



DS5 – PHYSIQUE-CHIMIE – CORRIGÉ

D.Malka – MPSI 2019-2020 – Lycée Jeanne d'Albret

30.01.2020

Problème 1 – Compensateur de champ magnétique extérieur pour une bobine à noyau

Deux bobines d'axe (Oz) sont enroulées autour d'un cylindre ferromagnétique. La première bobine a pour vocation d'être utilisée au sein d'un circuit, la deuxième a pour but d'étendre le domaine de linéarité de la première malgré la présence du cylindre ferromagnétique (fig.1).

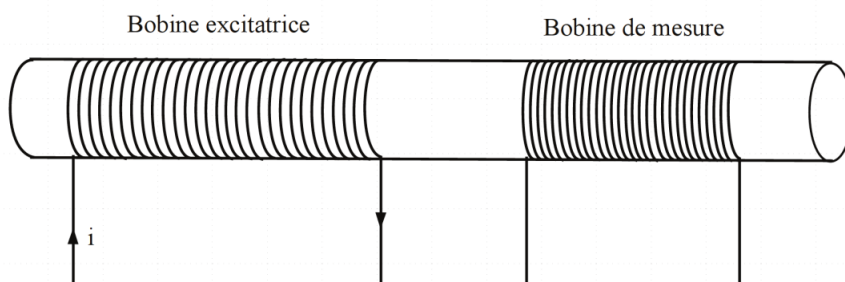


FIGURE 1 – Barreau ferromagnétique avec bobine excitatrice et bobine de mesure

La première bobine – la *bobine excitatrice* – est parcourue par un courant $i(t)$ sinusoïdal de pulsation ω $i(t) = i_0 + i_m \sin(\omega t)$. Par induction électromagnétique, la deuxième bobine – la *bobine de mesure* – est alors le siège d'une force électromotrice $e(t)$ dont l'allure est représentée fig.2.

1. Signaux issus des bobines

- 1.1 Le signal $e(t)$ est périodique de même période que le courant $i(t)$ mais n'est pas harmonique. D'après le spectre du signal, la composante fondamentale a pour fréquence $f_1 = 1 \text{ kHz}$ et pour amplitude $a_1 = 16 \text{ V}$. La composante continue est nulle.
- 1.2 La réponse $e(t)$ du système {bobines + cylindre ferromagnétique} à l'excitation harmonique $i(t)$ est anharmonique donc ce système est non linéaire.

Modélisation simple permettant de la tension $e(t)$ aux bornes de la bobine de mesure :

$$e(t) = a \cdot \frac{di(t)}{dt} - b \cdot \frac{di(t)}{dt} i^2(t)$$

1.3 Calculons $e(t)$.

$$e(t) = ai_m \omega \cos \omega t - bi_m \omega \cos \omega t (i_0 + i_m \sin \omega t)^2$$

$$e(t) = ai_m \omega \cos \omega t - bi_m \omega \cos \omega t (i_0^2 + 2i_0 i_m \sin \omega t + i_m^2 \sin^2 \omega t)$$

$$e(t) = ai_m \omega \cos \omega t - bi_0^2 i_m \omega \cos \omega t - 2bi_0 i_m^2 \omega \cos \omega t \sin \omega t - bi_m^3 \omega \cos \omega t \sin^2 \omega t$$

$$e(t) = (ai_m - bi_0^2 i_m) \omega \cos \omega t - bi_0^2 i_m^2 \omega \sin 2\omega t - bi_m^3 \omega \cos \omega t \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos 2\omega t}{2} \right)$$

$$e(t) = (ai_m - bi_0^2 i_m) \omega \cos \omega t - bi_0^2 i_m^2 \omega \sin 2\omega t - \frac{1}{2} bi_m^3 \omega \cos \omega t + \frac{bi_m^3}{2} \omega \cos \omega t \cos 2\omega t$$

