

ULM MP 2001 Physique (6 heures). **Le frottement solide.**

1.1.a) Sans glissement, le module et l'orientation de la force de frottement solide sont indéterminés et s'adaptent aux sollicitations extérieures (de manière à vérifier les théorèmes de la quantité de mouvement et du moment cinétique). Le non glissement n'est possible que si la réaction tangentielle  $\mathbf{R}_T$  et la réaction normale  $\mathbf{R}_N$  vérifient l'inégalité  $\|\mathbf{R}_T\| < m_s \|\mathbf{R}_N\|$ ,  $m_s$  étant le coefficient de frottement de glissement statique.

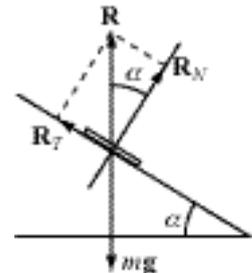
1.1.b) Avec glissement (vitesse de glissement  $\mathbf{U}$ ), la force de frottement  $\mathbf{R}_T$  a la direction de  $\mathbf{U}$  et le sens contraire, ce qui se traduit par  $\mathbf{R}_T \wedge \mathbf{U} = \mathbf{0}$  et  $\mathbf{R}_T \cdot \mathbf{U} < 0$ ; de plus, la réaction tangentielle  $\mathbf{R}_T$  est liée à la réaction normale  $\mathbf{R}_N$  par la relation  $\|\mathbf{R}_T\| = m_d \|\mathbf{R}_N\|$  où  $m_d$  est le coefficient de frottement de glissement dynamique.

1.1.c) Le passage du non-glissement au glissement se produit quand  $\|\mathbf{R}_T\|$  atteint  $m_s \|\mathbf{R}_N\|$  puis dès que  $\mathbf{U}$  est différent de zéro,  $\|\mathbf{R}_T\|$  prend la valeur  $m_d \|\mathbf{R}_N\|$ .

1.1.d) Le passage du glissement au non-glissement se fait quand la vitesse de glissement s'annule et ensuite  $\|\mathbf{R}_T\|$  peut rester inférieure à  $m_s \|\mathbf{R}_N\|$ .

1.2.a) Souvent  $m_s > m_d$ ; du fait des forces d'interaction microscopique (force de Van der Waals, liaison hydrogène) le contact entre les deux surfaces solides se fait avec une certaine adhérence; s'il y a glissement, le contact est moins intime, les deux solides étant un peu espacés et en conséquence, les forces d'interaction fonction décroissante de la distance diminuent un peu.

1.2.b) Découper un carré de papier dans le sujet de concours et le poser sur le sujet (en maintenant plan à l'aide d'une règle plate par exemple); à partir de la position horizontale, incliner lentement; quand le carré commence à glisser, on peut estimer l'angle d'inclinaison du plan incliné. À l'équilibre, la réaction est opposée au poids du carré (et de même support) et fait avec la normale au plan incliné un angle égal à l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du plan incliné sur l'horizontale; à l'équilibre limite, la réaction du plan incliné fait avec la normale un angle égal à l'angle de frottement statique  $j_s$  tel que  $m_s = \tan j_s$ ; alors  $\alpha = j_s$ . On trouve  $j_s \approx 20^\circ$  et donc  $m_s \approx 0,4$ .



1.2.c) Ski métallique sur glace :  $m_s \approx 0,03$ .

1.2.d) Contact acier-ferrodo des freins à disque :  $m \approx 0,6$ ; contact pneu-bitume :  $m \approx 0,8$ .

2.1.a) Le référentiel galiléen de la plaque (P).

2.1.b) Un repère  $Oxyz$ , trièdre direct, fixe dans (P), avec  $Ox$  de direction et de sens de  $\mathbf{V}$ ,  $Oy$  vertical ascendant,  $Oz$  complétant le trièdre.

2.1.c) La masse  $m$  seule.

