

Corrigé de l'épreuve
Mines - Ponts 2017 Physique 1PC

Commentaires sur l'épreuve :

- Parties I et III communes aux filières MP et PSI, et liées entre elles
- Question 2 : notations peu claires :
 - q est la charge traversant une section de dipôle.
 - généralisation de l'utilisation du théorème de Stokes sur un contour fermé au cas d'un dipôle non détaillée dans l'énoncé...cela peut gêner les élèves consciencieux.
- Question 5 : démonstration du cas des memristances associées en parallèle acrobatique.
- Question 18 : pas assez explicite sur la puissance attendue : moyenne ou instantanée ?
- Question 20 : le formulaire ne comporte pas le Laplacien en cylindrique, c'est dommage.
- Question 27 : obscur...

Solution proposée par :

- Séverine Mensch(severine.mensch@prepas.org)
- Ariane Beyrath (ariane.beyrath@gmail.com)

Merci de nous contacter pour toute correction ou ajout.

Rapport de jury :

— Remarques générales

L'épreuve avait pour but d'étudier différents aspects de la physique d'un nouveau composant électronique, le memristor. Ce dipôle passif d'un genre nouveau, capable de modifier de façon durable sa résistance en fonction du courant appliqué, a été proposé en 1971 sur des arguments théoriques, mais ce n'est qu'en 2008 qu'un premier prototype de memristor a enfin été réalisé.

Le problème comportait trois parties largement indépendantes et de difficulté croissante. La première partie proposait d'étudier les caractéristiques générales et le fonctionnement d'un memristor : caractéristique courant-tension $u(i)$, modèle de conductivité, impédance, transfert de puissance. La deuxième partie présentait une analogie hydrodynamique et enfin la troisième partie montrait différents aspects du premier prototype réalisé qu'il s'agissait de relier aux principes généraux de la première partie. Ce problème ne présentait aucune difficulté technique particulière et, curieusement, aucune application numérique.

— Remarques particulières

La partie I.A n'a guère posé de difficulté aux candidats à l'exception des questions 8, 9 et 10. Ces questions s'appuyaient sur la figure 4 qui donnait la caractéristique courant-tension $u(i)$ d'un memristor. Cette caractéristique présentait deux boucles (symétriques par rapport à l'origine) et un sens de parcours fixé pour le point de fonctionnement. Très peu de candidats ont reconnu qu'il s'agissait d'un cycle d'hystérésis, et donc que la résistance d'un memristor dépend de son histoire et peut ainsi servir de mémoire.

La partie I.B présentait un modèle microscopique de conductivité électrique, directement tirée du cours, et ne présentait donc aucune difficulté particulière, comme en atteste la bonne réussite des candidats à ces questions.

La partie II était elle aussi une application directe du cours. Même si l'écoulement de Poiseuille n'est plus explicitement au programme, une majorité de candidats était rompue au calcul du champ de vitesse parabolique.

Il s'agissait, dans la partie III, de relier le modèle microscopique du prototype de memristor (schématisé à la figure 5) aux propriétés calculées dans la partie I. Cette partie, qui ne présentait pourtant pas de difficulté technique particulière, a dérouté un plus grand nombre de candidats. Il faut dire qu'à la question 28, un nombre anormalement élevé de candidats ont intégré la relation proposée à la question 26 : $\frac{dz}{dt} = \mu \frac{R_{on} i(t)}{l}$ sous la forme : $z = \frac{R_{on} i(t)}{l} t + cte$! On ne saurait trop recommander aux futurs candidats de s'exercer, ne serait-ce qu'aux

rudiments du calcul différentiel.

— Conseils aux candidats

Le jury souhaite rappeler de manière générale que la connaissance du cours est essentielle pour la bonne réussite à cette épreuve et que les candidats doivent maîtriser les bases du calcul pour espérer réussir. Rappelons qu'il est toujours utile de vérifier un calcul par une étude dimensionnelle rapide. Enfin, une copie soignée avec des résultats encadrés et des mots-clés soulignés sont des éléments qui favorisent grandement l'évaluation et sont donc particulièrement appréciés.

