avancer

$$v(t_1) > 0$$

Alors elle va continuer à rouler en avançant : la boule de Bowling glisse au départ puis se met à rouler à la fin. On peut le voir grâce aux effets qui n'apparaissent qu'à la fin de la piste
https ://youtu.be/cJ4t46NhIOM ?t=83

2. Au moment de l'accrochage, la balle a une vitesse négative

$$v(t_1) < 0$$

Alors la balle roule mais en revenant vers le lanceur !

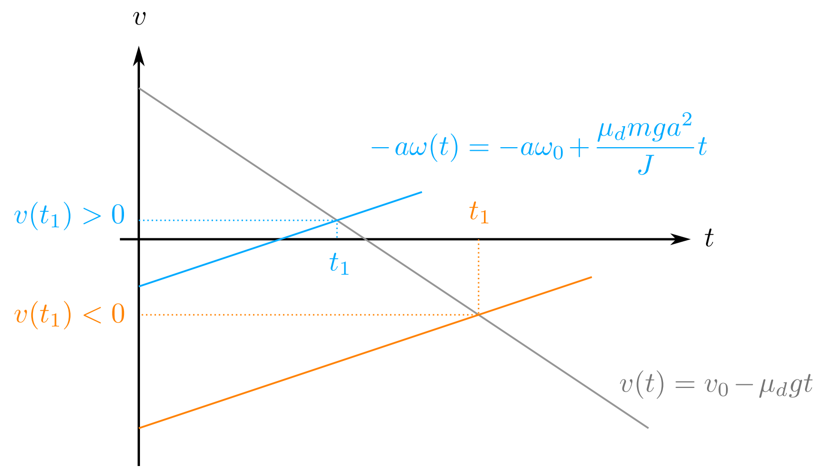


FIGURE 2.1 – Dans le cas bleu, la rotation initiale ne suffit pas à faire revenir la balle. Dans le cas orange (ω_0 plus grand), l'accrochage à lieu alors que la balle a déjà fait demi-tour

2.2 Stick-slip

Le phénomène de *stick-slip* (collé-glissé en bon français) est assez connu : c'est ce qu'il se passe quand on glisse un craie sur un tableau sans trop la serrer pour faire des jolis pointillés par exemple. On se propose tout d'abord de le comprendre puis de décrire le mouvement.

Expérience : Stick-slip

✍ Ché pa — ⏲ Pas le temps

Bien sûr, on n'est pas obligé de faire l'expérience, on peut simplement la décrire à l'oral si y a pas le temps.
Un bloc posé sur un table et relié à un ressort sur lequel on tire horizontalement selon l'axe x. On peut acquérir la force de résistance en fonction du temps.

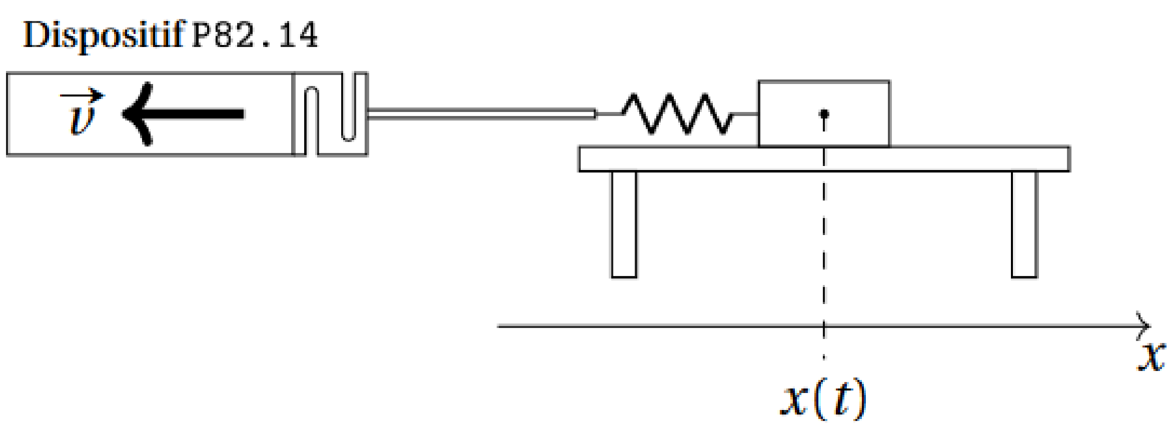


FIGURE 2.2 – Montage de l'expérience (on utilise du papier comme surface de contact)