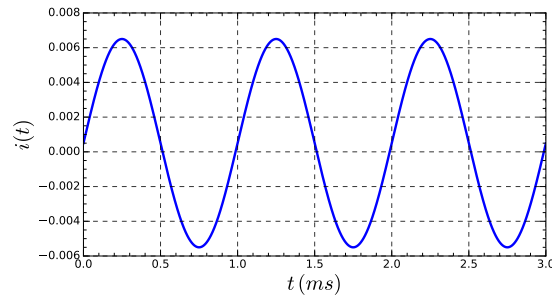
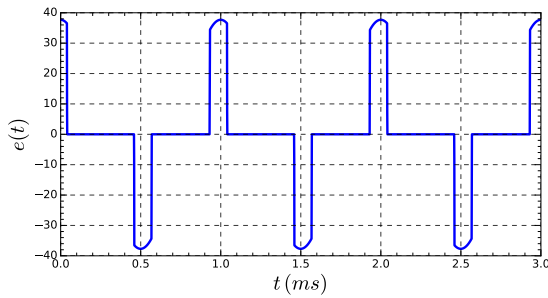
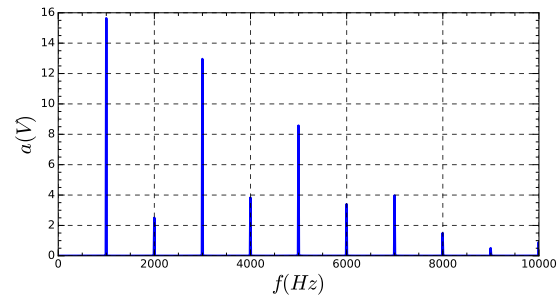
(a) Courant $i(t)$ parcourant la bobine excitatrice(b) Tension $e(t)$ aux bornes de la bobine de mesure(c) Spectre de $e(t)$

FIGURE 2 – Les différents signaux relatifs à la bobine excitatrice et à la bobine de mesure.

$$\text{avec } \cos \omega t \cos 2\omega t = \frac{1}{2} \cos \omega t + \frac{1}{2} \cos 3\omega t$$

$$e(t) = (a i_m - b i_0^2 i_m) \omega \cos \omega t - b i_0^2 i_m^2 \omega \sin 2\omega t - \frac{1}{2} b i_m^3 \omega \cos \omega t + \frac{1}{4} b i_m^3 \omega \cos \omega t + \frac{1}{4} b i_m^3 \omega \cos 3\omega t$$

$$e(t) = (a i_m - b i_0^2 i_m - \frac{1}{4} b i_m^3) \omega \cos \omega t - b i_0^2 i_m^2 \omega \sin 2\omega t + \frac{1}{4} b i_m^3 \omega \cos 3\omega t$$

Soit

$$e(t) = K_1 \cos(\omega t) + K_2 \sin(2\omega t) + K_3 \cos(3\omega t)$$

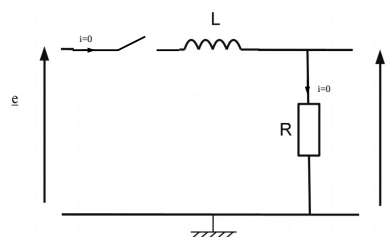
$$\text{avec } \boxed{K_1 = (a i_m - b i_0^2 i_m - \frac{1}{4} b i_m^3) \omega} \quad \boxed{K_2 = -b i_0^2 i_m^2 \omega} \quad \boxed{K_3 = \frac{1}{4} b i_m^3 \omega}$$

2. Traitement du signal

En pratique le signal utilisé pour alimenter la bobine excitatrice possède une fréquence f_e typiquement comprise entre 1 kHz et 10 kHz. La chaîne représenté fig.3 est conçu pour récupérer la composante K_2 du signal $e(t)$ qui est utilisée pour étendre le domaine de fonctionnement linéaire de la bobine d’excitation. C’est le mécanisme dit de *compensation*.