Les conclusions du rapport précédent sont toujours aussi pertinentes et d'actualité ; les meilleures copies font la différence avec les autres en respectant les conseils suivants :

- Une réponse précise et justifiée met plus en valeur un candidat qu'un paragraphe mal argumenté.
- La lisibilité d'une copie (*écriture aérée, schémas et graphes annotés, syntaxe correcte et orthographe rigoureuse*) donne le ton d'une copie, faisant montre d'une *pensée claire*.
- La *lecture complète de l'énoncé* est une occasion à ne pas manquer pour s'imprégner de l'approche proposée par le sujet, repérer les éléments de réponses des premières questions distillés plus loin dans l'énoncé et annoter les questions jugées accessibles qui seront reprises en priorité en cas de manque de temps pour tout faire.
- Tout résultat littéral doit être soumis à une *analyse dimensionnelle* de la part du candidat, qui évitera ainsi de perdre les points précieux des applications numériques.
- Les copies qui négligent les *applications numériques* se privent ainsi d'une grande partie de la discussion et ont par conséquent beaucoup de difficultés à obtenir une note correcte.
- Les résultats chiffrés doivent être donnés avec un nombre de *chiffres significatifs* cohérent (un résultat plus précis que les données de l'énoncé est pour le moins aventureux).
- La *discussion des résultats*, notamment numériques, est le fil conducteur de toute épreuve de Physique, même lorsqu'elle n'est pas explicitement demandée. Elle permet de valider ou non les hypothèses du modèle utilisé à chaque question, de façon à comprendre l'organisation de l'énoncé. Il est encore une fois rappelé qu'une réponse du type « ce résultat est plutôt petit » n'a aucun sens, si le candidat ne compare pas cette valeur à une autre valeur liée au problème et exprimée dans la même unité.
- Les *tentatives malhonnêtes* pour retrouver à toute force un résultat donné par l'énoncé sont fort mal considérées. Il est conseillé de notifier l'écart entre les calculs réalisés et la suggestion de l'énoncé, pour proposer une discussion qui pourrait justement mettre en valeur les arguments et l'esprit critique du candidat.

Les memristors

I Généralités sur les memristors

A Le quatrième dipôle

- Pour les trois dipôles parfaits classiques, en convention récepteur :
 - condensateur de capacité C (arrête 1) : $q = C.u$ où C s'exprime en Farad (F).
 - résistor de résistance R (arrête 2) : $u = R.i$ où R s'exprime en Ohm (Ω)
 - bobine d'inductance L (arrête 3) : $\varphi = Li$ où L s'exprime en Henry (H)

- La « relation fondamentale » reliant i à q est $i = \frac{dq}{dt}$.

L'équation de Maxwell-Faraday $\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ s'intègre sur un contour

fermé sous la forme $\oint \vec{E} d\vec{l} = -\iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$, qui conduit à $u = \frac{d\varphi}{dt}$

- Les relations demandées sont donc :

arrête	1	2	3	4	5	?
relation	$dq = Cdu$	$du = Rdi$	$d\varphi = Ldi$	$dq = idt$	$d\varphi = udt$	?

- La sixième relation s'écrit $d\varphi = M(q)dq$, soit $u = \frac{d\varphi}{dt} = M(q)\frac{dq}{dt} = M(q)i$.

M a donc la dimension d'une résistance et s'exprime en ohms (Ω).

Rq : A chaque instant le memristor se comporte comme une résistance classique, à ceci près que la résistance dépend de q donc de la façon dont le courant i est atteint (il y a donc mémorisation du « passé »).

- Dans le cas d'une association :

— série ($i = i_1 = i_2$) :

$$\begin{aligned}
 u_{eq} &= u_1 + u_2 \\
 &= M_1(q_1)i_1 + M_2(q_2)i_2 \\
 &= (M_1 + M_2)(q)i \\
 &= M_{eq}(q)i
 \end{aligned}$$

Par identification $M_{eq} = M_1 + M_2$

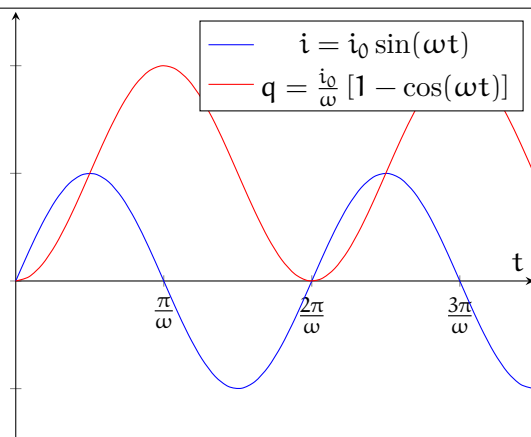
— parallèle ($u = u_1 = u_2$) :

$$\begin{aligned}
 i_{eq} &= i_1 + i_2 \\
 &= \frac{u}{M_1(q_1)} + \frac{u}{M_2(q_2)} \\
 &= \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}\right)(q)i \\
 &= \frac{1}{M_{eq}(q)}i
 \end{aligned}$$

