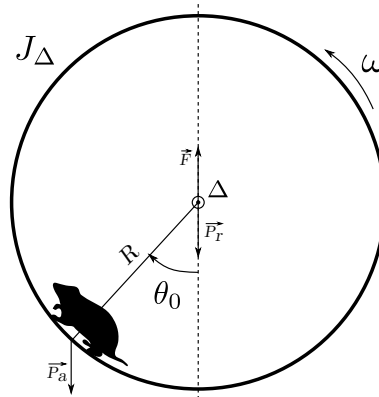


## DM8 : Rotation solide et chimie – corrigé

Le travail en groupe est fortement encouragé, vous pouvez rendre une copie par groupe de 3. Attention, tous les membres du groupe doivent avoir fait tout le DM ! Il ne s'agit pas de partager le travail.

### Exercice 1 : LE HAMSTER

1. Les forces qui s'exercent sur la roue sont le *poids du hamster*, le *poids de la roue* et la *réaction de l'axe de rotation* sur la roue. Comme la roue est globalement immobile, on en conclut que la somme des ces forces est nulle.



2. Le moment cinétique de la roue du hamster est  $L_{\Delta} = J_{\Delta}\omega$ .
3. D'après le théorème du moment cinétique :  $\frac{dL_{\Delta}}{dt} = J_{\Delta} \frac{d\omega}{dt} = \mathcal{M}_{\Delta}(\vec{P}_a) = mgR \sin \theta_0$ . La réaction de l'axe de rotation et le poids de la roue passant par l'axe, leur moment est nul. On a donc l'accélération angulaire :  $\frac{d\omega}{dt} = \frac{mgR \sin \theta_0}{J_{\Delta}}$ .
4. On a montré à la question précédente que l'accélération angulaire de la roue est constante, donc  $\omega(t) = \frac{mRg \sin \theta_0}{J_{\Delta}} t$ .
5. L'énergie cinétique de la roue est  $E_c(t) = \frac{1}{2} J_{\Delta} \omega(t)^2$ . Donc  $E_C(t) = \frac{(mRg \sin \theta_0)^2}{2J_{\Delta}} t^2$ .
6. Le hamster court à une vitesse  $v$ , la vitesse angulaire correspondante est  $\omega = \frac{v}{R}$ . Le temps qu'il met pour atteindre cette vitesse est :  $t = \frac{J_{\Delta} \omega}{mRg \sin \theta_0} \simeq 0,3 \text{ s}$ .
7. L'énergie cinétique de la roue est alors  $E_c = \frac{1}{2} J_{\Delta} \omega^2 = 70 \text{ mJ}$ .
8. Lorsque la vitesse de course du hamster est constante, l'accélération angulaire de la roue est nulle et donc le moment des forces appliquées sur la roue doit également être nul. C'est le cas uniquement pour  $\theta_0 = 0$ .
9. On procède de la même manière que dans la question 3 en ajoutant au moment du poids le couple résistant des frottements, il faut donc remplacer  $mRg \sin \theta_0$  par  $mRg \sin \theta_0 - \Gamma_{\Delta}$ .
10. Dans ces conditions, lorsque le hamster court à vitesse constante l'accélération angulaire étant nulle, il faut que la somme des moments des forces appliquées à la roue soit nulle, et donc le moment du poids doit compenser exactement le couple résistant du aux frottements. On a alors  $mRg \sin \theta_0 - \Gamma_{\Delta} = 0$  et donc  $\theta_0 = \arcsin \frac{\Gamma_{\Delta}}{mRg}$ .
11. Lorsque le hamster court, la vitesse de rotation de la roue est  $\omega_0 = \frac{v_0}{R}$ .
12. Juste avant que le hamster ne s'arrête de courir, **son énergie cinétique est nulle** car sa il a une vitesse nulle dans le référentiel du laboratoire.  
Si on prend l'origine des abscisses au centre de la roue, son énergie potentielle de pesanteur est  $E_p = mgh = -mgR$ .  
L'énergie cinétique de rotation de la roue est  $E_{cR} = \frac{1}{2} J_{\Delta} \omega_0^2$ .  
L'énergie mécanique totale du système est la somme des énergies cinétiques et potentielles, soit  $E_m = -mgR + \frac{1}{2} J_{\Delta} \omega_0^2$ .