2.1.d) Un seul degré de liberté de translation associé à  $x(t)$ , abscisse sur  $Ox$  du point d'attache du ressort sur le palet.

2.2) En cas de glissement, la réaction normale est opposée au poids du palet (de module  $mg$ ), la réaction tangentielle est de signe contraire à celui de la vitesse  $\dot{x} > 0$  du palet et vaut algébriquement  $-m_d mg$ . L'allongement du ressort est  $l(t) = Vt - x(t)$  et la force appliquée par le ressort sur le palet vaut  $k(Vt - x)$ . D'après le théorème de la quantité de mouvement en projection sur  $Ox$  :

$$m\ddot{x} = -m_d mg + k(Vt - x) \quad \text{et donc} \quad m\ddot{l} + kl = m_d mg$$

2.3.a) Recherche d'un régime permanent :

$$\dot{x} = cste \Rightarrow x_p = Vt - \frac{m_d mg}{k} \Rightarrow \dot{x}_p = V; \quad l_p = Vt - x_p \Rightarrow l_p = \frac{m_d mg}{k}$$

2.3.b) Par étude des petits mouvements :

$$l = l_p + e \Rightarrow \ddot{e} + w_0^2 e = 0 \quad \text{avec} \quad w_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{et donc} \quad e = A \cos w_0 t + B \sin w_0 t,$$

petites oscillations autour de la solution de régime permanent : le mouvement est stable.

2.3.c) En remplaçant  $m_d(\dot{x})$  par son développement, l'équation différentielle en  $l(t)$  s'écrit :

$$\ddot{l}(t) + a g \dot{l}(t) + w_0^2 l(t) \approx m_d(V)g$$

puis en remplaçant  $l(t)$  par son développement :

$$\ddot{e} + a g \dot{e} + w_0^2 e = 0$$

L'équation caractéristique  $r^2 + \mathbf{a}gr + \mathbf{w}_0^2 = 0$  de racines  $r = \frac{1}{2}(-\mathbf{a}g \pm i\sqrt{4\mathbf{w}_0^2 - \mathbf{a}^2g^2}) \approx -\frac{1}{2}\mathbf{a}g \pm i\mathbf{w}_0$  conduit à la solution :

$$\mathbf{e}(t) = \exp\left(\frac{-\mathbf{a}gt}{2}\right)(A \cos \mathbf{w}_0t + B \sin \mathbf{w}_0t)$$

2.3.d) Si  $\mathbf{m}_q(V)$  est fonction décroissante de  $V$ ,  $\mathbf{a} < 0$ ,  $l(t)$  diverge, l'hypothèse des petits mouvements est vite incorrecte, le régime permanent est instable ; si  $\mathbf{m}_q(V)$  est fonction croissante de  $V$ ,  $\mathbf{a} > 0$ ,  $l(t)$  effectue des oscillations amorties, le régime permanent est stable.

3.1.a) Le palet s'arrête de glisser à un instant  $t_2$  ; alors  $l(t)$  est fonction affine du temps :

$$x(t) = x_2 \text{ et } l(t) = Vt - x_2$$

3.1.b) Le palet ne glisse pas tant que  $\|\mathbf{R}_T\| < \mathbf{m}_i\|\mathbf{R}_N\| = \mathbf{m}_i\mathbf{m}g$  ; or  $R_T + kl = 0$ , le palet ne glisse donc pas tant que  $l(t) < \mathbf{m}_i\mathbf{m}g/k$  ; quand  $l(t)$  atteint  $\mathbf{m}_i\mathbf{m}g/k$ , le glissement se produit mais alors  $R_T = -\mathbf{m}_i\mathbf{m}g$ . Le palet repart à  $t_3$  tel que :

$$Vt_3 = \frac{\mathbf{m}_i\mathbf{m}g}{\mathbf{w}_0^2} + x_2$$

3.1.c) Si le palet est fixe,  $x = cste$ ,  $l = Vt - x$  est fonction affine du temps. On néglige le temps de glissement comme l'autorise la figure 2.