2.1 On propose le filtre fig.4 comme passe-bande.

2.1.1 En basse fréquence, le condensateur se comporte comme un interrupteur ouvert.



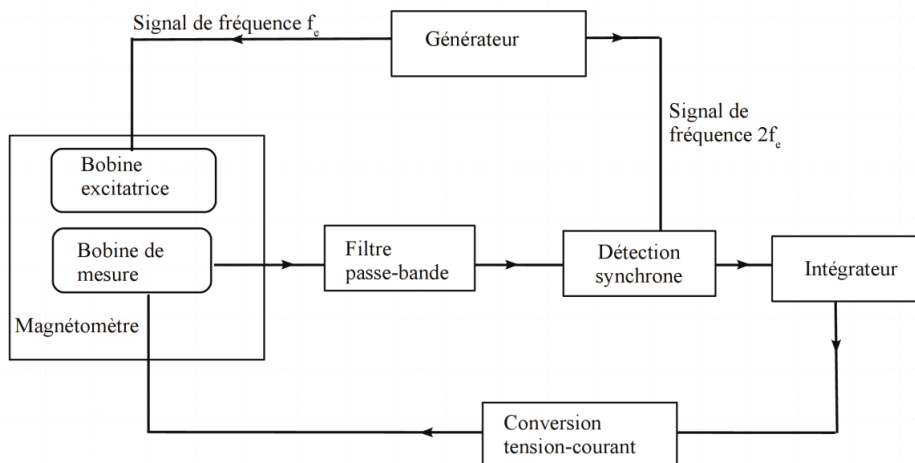


FIGURE 3 – Chaîne de traitement du signal issu de la bobine de mesure

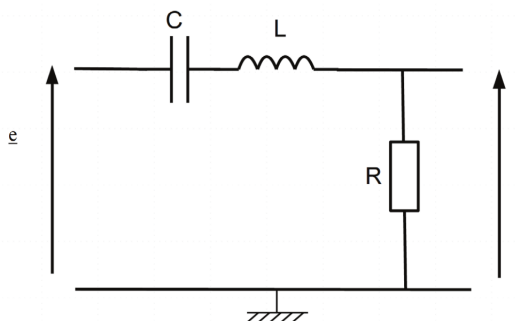
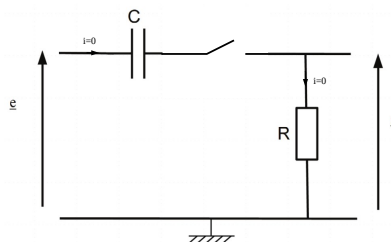


FIGURE 4 – Filtre proposé comme passe-bande

On en déduit $s = 0$.

En haute fréquence, la bobine se comporte comme un interrupteur ouvert.



On en déduit $s = 0$.

On peut raisonnablement penser que le filtre proposé est un passe-bande.

2.1.2 Montrons que la fonction de transfert du filtre s’écrit :

$$\underline{H} = \frac{\underline{s}}{\underline{e}} = \frac{A}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

Par la formule du pont diviseur de tension :

$$\underline{s} = \frac{R}{R + jL\omega + \frac{1}{jC\omega}} \underline{e}$$

$$\underline{s} = \frac{1}{1 + j\left(\frac{L}{R}\omega - \frac{1}{RC\omega}\right)} \underline{e}$$

En posant $A = 1$, $\frac{Q}{\omega_0} = \frac{L}{R}$ et $Q\omega_0 = \frac{1}{RC}$ soit $A = 1$, $Q = \frac{L\omega_0}{R}$ et $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$, il vient :

$$\underline{H} = \frac{A}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

2.1.3 Gain maximal : $H_{\max} = H(\omega_0) = 1$

2.1.4 Allure du gain $H = |H|$ fig.5.

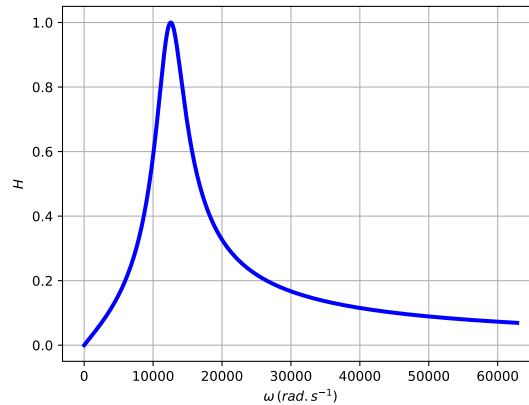


FIGURE 5 – Allure du gain $H = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}$ pour $\omega_0 = 12\,566 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

2.1.5 On souhaite conserver la composante de fréquence $2f_e$ du signal $e(t)$ et atténuer les autres harmoniques donc on choisit $\omega_0 = 2\omega_e = \frac{f_e}{\pi}$. A.N. $\omega_0 = 12\,566 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

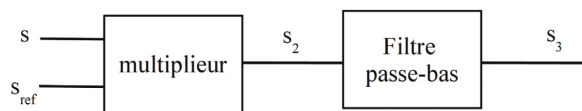
2.2 Détection synchrone

Après filtrage passe-bande : $s(t) = s_p(t) + b(t)$.

Avec $s_p(t)$ le signal physique utile de fréquence $2f_e$, $b(t)$ le bruit et $\langle s_p(t) \rangle = \langle b(t) \rangle = 0$.