13. Juste après que le hamster ne s'arrête de courir, les expressions de l'énergie cinétique de la roue et de l'énergie potentielle du hamster restent les mêmes en remplaçant  $\omega_0$  par  $\omega_1$ . Seulement maintenant l'énergie cinétique du hamster n'est plus nulle, il avance à la même vitesse que la roue donc son énergie cinétique est :  $E_{cH} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mR^2\omega_1^2$ .

L'égalité des énergies mécaniques avant et après l'arrêt du hamster donne :

$$\frac{1}{2}J_{\Delta}\omega_0^2 - mgR = \frac{1}{2}J_{\Delta}\omega_1^2 - mgR + \frac{1}{2}mR^2\omega_1^2 \quad \text{soit} \quad \boxed{\omega_1 = \omega_0 \sqrt{\frac{J_{\Delta}}{J_{\Delta} + mR^2}}}$$

14. L'énergie mécanique reste constante car on néglige les frottements entre la roue et son axe. Elle vaut

$$E_m = \underbrace{\frac{1}{2}J_{\Delta}\omega^2}_{E_{cR}} + \underbrace{\frac{1}{2}mR^2\omega^2}_{E_{cH}} - \underbrace{mgR \cos \theta}_{E_p} = \frac{1}{2}(J_{\Delta} + mR^2)\omega^2 - mgR \cos \theta$$

15. En écrivant que l'énergie mécanique est constante on obtient

$$\frac{1}{2}(J_{\Delta} + mR^2)\omega^2 - mgR \cos \theta = \frac{1}{2}(J_{\Delta} + mR^2)\omega_1^2 - mgR \quad \text{soit} \quad \boxed{\omega = \sqrt{\omega_1^2 - \frac{2mgR(1 - \cos \theta)}{J_{\Delta} + mR^2}}}$$

16. Lorsque le hamster est au sommet de la roue, il subit son poids  $\vec{P} = m\vec{g}$  dirigé verticalement vers le bas, et la réaction de la roue  $\vec{K}$  dirigée également vers le bas (car l'accélération tangentielle du hamster est nulle en ce point).
17. L'accélération normale s'écrit en coordonnées polaires (lorsque le rayon de la trajectoire est constant) comme  $\vec{a}_r = -R\omega^2\vec{e}_r$ . Ce qui en utilisant la question 15 donne l'expression demandée :

$$\vec{a} = -R \left( \omega_1^2 - \frac{2mgR(1 - \cos \theta)}{J_{\Delta} + mR^2} \right) \vec{e}_r$$

18. En appliquant le PFD au hamster lorsqu'il se trouve au sommet de la trajectoire ( $\theta = \pi$ ) et en le projetant sur  $\vec{e}_r$ , on obtient :

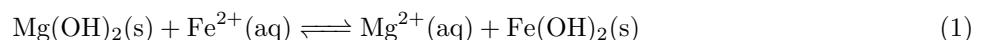
$$-mg - K = ma_r = -mR \left( \omega_1^2 - \frac{4mgR}{J_{\Delta} + mR^2} \right) \quad \text{soit} \quad K = mR \left( \omega_1^2 - \frac{4mgR}{J_{\Delta} + mR^2} \right) - mg$$

Avec les valeurs numériques données, on trouve  $K < 0$ , ce qui ne permet pas au hamster de faire un looping.