3.1.d) 8,2 cm correspondent à 30 s et 7,4 cm à 4 périodes et à une durée de 27 s ; la durée de glissement est donc le quart de 27 s :

$$t_f \approx 6,8 \pm 0,1 \text{ s}$$

3.2.a) Le palet arrêté commence à glisser à  $t_3$  et alors  $l_3 = \mathbf{m}_i\mathbf{m}g/k = \mathbf{m}_i\mathbf{m}g/\mathbf{w}_0^2$  ; ensuite :

$$\ddot{l} + \mathbf{w}_0^2 l = \mathbf{m}_d g \text{ d'où } l(t) = A \cos \mathbf{w}_0(t - t_3) + B \sin \mathbf{w}_0(t - t_3) + \frac{\mathbf{m}_d g}{\mathbf{w}_0^2},$$

$$x(t) = Vt - \frac{\mathbf{m}_i\mathbf{m}g}{\mathbf{w}_0^2} - A \cos \mathbf{w}_0(t - t_3) - B \sin \mathbf{w}_0(t - t_3).$$

D'après les conditions initiales  $\dot{x}(t_3) = 0 = V - B\mathbf{w}_0$ ,  $x_3 = Vt_3 - \frac{\mathbf{m}_i\mathbf{m}g}{\mathbf{w}_0^2} - A$  soit  $B = \frac{V}{\mathbf{w}_0}$ ,  $A = \frac{(\mathbf{m}_s - \mathbf{m}_i)g}{\mathbf{w}_0^2}$  :

$$l(t) = \frac{(\mathbf{m}_s - \mathbf{m}_i)g}{\mathbf{w}_0^2} \cos \mathbf{w}_0(t - t_3) + \frac{V}{\mathbf{w}_0} \sin \mathbf{w}_0(t - t_3) + \frac{\mathbf{m}_i\mathbf{m}g}{\mathbf{w}_0^2}, \quad l_3 = \frac{\mathbf{m}_i\mathbf{m}g}{\mathbf{w}_0^2}$$

$$x(t) = Vt - \frac{\mathbf{m}_i\mathbf{m}g}{\mathbf{w}_0^2} - \frac{(\mathbf{m}_s - \mathbf{m}_i)g}{\mathbf{w}_0^2} \cos \mathbf{w}_0(t - t_3) - \frac{V}{\mathbf{w}_0} \sin \mathbf{w}_0(t - t_3)$$

3.2.b) Le palet s'arrête de glisser à la date  $t_4$  telle que  $\dot{x}(t_4) = 0$  ; or :

$$\dot{x}(t) = V[1 - \cos \mathbf{w}_0(t - t_3)] + \frac{(\mathbf{m}_s - \mathbf{m}_i)g}{\mathbf{w}_0} \sin \mathbf{w}_0(t - t_3) = 0$$

$$\tan \frac{\mathbf{w}_0(t_4 - t_3)}{2} = -\frac{(\mathbf{m}_s - \mathbf{m}_i)g}{V\mathbf{w}_0} \text{ ou/et } \sin \frac{\mathbf{w}_0(t_4 - t_3)}{2} = 0,$$

la 2<sup>e</sup> solution en  $t_4 - t_3$  est à éliminer car seule la solution la plus petite, la 1<sup>ère</sup> atteinte, se réalise :

$$t_g = t_4 - t_3 = \frac{2}{\mathbf{w}_0} \left[ \mathbf{p} - \text{Arctan} \frac{(\mathbf{m}_s - \mathbf{m}_i)g}{V\mathbf{w}_0} \right]$$

3.2.c) On peut estimer  $t_g$  en comptant le nombre d'intervalles séparés par 1,5 ms ; il y a 14 intervalles visibles sur la phase glisse :  $t_g \approx 21$  ms ; cependant, cette méthode est très imprécise car au début et à la fin de la durée considérée les points sont trop rapprochés et se superposent ; certains ne sont pas comptés ; la mesure se fait par défaut à plusieurs fois 1,5 ms près. De plus, la durée de 1,5 ms est approximative. Ainsi, la détermination de  $t_g$  se fait avec une précision relative de 30 à 40 %.