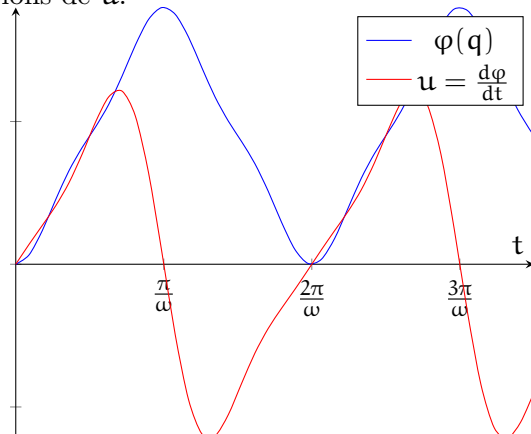
Par identification $\frac{1}{M_{eq}} = \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}$

6. $i = \frac{dq}{dt}$, on en déduit avec la condition $q(0) = 0$:

$$q(t) = \begin{cases} 0 & \text{pour } t < 0 \\ \frac{i_0}{\omega} [1 - \cos(\omega t)] & \text{pour } t \geq 0 \end{cases}$$

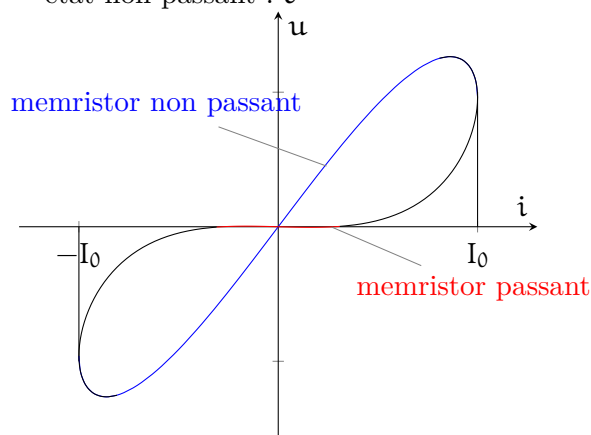


7. $u = \frac{d\varphi}{dt}$, on en déduit l'allure de $u(t)$: les points d'inflexion de φ se traduisent par des extrema de u et les maxima de φ par des annulations de u .



8. En simplifiant on peut considérer que le memristor a une résistance
 — quasi nulle (état passant) lorsque i croît
 — une résistance infinie (état bloqué) lorsque i décroît,
 Le passage d'un état à l'autre est relativement brutal. L'allure est plus facilement interprétable sur la figure 6).
9. L'état du memristors dépend du passé (sens de variation de i ici), il y a un effet de mémoire.
10. Cet effet de mémoire est liée à l'ouverture du cycle d'hystérésis (**notion devenue hors programme PC**) : en l'absence de source (tension nulle aux bornes du dipôle) le dipôle se trouve dans un état déterminé par son passé. Chaque memristor permet donc de stocker l'information associée à un bit :

- état passant : 1
- état non passant : 0



Pour « écrire » sur le memristor il faut appliquer un courant important :

- pour passer de 0 à 1 : $-I_0$
- pour passer de 1 à 0 : I_0

B Conductivité

11. Le principe fondamental de la dynamique appliqué à un porteur de charge s'écrit :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{m}{\tau} \vec{v} + e\vec{E}_0$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{1}{\tau} \vec{v} = \frac{q}{m} \vec{E}_0$$

La vitesse est donc de la forme : $\vec{v} = \vec{A}e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{q\tau}{m} \vec{E}_0$

En régime permanent elle s'exprime donc : $\vec{v}_{\text{permanent}} = \frac{q\tau}{m} \vec{E}_0$

L'hypothèse régime permanent suppose que le régime transitoire est négligeable donc que les temps caractéristiques considérés sont très supérieurs à $\tau = 10^{-12}$ s donc que l'on se place à des fréquences $f \ll 10^{12}$ Hz, ce qui n'est en pratique pas contraignant.