On pose $s_p(t) = A \cos(2\omega_e t + \varphi)$ et $s_{\text{ref}}(t) = B \cos(2\omega_e t)$ avec $\langle s_{\text{ref}}(t)b(t) \rangle = 0$

En sortie du multiplieur le signal s’écrit : $s_2(t) = Ks(t)s_{\text{ref}}(t)$ où K est une constante.



2.2.1 Signal de sortie $s_2(t)$ du multiplieur.

$$s_2(t) = Ks(t)s_{\text{ref}}(t)$$

$$s_2(t) = K(s_p(t) + b(t))s_{\text{ref}}(t)$$

$$s_2(t) = K \cdot s_p(t)s_{\text{ref}}(t) + K \cdot b(t)s_{\text{ref}}(t)$$

$$s_2(t) = K.A \cos(2\omega_e t + \varphi) B \cos(2\omega_e t) + K.b(t)s_{\text{ref}}(t)$$

$$s_2(t) = \underbrace{\frac{1}{2}K.A.B \cos \varphi}_{\text{Composante continue}=\langle s_2(t) \rangle} + \frac{1}{2}K.A.B \cos \varphi \cos(4\omega_e t + \varphi) + K.b(t)s_{\text{ref}}(t)$$

2.2.2 On veut que le filtre passe-bas fonctionne en moyenneur. Il faut donc que $f_c \ll f$ pour toutes les fréquences du signal $s_2(t)$. Ces fréquences sont de l’ordre de f_e donc la condition devient

$$f_c \ll f_e. \text{ Pour } f_e = 1 \text{ kHz, on peut proposer } f_c = 1 \text{ Hz.}$$

2.2.3 Valeurs de R et C ?

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\Leftrightarrow RC = \frac{1}{2\pi f_c}$$

Pour $f_c = 1 \text{ Hz}$, $RC \approx 0,16 \text{ s}$. On peut choisir $C = 1,6 \mu\text{F}$ et $R = 100 \text{ k}\Omega$.

2.3 Circuit intégrateur

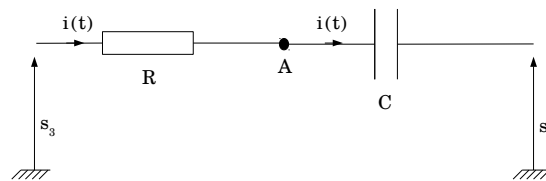


FIGURE 6 – Circuit proposé pour réaliser l’intégration. On admet qu’un dispositif permet d’imposer un potentiel nul au point A sans pour autant connecter ce point à la masse.

Le montage fig.6 vérifie :

$$i(t) = \frac{s_3}{R} \quad \text{et} \quad i(t) = -C \frac{ds_4}{dt}$$

Donc :

$$\frac{ds_4}{dt} = -\frac{s_3}{RC}$$

ou encore :

$$s_4 = -\frac{1}{RC} \int s_3 dt$$

Le circuit est bien un intégrateur.

Problème 2 – Pourquoi il faut freiner avant un virage.

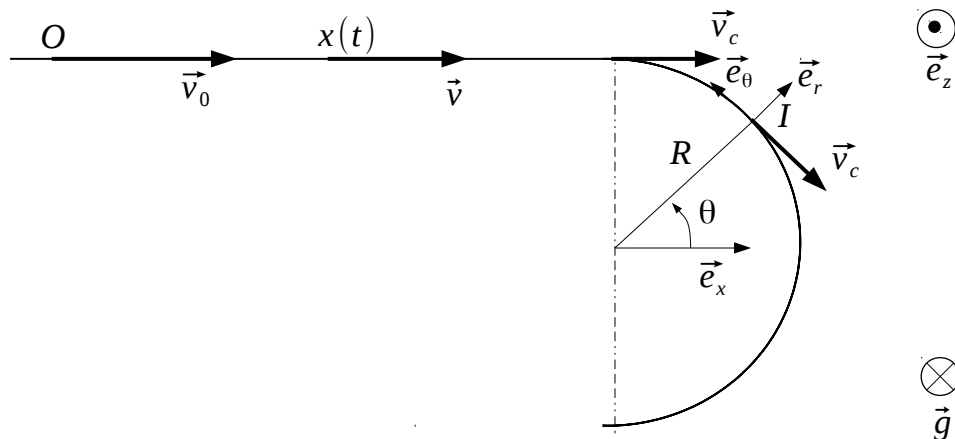


FIGURE 7 – La vitesse de la voiture en différents points de sa trajectoire

1. A l'approche du virage, à $t = 0$, la voiture décélère avec une accélération $a_0 = -5 \text{ m.s}^{-2}$ constante pendant une durée t_0 .