Une méthode précise consiste à exprimer  $t_g$  en fonction de  $t_f = t_3 - t_2$  dont le calcul exige celui de  $l_4$  :

$$l_4 = \frac{(m_s - m_l)g}{w_0^2} \cos w_0(t_4 - t_3) + \frac{V}{w_0} \sin w_0(t_4 - t_3) + \frac{m_l g}{w_0^2}.$$

Avec  $g \triangleq \frac{(m_s - m_l)g}{Vw_0}$ , en utilisant les expressions de  $\sin(x)$  et  $\cos(x)$  en fonction de  $\tan(x/2)$  :

$$l_4 = \frac{gV}{w_0} \frac{1-g^2}{1+g^2} - \frac{V}{w_0} \frac{2g}{1+g^2} + \frac{m_l g}{w_0^2}, \quad l_4 = \frac{(2m_l - m_s)g}{w_0^2}$$

Mais par périodicité des oscillations de  $l(t)$ ,  $l_2 = l_4$  et comme  $x_3 = x_2$  :

$$l_4 = Vt_2 - x_2 = V(t_2 - t_3) + l_3 = -V(t_3 - t_2) + \frac{m_s g}{w_0^2} = \frac{(2m_l - m_s)g}{w_0^2}, \quad t_f = t_3 - t_2 = \frac{2(m_s - m_l)g}{Vw_0^2}$$

$$t_g = \frac{2}{w_0} [p - \text{Arctan}(\frac{w_0 t_f}{2})]$$

3.2.d) Arctan (en rds)  $\lesssim p/2$  ; à partir de la valeur mesurée,  $t_f \approx 6,8$  s, on a  $t_g \approx 32,509$  ms  $\ll t_f$ .

Remarque :  $g = \frac{w_0 t_f}{2} \gg 1$ ,  $t_g \approx \frac{p}{w_0} = \frac{T_0}{2} = p \sqrt{\frac{m}{k}}$  et  $l(t) \approx \frac{(m_s - m_l)g}{w_0^2} \cos w_0(t - t_3) + \frac{m_l g}{w_0^2}$ .

La précision de la méthode,  $m, k$  étant supposés bien connus, est définie par la précision sur la mesure de  $t_f$  soit  $\Delta t_f \approx 0,1$  s ; pour  $t_f = 6,9$  s ou  $6,7$  s,  $t_g$  a même valeur que pour  $t_f = 6,8$  s à  $0,001$  ms près ; d'où  $\Delta t_g = 1$  ms. La formule approchée  $t_g \approx T_0/2$  donne  $32,446$  ms, valeur incorrecte.

3.3.a) Sur le graphe, d'après les expressions de  $l_3$  et  $l_4$  vues en 3.2.a et 3.2.c, on détermine :

- la valeur maximale de  $kl/mg$  :  $kl_3/mg = m_s = 0,37 \pm 0,01$  ;
- la valeur minimale de  $kl/mg$  :  $kl_4/mg = 2m_l - m_s \approx 0,31 \pm 0,01$

d'où  $m_s = 0,37 \pm 0,01$  et  $m_l = 0,34 \pm 0,01$   $m_s - m_l = 0,03 \pm 0,01$

La précision relative sur la différence des coefficients est de l'ordre de 30 % alors que la précision relative sur chaque coefficient est de l'ordre de 3 %.

$$3.3.b) t_f = \frac{2(m_s - m_l)mg}{kV} = \frac{2 \times (0,37 - 0,34) \times 1,6 \times 9,81}{1,5 \cdot 10^4 \times 10^{-5}} = 6,3 \text{ s} \quad \text{et} \quad \frac{\Delta t_f}{t_f} = \frac{\Delta(m_s - m_l)}{m_s - m_l} \approx 30\% \text{ soit}$$

$\Delta t_f \approx 2$  s ; ce calcul donne une précision bien moins bonne que la mesure directe sur la figure 2.