12. Par identification avec le résultat de la question précédente : $\mu = \frac{q\tau}{m}$

Le vecteur densité volumique de courant $\vec{j}_0$ s'écrit par définition :

$\vec{j}_0 = nq\vec{v}$ ($\vec{v}$ est la vitesse d'ensemble des porteurs de charge et correspond à la vitesse obtenue en régime permanent à la question précédente). Ici $\vec{j}_0 = nq \cdot \frac{q\tau}{m} \vec{E}_0$

On en déduit la conductivité électrique γ_0 du conducteur électrique par identification de la **loi d'Ohm locale** $\vec{j}_0 = \gamma_0 \vec{E}_0$: $\gamma_0 = \frac{nq^2\tau}{m}$

13. En introduisant l'intensité du courant traversant le conducteur cylindrique, on a ($\vec{E}$, $d\vec{S}$ et $d\vec{OM}$ sont colinéaires) :

$$\begin{aligned} I &= \iint_S \gamma_0 \vec{E}_0 \cdot d\vec{S} & U_0 &= \int_l -\vec{E}_0 \cdot d\vec{OM} \\ &= \gamma_0 E_0 S & &= E_0 l \\ E_0 &= \frac{I}{\gamma_0 S} & U_0 &= \frac{l}{\gamma_0 S} I \end{aligned}$$

Par identification avec la loi d'Ohm : $\boxed{R = \frac{l}{\gamma_0 S}}$

14. R ne dépendant pas du temps, la loi d'Ohm montre que la tension suit instantanément les évolutions du signal associé au courant.

15. En régime sinusoïdal forcé le principe fondamental de la dynamique appliqué à un porteur de charge s'écrit :

$$\begin{aligned} m \frac{d\vec{v}}{dt} &= -\frac{m}{\tau} \vec{v} + e \vec{E}_{1m} \cdot \cos \omega t \quad \text{en complexe :} \\ i\omega \vec{v} + \frac{1}{\tau} \vec{v} &= \frac{q}{m} \vec{E}_1 \\ \vec{v} &= \frac{\frac{q\tau}{1+i\tau\omega}}{\tau} \vec{E}_1 \\ \vec{j} &= nq\vec{v} = \frac{\frac{nq^2\tau}{1+i\tau\omega}}{\tau} \vec{E}_1 \\ &= \frac{\gamma_0}{1+i\tau\omega} \vec{E}_1 = \underline{\gamma} \vec{E}_1 \\ \underline{I} &= \underline{\gamma} E_1 S \\ \underline{U} &= \underline{E}_1 l = \frac{l}{\gamma S} I \\ &= \frac{l}{\gamma_0 S} \cdot (1 + i\tau\omega) \cdot I \\ &= \underline{Z} I \end{aligned}$$

On en déduit : $\boxed{\underline{Z} = R_0 \cdot (1 + i\tau\omega)}$

Impédance équivalente à l'association série d'un résistor de résistance R_0 et d'une bobine d'impédance $R_0\tau$

Si $\tau\omega \ll 1$ $\underline{Z} \approx R_0$: le dipôle est donc équivalent à un résistor de résistance R_0 pour des fréquences $\ll 10^{11}$ Hz.

16. La puissance transférée à la charge q par le champ électrique $\vec{E}_0$, s'écrit $\mathcal{P}_c = q\vec{E}_0 \cdot \vec{v}$, soit : $\boxed{\mathcal{P}_c = \frac{q^2\tau}{m} E_0^2}$ La puissance volumique asso-

ciée est $\mathcal{P}_v = n\mathcal{P}_c$, soit : $\boxed{\mathcal{P}_v = n \frac{q^2\tau}{m} E_0^2 = \gamma_0 E_0^2}$

17. Pour l'ensemble du cylindre on a donc :

$$\begin{aligned} p &= \mathcal{P}_v \cdot S \cdot l \\ &= \gamma_0 E_0^2 \cdot S \cdot l = E_0 l \cdot \gamma_0 E_0 S \end{aligned}$$