L'accélération de la voiture vaut a_0 et s'écrit \ddot{x} en coordonnées cartésiennes donc :

$$\ddot{x} = a_0$$

Pour obtenir la vitesse, on intègre entre t quelconque et 0 :

$$\dot{x}(t) - \dot{x}(0) = a_0 t$$

avec $\dot{x}(0) = v_0$ et $\dot{x}(t) = v$:

$$v(t) = v_0 + a_0.t$$

A l'instant t_0 :

$$v = v(t_0) = v_0 + a_0.t_0$$

2. Équation horaire $x(t)$ du centre d'inertie I de la voiture durant la phase de décélération.

Pour obtenir l'équation horaire, intègre la vitesse en 0 et t :

$$x(t) - x(0) = \frac{1}{2}a_0.t^2 + v_0.t$$

En posant arbitrairement $x(0) = 0$, il vient :

$$x(t) = \frac{1}{2}a_0.t^2 + v_0.t$$

3. Mouvement du centre d'inertie I de la voiture dans le virage à vitesse constante v_c .

3.1 La vitesse de la voiture en coordonnées polaire s'écrit :

$$\vec{v} = \dot{r}\vec{e}_r + r\dot{\theta}\vec{e}_\theta$$

or $r = R = \text{cste}$ donc $\dot{r} = 0$ d'où :

$$\vec{v} = R\dot{\theta}\vec{e}_\theta \Rightarrow v_c = R|\dot{\theta}|$$

or $v_c = \text{cste}$ donc $\dot{\theta} = \omega = \text{cste}$.

3.2 Accélération \vec{a} de la voiture dans le virage.

En dérivant la vitesse $\vec{v} = R\dot{\theta}\vec{e}_\theta$, il vient

$$\vec{a} = -R\omega^2\vec{e}_r$$

Soit encore avec $\omega^2 = \frac{v_c^2}{R^2}$:

$$\vec{a} = -\frac{v_c^2}{R}\vec{e}_r$$

3.3 L’accélération radiale de la voiture est non nulle donc d’après le théorème de la résultante cinétique, il existe une force \vec{T} de même direction.

3.4 Le théorème de la résultante cinétique projeté selon \vec{e}_z donne :

$$\vec{P} + \vec{N} = \vec{0}$$

Donc :

$$\|\vec{N}\| = mg$$

3.5 Le théorème de la résultante cinétique projeté selon \vec{e}_r donne :

$$\vec{T} = -m\frac{v_c^2}{R}\vec{e}_r$$

Donc :

$$\vec{T} = \left\| m\frac{v_c^2}{R} \right\|$$

3.6 La voiture adhère au sol tant que $\|\vec{T}\| < \lambda\|\vec{N}\|$. Soit :

$$m\frac{v_c^2}{R} < \lambda mg$$

Soit :

$$v_c < v_{max} \quad \text{avec} \quad v_{max} = \sqrt{\lambda g R}$$

3.7 Plus le rayon de courbure du virage est petit plus v_{max} est faible ce qui est cohérent avec l’expérience (pour $R \mapsto \infty$, ligne droite, $v_{max} \mapsto \infty$). Plus λ , qui mesure l’adhérence de la voiture, est faible plus v_{max} est faible ce qui est cohérent également.

3.8 Sur route sèche : $\lambda = 0,70$, $R = 50$ m et $g = 9,81$ m · s⁻². $v_{max} = 18,5$ m · s⁻¹ = 66,7 km · h⁻¹.

Sur route verglacée : $\lambda = 0,05$, $R = 50$ m et $g = 9,81$ m · s⁻². $v_{max} = 4,95$ m · s⁻¹ = 17,8 km · h⁻¹.

4. Freinage pendant t_0 donc sur une distance $d_0 = x(t_0)$ avec t_0 tel que $v(t_0) < v_{max}$ soit :

$$v_0 + a_0.t_0 < v_{max}$$

$$\Leftrightarrow t_0 > \frac{v_{max} - v_0}{a_0}$$

donc, comme

$$d_0 = x(t_0) = \frac{1}{2}a_0.t_0^2 + v_0.t_0$$

,

$$d_0 > \frac{1}{2}a_0 \cdot \left(\frac{v_{max} - v_0}{a_0} \right)^2 + v_0 \cdot \frac{v_{max} - v_0}{a_0}$$

A.N. : $d_0 \approx 28$ m. Ordre de grandeur cohérent.