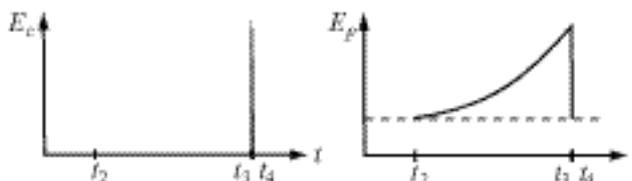
$$3.3.c) t_g = \frac{2}{w_0} [p - \text{Arctan}(\frac{(m_s - m_l)g}{Vw_0})] = 2 \sqrt{\frac{1,6}{1,5 \cdot 10^4}} [p - \text{Arctan}(\frac{0,03 \times 9,81}{10^{-5} \sqrt{1,5 \cdot 10^4 / 1,6}})] \approx 32,51 \text{ ms} ;$$

la précision par calcul avec  $m_s - m_l = 0,02$  ou  $0,04$  est de l'ordre de  $0,04$  ms, moins bonne qu'en 3.2.c.

3.3.d) On ne voit pas très bien l'intérêt des questions 3.3.b,c, les résultats de ces questions étant moins précis que ceux obtenus par exploitation du graphe de la figure 2 et de 3.2.d.

3.4.a) Le régime fixe-glisse est périodique parce que l'évolution de  $l(t)$  est déterminée par une équation différentielle du second ordre et que  $l(t)$  et  $\dot{l}(t)$  reprennent les mêmes valeurs en début et fin d'une occurrence fixe-glisse, ainsi à  $t_3$ ,  $l = m_l mg/k$  et  $\dot{l} = V$  ; aux deux extrémités de la phase glisse,  $\dot{l}(t) = V$  : de ce fait la courbe représentative de la phase glisse présente un maximum tout au début et un minimum tout à la fin ce qui n'apparaît pas sur la figure 2.

3.4.b) Dans le référentiel plaque, les allures de l'énergie cinétique  $E_c = m\dot{x}^2/2$  du palet et de l'énergie potentielle  $E_p = kl^2/2$  du ressort (indépendante du référentiel) en fonction de  $t$  sont ci-dessous :



3.4.c) Sur une période,  $\Delta E_c = 0, \Delta E_p = 0 ; \Delta E_{univers} = 0$  ; en fait sur une période, le travail mécanique fourni au ressort et au palet par le moteur est transformé en chaleur par frottement au contact palet-plaque.

3.4.d) Le palet reçoit une partie de la chaleur produite par les frottements et la plaque reçoit le reste mais le palet finit par atteindre un régime permanent thermique au cours duquel sa température varie périodiquement mais assez peu à chaque occurrence fixe-glisser ; en moyenne sa température est constante : il ne reçoit plus de chaleur, son entropie ne varie pas ; le travail  $W$  de la force de frottement est alors entièrement fourni sous forme de chaleur à la plaque de température quasi constante  $T_{plaque}$  : la variation d'entropie de la plaque est  $W/T_{plaque}$  ; la force de frottement  $m_l mg$  ne travaille que lors de la phase glisse de longueur  $x_4 - x_3 = V(t_4 - t_3) - (l_4 - l_3) = V(t_g + t_f) \approx V t_f$  car  $t_f \gg t_g$  :

$$W \approx m_l mg V t_f \text{ d'où } \Delta S_{plaque} = \Delta S_{univers} = \frac{W}{T_{plaque}} = m_l mg t_f V$$

En d'autres termes,  $l_4 - l_2 = V(t_4 - t_2) - (x_4 - x_2) = 0$  car  $l_2 = l_4$  d'où  $x_4 - x_2 = V(t_4 - t_2)$  ce qui montre que la vitesse moyenne du palet est  $V$  ; sur une occurrence fixe-glisser le déplacement du palet est le même que celui de l'extrémité du ressort :  $V(t_g + t_f) \approx V t_f$  d'où le résultat déjà obtenu.