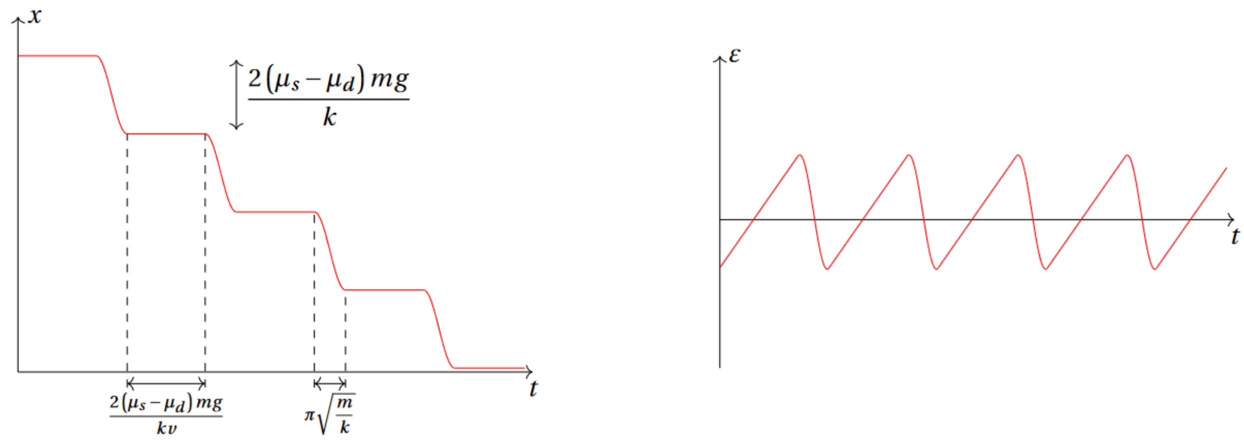


FIGURE 2.3 – Résultats de l'expérience... La force (tension délivrée par le capteur) a la même allure que ϵ

Voici ce qu'il se passe (on prend l'axe opposé à celui du schéma parce que fuck) :

1. Au début, le bloc est immobile, on tire à vitesse constante v donc l'allongement relatif est
$$\epsilon(t) = vt$$
Donc le PFD donne
$$0 = kvt - T$$
La force tangentielle T croît avec le temps jusqu'à atteindre sa valeur maximale en t_1 tel que
$$kvt_1 = \mu_s mg$$
2. À ce moment, la tension lâche et le bloc se met à glisser (*slip*), l'allongement est alors :
$$\epsilon = vt - x \implies \dot{\epsilon} = v - \dot{x} \implies \ddot{\epsilon} = -\ddot{x}$$
Et puisque la force tangentielle vaut $T = -\mu_d mg$, l'équation devient
$$-m\ddot{\epsilon} = k\epsilon - \mu_d mg$$
On reconnaît l'équation d'un oscillateur harmonique forcé par une constante (dans l'espace des phases $(\epsilon, \dot{\epsilon})$, il s'agit d'une ellipse, shiftée selon l'axe ϵ de $\mu_d mg/k$)
3. Lorsque $\dot{x} = 0$ (ie $\dot{\epsilon} = v$) le bloc raccroche et le mouvement repart en *stick* et avec $\dot{\epsilon} = v$, jusqu'à ce que ça se re-décroche etc.

On peut résumer ce cycle dans l'espace des phases ainsi :

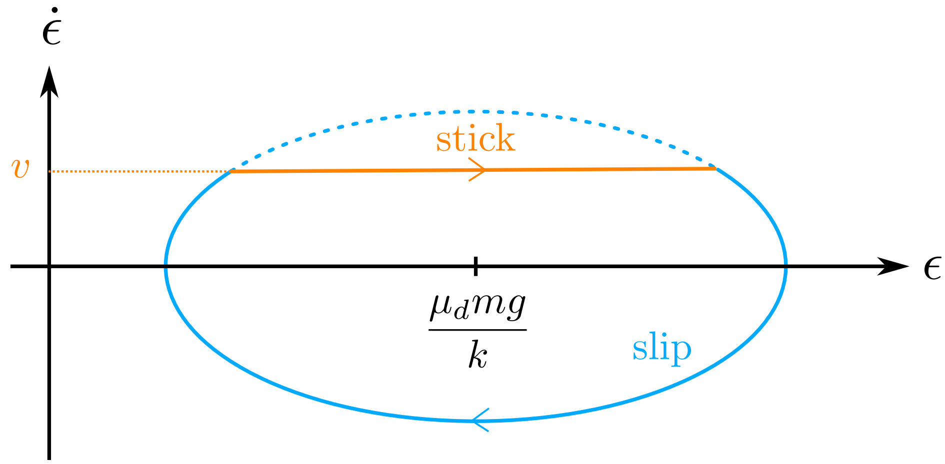


FIGURE 2.4 – Bref vous comprenez l'idée, on pourrait se dire que si on augmente v, l'ellipse ne coupe plus la droite et donc que c'est du *slip* permanent... Ce qui n'a pas beaucoup de sens. En fait la taille de l'ellipse dépend aussi de v et donc il y a toujours intersection !

Conclusion

Questions

Différence entre le coefficient de frottement μ de glissement dans le cas où $v_g = 0$ et $v_g \neq 0$? Citer des applications du phénomène d'arc-boutement ? Quel est le coefficient de frottement le plus élevé : statique ou dynamique ? Au niveau microscopique, ayant parlé des irrégularités des surfaces de contact rendant complexe la modélisation des phénomènes, on m'a demandé à quelle échelle il s'agissait de raisonner. Ayant parlé de l'utilisation de couche lubrifiante pour limiter les frottements, on m'a demandé de préciser. Question sur le cas d'une roue en rotation sur un plan horizontal.

Point de contacts idéalisés, comment sortir passer de ça au réel ?
Applatissement de la roue de vélo qui passe de la ligne de contact à une surface de contact

Les moments dépendent des points où on les calcule ?
Oui, il faut préciser ces points ?

Comment détecter le décollement entre les solides
Composante normale qui s'annule

vitesse glissement nulle donc frottements statiques et après c'est frottements dynamiques

Autres grandeurs pour lesquelles y a la relation de Varignon ?
Torseurs

Autre expérience de da Vinci ?
Planche penchée

Vraiment indépendant de la surface ?
Indep de la surface macroscopique mais au niveau micro c'est des points de contacts (16 mm x 16 mm le rapport entre les deux surfaces c'est 100)

Puissance du frein récupérable ?
On essaie, à Lyon, quand le tram freine, on récupère de l'énergie