Problème 3 – Autour du carbonate de calcium

Le calcium est le cinquième élément le plus abondant de la croûte terrestre. On le trouve dans les roches calcaires constituées principalement de carbonate de calcium $CaCO_3$. Le calcium joue un rôle essentiel chez la plupart des organismes vivants vertébrés en contribuant notamment à la formation des os ou des dents. . .

Constante du gaz parfait : $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$.

1. L'élément calcium

1.1 Ca^{2+} : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$.

1.2 L'ion calcium Ca^{2+} a pour configuration électronique $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$ qui est celle du gaz noble le plus proche dans la classification (l'argon). Cette configuration électronique lui confère une grande stabilité.

1.3 Le magnésium Mg appartient à la même famille que le calcium. Il a donc une réactivité chimique analogue et forme l'ion Mg^{2+} . Il est moins électronégatif que le calcium donc moins réducteur.

Le squelette d'un homme adulte a une masse moyenne $m = 12,0 \text{ kg}$. Les os sont constitués par de l'eau (50% en masse), des composés organiques (25% en masse) et des composés minéraux (25% en masse). En première approximation, on peut admettre que le phosphate de calcium $Ca_3(PO_4)_2$ est l'unique composé minéral présent dans les os.

Masses molaires atomiques en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$: Ca : 40 ; P : 31 ; O : 16.

1.4 Masse m_{Ca} totale de calcium présente chez un adulte ?

La masse de phosphate vaut d'une part 25% de la masse du squelette :

$$m_{\text{phosphate}} = \frac{m}{4}$$

et d'autre part s'écrit :

$$m_{\text{phosphate}} = m_{Ca} + m_P + m_O$$

Soit en fraction massique :

$$w_{Ca} = \frac{m_{Ca}}{m_{\text{phosphate}}}$$

Cette fraction massique est intensive et peut donc se calculer sur une mole :

$$w_{Ca} = \frac{m_{Ca}}{m_{\text{phosphate}}} = \frac{3M_{Ca}}{M_{\text{phosphate}}}$$

Finalement,

$$m_{Ca} = w_{Ca} m_{\text{phosphate}} = \frac{3M_{Ca}}{M_{\text{phosphate}}} \times \frac{m}{4}$$

A.N. : avec $M_{\text{phosphate}} = 310 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ $m_{Ca} \approx 1,2 \text{ kg}$.

1.5 Volume v de lait à boire quotidiennement pour assurer l'apport nécessaire en calcium sachant que la concentration massique est $t = 1110 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

$$\frac{m_{Ca}}{5} = 360t.v$$

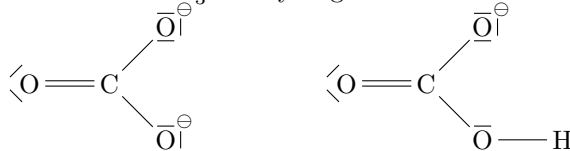
$$\Leftrightarrow v = \frac{m_{Ca}}{5 \times 360t}$$

A.N. : $v \approx 0,6 \text{ L}$. Ordre de grandeur cohérent.

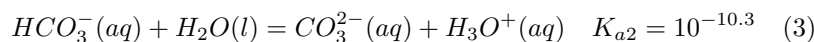
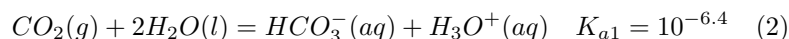
2. Solubilité du carbonate de calcium

Le carbonate de calcium $CaCO_3$ est le composé majeur des roches calcaires comme la craie mais également du marbre. C'est le constituant principal des coquilles d'animaux marins, du corail et des escargots. On évalue sa solubilité c'est-à-dire la quantité qui disparaît par unité de volume dans un solvant donné.