3.5.a) En reprenant les calculs de 3.2.a :

$$A = l_4 - \frac{m_l g}{w_0^2}, B = \frac{V - \dot{x}_4}{w_0}, \dot{x}(t) = V + (l_4 w_0 - \frac{m_l g}{w_0}) \sin w_0(t - t_4) - (V - \dot{x}_4) \cos w_0(t - t_4).$$

3.5.b)  $\dot{x} = 0 \Rightarrow V = -(l_4 w_0 - \frac{m_l g}{w_0}) \sin w_0(t - t_4) + (V - \dot{x}_4) \cos w_0(t - t_4)$  ou  $V = V_{max} \cos[w_0(t - t_4) - j]$

avec  $V_{max} = \sqrt{(l_4 w_0 - \frac{m_l g}{w_0})^2 + (V - \dot{x}_4)^2}$  et la condition  $\sqrt{(l_4 w_0 - \frac{m_l g}{w_0})^2 + (V - \dot{x}_4)^2} \geq V$

3.5.c) Si  $l_4 = 0$  et  $\dot{x}_4 = V$ , la condition devient  $\sqrt{(\frac{m_l g}{w_0})^2 + V^2} \geq V$  ce qui est réalisé.

3.5.d)  $\dot{x}$  peut s'annuler, si au départ, on n'a pas ( $\dot{x}$  proche de  $V$ ) et ( $l$  proche de  $l_p$  du 2.3.a) donc si on n'est pas trop proche du régime permanent de 2.3.a.

4.1.a) Son nettement plus aigu que celui du diapason :  $f_0 \approx 1000$  Hz.

4.1.b)  $V \approx 0,25 \text{ m.s}^{-1}$ . La force de pression est donnée par le poids d'une masse  $m$  équivalente statiquement :  $m \approx 0,1$  kg soit  $R_N \approx 0,98$  N.

4.1.c)  $f_0 = \frac{1}{2p} \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow k = 4p^2 m f_0^2 \Rightarrow k \approx 4.10^4 \text{ N.cm}^{-1}$ .

4.1.d) La craie vibre ; un morceau du quart de la longueur de la craie a une raideur accrue (la raideur est inversement proportionnelle au cube de la longueur) : la fréquence de vibration augmente et sort du domaine audible (20-10000 Hz pour une oreille pas très sensible aux grandes fréquences).

4.2.a) Son voisin du  $la$  du diapason :  $f_0 \approx 500$  Hz.

4.2.b) La porte grince lors d'une rotation lente ; si elle tourne de  $90^\circ$  en  $t = 15$  s et si le contact grinçant se fait par la base du gond de diamètre moyen  $d = 0,75$  cm :  $V = \frac{pd}{4t} \approx 4.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ .

La masse  $m$  est celle de la porte divisée par le nombre de gonds, disons 10 kg.

4.2.c)  $k \approx 10^5 \text{ N.cm}^{-1}$ .

4.2.d) Huiler les gonds ; dégraisser les gonds avec un anti-rouille ; mettre des rondelles en plastique.

4.3.a) Un pneu crisse par freinage sur une route goudronnée par temps chaud surtout et aussi en tournant à faible allure sur les sols des parkings recouverts de peinture.

4.3.b) Par freinage sur une route :  $V \approx 30 \text{ m.s}^{-1}$  (roues bloquées) ;  $m \approx 500$  kg (le quart de la masse de l'automobile avec bagages et passagers).

4.3.c) Prendre des pneus neufs ; réaliser un freinage progressif (système ABS).

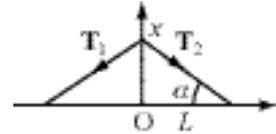
4.3.d) Il vaut mieux supprimer le crissement pour un freinage efficace par freinage progressif.