19. En y regardant en détails, on remarque que la vitesse de rotation initiale de la roue  $\omega_0$ , même si elle restait constante après l'arrêt du hamster serait trop faible pour permettre un looping. Il faut donc déjà augmenter  $\omega_0$  et donc réduire  $R$  (le hamster ne peut pas courir plus vite !). Ensuite il faut aussi augmenter  $J_{\Delta}$  en lui installant une roue plus lourde

## Exercice 2 : AUTOUR DU MAGNÉSIUM

- $[\text{Mg}] = 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] = 1s^2 2s^2 2p^6$ .
- Le magnésium est dans la seconde colonne du bloc  $s$ , donc dans la deuxième colonne du tableau périodique.
- Équation :



- Puisque le précipité de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  se transforme en  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  dès les premières gouttes de  $\text{Fe}^{2+}$ , on en conclut que  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  est moins soluble dans l'eau que  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , donc  $K_{s2} < K_{s1}$ .
- On a vu que  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  est moins soluble dans l'eau que  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , donc il apparaît en premier lorsque la concentration en ions  $\text{HO}^-$  augmente (c'est à dire que  $\text{pOH}$  diminue). Les points anguleux  $A$  et  $B$  correspondent à l'apparition du précipité. La courbe en pointillés correspond donc à  $\text{Fe}^{2+}$  et la courbe pleine à  $\text{Mg}^{2+}$ .
- On détermine d'après la courbe que la valeur limite de  $\text{pOH}$  pour laquelle il y a apparition de  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  est  $\text{pOH}_l = 7$ . Or on a

$$K_{s2} = \frac{1}{c^3}[\text{Fe}^{2+}][\text{HO}^-]^2 = \frac{1}{c^3}[\text{Fe}^{2+}] \times 10^{-2\text{pOH}_l} = 10^{-15} \quad (2)$$

De la même manière, on trouve  $K_{s1}$  = qui était de toute façon donné dans l'énoncé.

7. La constante d'équilibre de la réaction (1) s'écrit comme

$$K_1 = \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{Fe}^{2+}]} = \frac{1}{\underbrace{c^{\circ 3} [\text{Mg}^{2+}] [\text{HO}^-]^2}_{K_{s1}}} \times \frac{1}{\underbrace{\frac{1}{c^{\circ 3} [\text{Fe}^{2+}] [\text{HO}^-]^2}}_{K_{s2}}} = \frac{K_{s1}}{K_{s2}} = 10^{4,6} > 10^4 \quad (3)$$

8. L'équation de dissolution est :



9. La constante d'équilibre de cette réaction est :

$$K_2 = \frac{[\text{MgY}^{2-}] [\text{HO}^-]^2}{c^{\circ 2} [\text{Y}^{4-}]} = \frac{c^{\circ} [\text{MgY}^{2-}]}{\underbrace{[\text{Mg}^{2+}] [\text{Y}^{4-}]}_{\beta}} \times \underbrace{\frac{[\text{Mg}^{2+}] [\text{HO}^-]^2}{c^{\circ 3}}}_{K_{s1}} = 10^{-1,8} \quad (5)$$

On établit un tableau d'avancement, sachant qu'à l'état final, la totalité du précipité a disparu.

	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	+	$\text{Y}^{4-}$	$\rightleftharpoons$	$2 \text{HO}^-$	+	$\text{MgY}^{2-}$
État initial	$n$		$n'$		0		0
État final	$n - \xi = 0$		$n' - \xi$		$2\xi$		$\xi$

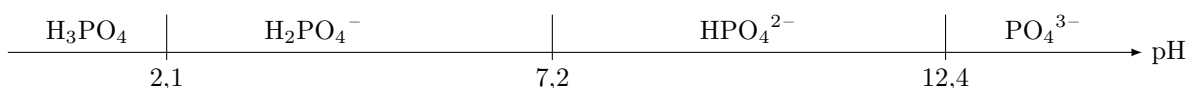
On écrit l'expression de la constante d'équilibre à l'état final pour déterminer  $n'$ .

$$K_2 = \frac{\frac{\xi}{V} \left( \frac{2\xi}{V} \right)^2}{c^{\circ 2} \frac{n' - \xi}{V}} = \frac{4 \left( \frac{n}{V} \right)^3}{c^{\circ 2} \frac{n' - n}{V}} \Leftrightarrow n' = n + \frac{4n^3}{c^{\circ 2} K_2 V^2} \approx 3,52 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \quad (6)$$

10. Le produit de solubilité de la struvite est

$$K_{s3} = \frac{1}{c^{\circ 3}} [\text{Mg}^{2+}] [\text{PO}_4^{3-}] [\text{NH}_4^+] \quad (7)$$