2.1 Schémas de Lewis des ions carbonate CO_3^{2-} et hydrogencarbonate HCO_3^- .



On donne les équilibres suivant :



2.2 Solubilité s du carbonate de calcium dans l’eau pure.

D’après l’équation (1), la quantité s de carbonate de calcium qui disparaît par unité de volume est égale à la concentration en ions $Ca^{2+}(aq)$ et en ions $CO_3^{2-}(aq)$. Loi d’action de masse appliquée à l’équilibre (1) :

$$K_s = \frac{[Ca^{2+}][CO_3^{2-}]}{(c^\circ)^2}$$

avec $s = [Ca^{2+}] = [CO_3^{2-}]$:

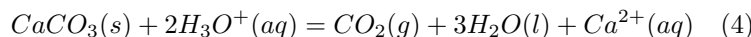
$$K_s = \frac{s^2}{(c^\circ)^2}$$

Soit :

$$s = \sqrt{K_s c^\circ}$$

A.N. : $s = 6,3 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

2.3 En considérant les propriétés acidobasiques des ions carbonates, on aboutit à l’équation :



Constante d’équilibre associée à la réaction (4) ?

$$(4) = (1) - (2) - (3) \text{ donc } K_4 = \frac{K_s}{K_{a1}K_{a2}} = 2,0 \times 10^8.$$

2.4 L’équilibre (4) est atteint si $Q_4 = K_4$ soit :

$$\frac{[Ca^{2+}]_{eq} p_{CO_2}}{p^\circ [H^+]_{eq}} = K_4$$

Si les océans s’acidifient alors, transitoirement, $[H^+] > [H^+]_{eq}$ et donc $Q_4 < K_4$. L’équilibre (4) va alors évoluer dans le sens direct c’est-à-dire dans le sens de la dissolution du carbonate de calcium qui engendre une destruction des coraux océaniques.

3. Cinétique de la dissolution du carbonate de calcium dans une solution acide.

On s’intéresse maintenant à la vitesse de la réaction de dissolution du carbonate de calcium selon deux méthodes.

Pour cela on étudie l’évolution de la réaction entre le carbonate de calcium $CaCO_3(s)$ et un volume $V_0 = 100 \text{ mL}$ d’une solution d’acide chlorhydrique de concentration $c_a = 0,10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. L’équation de la réaction s’écrit :



On considérera que la totalité du dioxyde de carbone formé se dégage.

Première méthode

Dans une première expérience on mesure la pression du dioxyde de carbone apparu en utilisant un capteur de pression différentiel. Le gaz occupe un volume $V = 1,0 \text{ L}$ à la température de 25°C . Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

$t(s)$	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100
$p_{CO_2}(Pa)$	1250	2280	3320	4120	4880	5560	6090	6540	6940	7170

3.1 On suppose que le dioxyde de carbone obéit à l’équation du gaz parfait :

$$n_{CO_2} = \frac{p_{CO_2}V}{RT}$$

3.2 De façon triviale $n_{CO_2} = x$. À $t = 100$ s, $x \approx 2,89$ mmol.

$t(s)$	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100
$x(\text{mmol})$	0,50	0,92	1,34	1,66	1,97	2,24	2,46	2,64	2,80	2,89

Deuxième méthode

Dans une deuxième expérience on mesure le pH de la solution afin de déterminer $[H^+]$ fonction du temps. Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

$t(s)$	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100
$n_{H^+}(\text{mmol})$	9,00	8,20	7,30	6,70	6,10	5,50	5,10	4,70	4,40	4,20

3.3 En dressant un tableau d’avancement, on trouve très simplement :

$$n_{H^+} = c_a V_0 - 2x$$

À $t = 10,0$ s, $x = 0,50$ mmol

$t(s)$	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100
$x(\text{mmol})$	0,50	0,90	1,35	1,65	1,95	2,25	2,45	2,65	2,80	2,90

3.4 Les deux méthodes sont cohérentes.

Une fois les résultats expérimentaux obtenus on désire déterminer l’ordre de la réaction par rapport à $[H^+]$. On utilisera comme expression de la vitesse :

3.5 Vitesse de la réaction par rapport à $[H^+(aq)]$:

$$v = \frac{dx}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{d[H^+]}{dt}$$

3.6 Supposons que la réaction soit d’ordre 2 par rapport à $[H^+]$:

$$v = k[H^+]^2$$

Alors :