4.4.a) Passer une résine solide sur l'archet, la colophane, résidu de la distillation de la térébenthine.

4.4.b) La fréquence du *la* du diapason est 440 Hz.

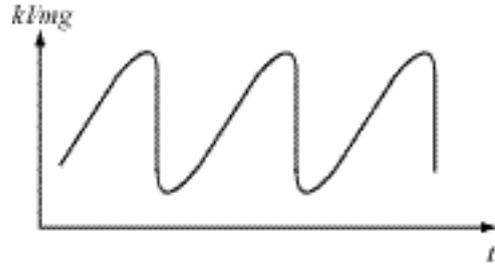
4.4.c) La force de rappel  $\mathbf{F}$  est due à la forme prise par la corde lors de l'appui de l'archet ; on peut l'exprimer en fonction de la tension  $T$  dans la corde :

$\mathbf{F} = \mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2$  de module  $F = 2T \sin \alpha \approx 2T \alpha$  avec  $\alpha \approx x/L$  et donc  $F \approx 2Tx/L$  de la forme  $kx$  d'où  $k \approx 2T/L$  ; si la tension est égale au poids d'une masse de 10 kg et si  $L \approx 0,2$  m,  $k \approx 10 \text{ N.cm}^{-1}$ .



4.4.d) Il faudrait tenir compte de la propagation d'ondes transversales de déplacement le long de la corde avec une des conditions aux limites définie par le contact de l'archet, en plus des conditions limites aux extrémités de la corde.

5.1.a)  $l(t) = Vt - x(t)$  ; à la fin d'une phase fixe,  $x(t)$  est un peu plus grand que prévu et donc  $l(t)$  un peu plus petit que prévu ; au début, c'est le contraire ; les pointes de la courbe sont arrondies.



5.1.b) Le bristol est fait de cellulose dont les macromolécules comportent des motifs de 0,5 nm qui peuvent se répéter 4000 fois, soit de dimension  $d \approx 2$  mm.

La distance de reptation est pratiquement égale à cette dimension ; elle correspond à la distance nécessaire pour que les macromolécules à la base du palet se positionnent au plus près de celles de la plaque ou pour qu'elles s'arrachent un peu de la plaque pour autoriser le glissement.

5.1.c)  $t_r \approx d/V$ . Il ne s'agit que d'un ordre de grandeur.

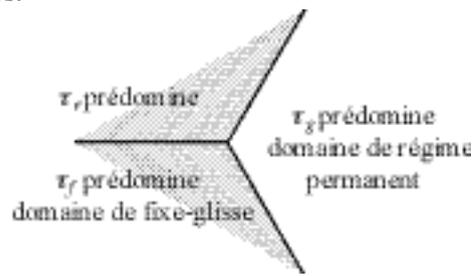
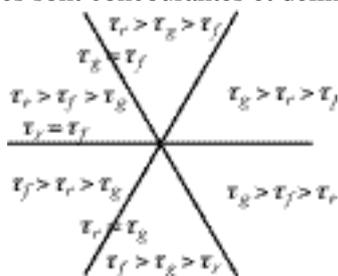
5.1.d) Pour  $t_f$ , il faut trouver un produit en  $V, k, m, g$  de la dimension d'un temps :  $t_f \approx \frac{g}{V w_0^2} = \frac{mg}{kV}$ .

Pour  $t_g$ , on peut prendre  $t_g \approx \frac{T_0}{2} = \frac{p}{w_0} = p \sqrt{\frac{m}{k}}$ .