11. Diagramme de prédominance :



12. Diagramme de prédominance :



13. À un pH de 9,5, on se trouve bien dans la zone de prédominance de  $\text{HPO}_4^{2-}$ , on pourra donc considérer que  $[\text{HPO}_4^{2-}] = c_P$ . On utilise alors l'expression de la constante d'acidité  $K_{a3}$  du couple  $\text{HPO}_4^{2-}/\text{PO}_4^{3-}$  pour déterminer la concentration en  $\text{PO}_4^{3-}$ . On a :

$$K_{a3} = \frac{[\text{PO}_4^{3-}] [\text{H}^+]}{[\text{HPO}_4^{2-}]} \Leftrightarrow [\text{PO}_4^{3-}] = \frac{K_{a3} c_P}{10^{-\text{pH}}} \approx 5,04 \cdot 10^{-6} \text{ mol } \ell^{-1} \quad (8)$$

14. Cette fois ci, le pH est trop près d'une frontière pour pouvoir faire une approximation, on établit un tableau d'avancement en concentrations :

	$\text{NH}_4^+$	+	$\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{NH}_3$	+	$\text{H}_3\text{O}^+$
État initial	$c_N$		—		0		$10^{-\text{pH}}$
État final	$c_N - x$		—		$x$		$10^{-\text{pH}}$

Et on a

$$K_{a4} = \frac{[\text{NH}_3] [\text{H}_3\text{O}^+]}{c^{\circ} [\text{NH}_4^+]} = \frac{x \times 10^{-\text{pH}}}{c^{\circ} (c_N - x)} \Leftrightarrow x = c_N \frac{K_{a4}}{10^{-\text{pH}} + K_{a4}} \approx 9,60 \cdot 10^{-3} \text{ mol } \ell^{-1} \quad (9)$$

Et la concentration en  $\text{NH}_4^+$  est  $[\text{NH}_4^+] = c_N - x = 5,40 \cdot 10^{-3} \text{ mol } \ell^{-1}$

15. — Pour faire apparaître le précipité de struvite, il faut que la solution soit saturée, donc

$$K_{s3} = \frac{1}{c^{\circ 3}} [\text{Mg}^{2+}] [\text{PO}_4^{3-}] [\text{NH}_4^+] \Leftrightarrow [\text{Mg}^{2+}] = \frac{c^{\circ 3} K_{s3}}{[\text{PO}_4^{3-}] [\text{NH}_4^+]} \approx 3,68 \cdot 10^{-4} \text{ mol } \ell^{-1} \quad (10)$$

Donc il faut introduire  $m = [\text{Mg}^{2+}] \times V \times M(\text{MgCl}_2) \approx 175 \text{ g}$

- On établit un tableau d'avancement en concentrations pour les différents groupes d'espèces :

	Magnésium	Azote	Phosphore	$\rightleftharpoons$	$\text{MgPO}_4\text{NH}_4$
État initial	$c_M$	$c_N$	$c_P$		0
État final	$c_M - x$	$c_N - x$	$c_P - x = 0,1c_P$		$x = 0,9c_P$

En utilisant les résultats des questions 13 et 14, on montre que

$$[\text{NH}_4^+] = \frac{K_{a4}}{10^{-\text{pH}} + K_{a4}} (c_N - 0,9c_P) \quad \text{et} \quad [\text{PO}_4^{3-}] = \frac{K_{a3}}{10^{-\text{pH}}} \times 0,1c_P \quad (11)$$

En écrivant l'expression de  $K_{s3}$ , on obtient

$$c_M = 0,9c_P + \frac{K_{s3}c^{\circ 3}}{(c_N - 0,9c_P) \frac{10^{-\text{pH}}}{10^{-\text{pH}} + K_{a4}} \times 0,1c_P \frac{K_{a3}}{10^{-\text{pH}}}} \approx 8,44 \cdot 10^{-3} \text{ mol } \ell^{-1} \quad (12)$$

La masse de  $\text{MgCl}_2$  à introduire est  $m = M(\text{MgCl}_2)V_{c_M} \approx 4,02 \text{ kg}$ .