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2} \frac{d[H^+]}{dt} &= k[H^+]^2 \\ \Leftrightarrow \frac{d[H^+]}{[H^+]^2} &= -2kdt \\ \rightarrow \int_{[c_a]}^{[H^+]} \frac{d[H^+]}{[H^+]^2} &= -2k \int_0^t dt \\ \Leftrightarrow \frac{1}{c_a} - \frac{1}{[H^+]} &= -2kt \\ \Leftrightarrow \frac{1}{[H^+]V_0} - \frac{1}{c_a V_0} &= \frac{2kt}{V_0} \end{aligned}$$

avec $[H^+] = c_a - 2x$:

$$\frac{1}{c_a V_0 - 2x} - \frac{1}{c_a V_0} = \frac{2kt}{V_0}$$

Dans l'hypothèse d'un ordre 0, on trouve :

$$x = kV_0t$$

Dans l'hypothèse d'un ordre 1, on trouve :

$$\ln\left(\frac{c_a V_0 - 2x}{c_a V_0}\right) = -2kt$$

3.7 Les graphes fig.8 montre que le test de l'ordre 2 est le seul satisfaisant. La réaction est d'ordre 2. D'après la loi intégrale théorique :

$$\frac{1}{c_a V_0 - 2x} - \frac{1}{c_a V_0} = \frac{2kt}{V_0}$$

la pente $a = 1,4318$ de la droite d'ajustement vaut $\frac{2k}{V_0}$ soit :

$$k = \frac{aV_0}{2}$$

A.N. : $k = 7,16 \times 10^{-2} \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

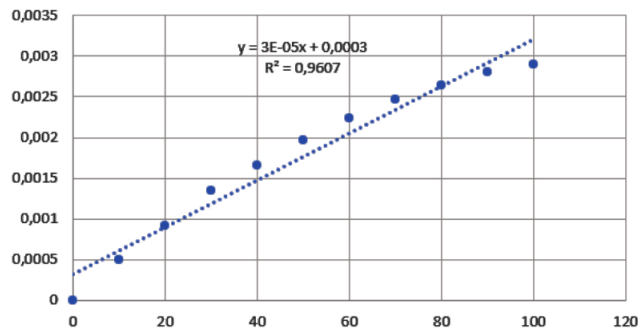
3.8 Evaluons le temps de demi-réaction de la dissolution du carbonate de calcium dans l'océan. On suppose qu'initialement $pH_0 \approx 7$ soit $[H^+]_0 \approx 1 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Pour $t = t_{1/2}$, la réaction étant totale et en supposant les ions oxonium limitant, $x = x_f/2 = \frac{[H^+]_0 V_0}{4}$.
Alors :

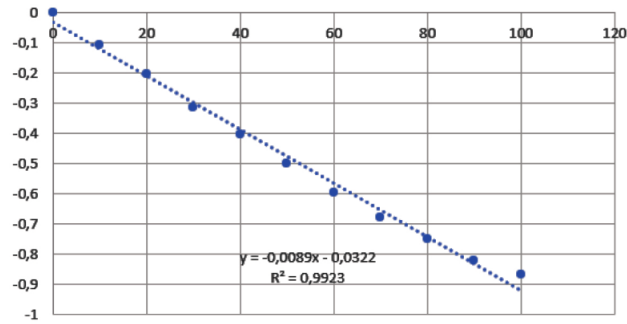
$$\frac{2}{[H^+]_0 V_0} - \frac{1}{[H^+]_0 V_0} = \frac{2kt_{1/2}}{V_0}$$

$$t_{1/2} = \frac{1}{2k[H^+]_0}$$

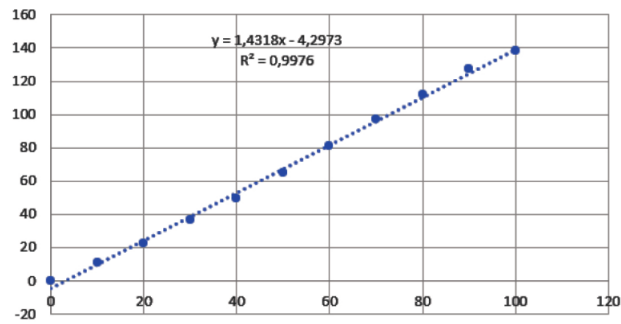
A.N. : $t_{1/2} \approx 7 \times 10^7 \text{ s} \approx 2 \text{ ans}$. C'est extrêmement rapide à l'échelle des temps géologiques.



(a) $x = f(t)$



(b) $\ln(1 - 200x) = f(t)$



(c) $\frac{1}{0.01 - 2x} - 100 = f(t)$

FIGURE 8 – Graphes expérimentaux