5.2.a) On a donc, sans tenir compte des facteurs numériques :  $t_f \sim \frac{1}{kV}$ ,  $t_g \sim \frac{1}{\sqrt{k}}$ ,  $t_r \sim \frac{1}{V}$  ;

- $t_g = t_f \Leftrightarrow kV^2 = cste \Leftrightarrow \log k + 2\log V = cste$ , droite de pente  $-2$ , dessus  $t_g > t_f$ , dessous  $t_g < t_f$  ;
- $t_r = t_g \Leftrightarrow k/V^2 = cste \Leftrightarrow \log k = 2\log V + cste$ , droite de pente  $+2$ , dessus  $t_r > t_g$ , dessous  $t_r < t_g$  ;
- $t_r = t_f \Leftrightarrow k = cste \Leftrightarrow \log k = cste$  : droite de pente  $0$ , dessus  $t_r > t_f$ , dessous  $t_r < t_f$  ;

Les 3 droites sont concourantes et délimitent six domaines.



5.2.b) Quand  $t_g$  augmente, devient comparable à  $t_r$ , et que  $t_g V$  devient supérieur à  $d$ , le palet ne peut plus se positionner assez près de la plaque pour qu'il puisse exister une phase fixe.

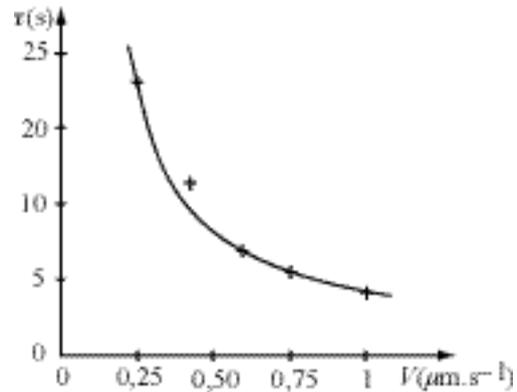
5.2.c) La reptation joue un rôle significatif quand  $t_r$  prend des valeurs supérieures à  $t_f$  et  $t_g$  (voir ci-dessus).

5.2.d) On observe le régime permanent dans le domaine de prédominance de  $t_g$  (pour des vitesses de plus en plus élevées).

5.3.a) On obtient le tableau et la courbe :

$V((\text{m.s}^{-1}))$	0,25	0,42	0,59	0,75	1
$t(\text{s})$	$23,1 \pm 0,3$	$11,4 \pm 0,3$	$6,9 \pm 0,3$	$5,4 \pm 0,3$	$4,2 \pm 0,3$
$Vt(\text{mm})$	5,8	4,8	4,1	4,1	4,2

5.3.b) On s'attend à un loi en  $1/V$  ; ce qui est approximativement le cas ; la loi est moins bien vérifiée pour les vitesses les plus faibles.



5.3.c) On obtient le tableau :

$V(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	0,25	0,42	0,59	0,75	1
$l(\text{mm})$	2,2	1,5	0,73	0,36	0,18

L'allongement  $l$  est continu à la transition.

5.3.d) Si  $\mathbf{a} > 0$ , le régime permanent de type 2.3.a est stable ; une fois obtenu après augmentation de  $V$ , par diminution lente de  $V$ , le régime permanent subsiste. On ne retrouve pas le régime fixe-glisse.

Si  $\mathbf{a} < 0$ , le régime permanent est instable et ne peut être obtenu de toute façon.

5.4.a) On trouve :

$V(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	275	525
$t_f(\text{s})$	3,6	1,6
$Vt_f(\text{mm})$	990	840

$t_f$  doit être en  $1/V$  ce qui est vérifié à 10 % près.

5.4.b) L'allongement  $l$  est à valeur discontinue à la transition, soit de l'ordre de 1000  $\text{mm}$  soit nulle.

5.4.c) Si  $t_r = t_f$ , le palet n'a pas le temps de se positionner en contact intime avec la plaque ; soit il est bien positionné immédiatement et alors la phase fixe se produit et est suivie d'une phase glisse ; soit il n'est pas bien positionné et la phase fixe ne se produit pas ; d'où l'aspect aléatoire du départ de la phase fixe et de l'occurrence d'un fixe-glisse.

5.4.d) Même réponse qu'en 5.3.d.