On retrouve donc $p = U_0 \cdot I_0$, soit avec les notations de l'énoncé :

$$\boxed{p = ui}$$

18. **Puissance moyenne ou puissance instantanée ?**

Dans le cas du memristor $P(t) = u(t)i(t)$ avec $u(t) = M(q(t))i(t)$ d'où :

$$\boxed{p = M(q)i^2(t)}$$

II A memristor is a pipe whose diameter varies

A Modélisation d'un écoulement

19. On reconnaît un écoulement de Poiseuille (rq : **pas explicitement au programme**). On supposera :

- écoulement stationnaire, l'accélération locale est donc nulle $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \vec{0}$
- effets de la pesanteur négligeables. Le champ de vitesse est alors à symétrie cylindrique : $\vec{v}(M, t) = v(r)\vec{u}_z$ ($\vec{u}_z$ correspondant à l'axe du cylindre), accélération convective est donc également nulle (c.f. formulaire pour l'expression du gradient en cylindrique) :

$$\begin{aligned} (\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v} &= \left(v \cdot \frac{\partial}{\partial z} \right) \vec{v} \\ &= \vec{0} \end{aligned}$$

20. L'équation de Navier-Stokes s'écrit (c.f. formulaire pour l'expression des opérateurs en cylindrique) :

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} &= -\text{grad}(P) + \eta \Delta \vec{v} \\ \vec{0} &= -\text{grad}(P) + \eta \Delta \vec{v} \\ &= -\text{grad}(P) + \eta \cdot \text{div}(\text{grad}(v(r))) \vec{u}_z \\ &= -\frac{\partial}{\partial r}(P) \vec{u}_r - \frac{\partial}{\partial z}(P) \vec{u}_z + \eta \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv(r)}{dr} \right) \vec{u}_z \end{aligned}$$

D'où $\begin{cases} 0 = -\frac{\partial P}{\partial r} \\ 0 = -\frac{\partial P}{\partial z} + \eta \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv(r)}{dr} \right) \end{cases}$

21. La première équation donne $P(r, z) = P(z)$. La deuxième équation devient donc :

$$\begin{aligned} -\frac{dP}{dz} + \eta \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv(r)}{dr} \right) &= 0 \\ \frac{dP}{dz} &= \eta \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv(r)}{dr} \right) = K \text{ car les variables } r \text{ et } z \text{ sont séparées} \\ P(z) &= Kz + K' \quad \text{avec les C.L. } P(0) = P_e \quad P(l) = P_s \\ P(z) &= \frac{P_s - P_e}{l} z + P_e \\ \eta \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv(r)}{dr} \right) &= K = \frac{P_s - P_e}{l} \\ \left(r \frac{dv(r)}{dr} \right) &= \frac{K}{2\eta} r^2 + K_1 \\ \frac{dv(r)}{dr} &= \frac{K}{2\eta} r + \frac{K_1}{r} \end{aligned}$$

Or $v(r)$ ne peut diverger en $r = 0$ donc $K_1 = 0$. Par conséquent :

$$\begin{aligned} \frac{dv(r)}{dr} &= \frac{K}{2\eta} r \\ v(r) &= \frac{K}{4\eta} r^2 + K_2 \quad \text{avec la C.L. } v(a) = 0 \\ K_2 &= -\frac{K}{4\eta} a^2 \end{aligned}$$

Finalement : $\vec{v}(M) = \frac{P_e - P_s}{4\eta l} (a^2 - r^2) \cdot \vec{u}_z$ On obtient un profil de vitesse parabolique.

22. Le débit volumique du fluide qui traverse le tuyau s'écrit :

$$\begin{aligned}
 D_{\text{vol}} &= \iint \vec{v}(r) \cdot d\vec{S} \\
 &= \int_0^a v(r) \cdot 2\pi r \cdot dr \\
 &= \frac{P_e - P_s}{4\eta l} \cdot 2\pi \int_0^a (ra^2 - r^3) dr \\
 &= \frac{P_e - P_s}{2\eta l} \cdot \pi \cdot \left[\frac{r^2 a^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right]_0^a \\
 \text{Soit } D_{\text{vol}} &= \frac{\pi a^4}{8\eta l} \cdot (P_e - P_s)
 \end{aligned}$$

B Résistance hydraulique

23. La loi de Poiseuille montre que le débit volumique varie linéairement en fonction de la différence de pression amont-aval. Cette loi est donc analogue à la loi d'Ohm. On obtient une loi analogue en introduisant la notion de résistance thermique en **diffusion thermique**.

V	P	T
I	D_{vol}	Φ
$V_2 - V_1 = RI$	$P_2 - P_1 = R_{\text{hyd}} D_{\text{vol}}$	$T_2 - T_1 = R_{\text{th}} \Phi$

24. L'expression précédente du débit volumique s'écrit donc en introduisant la résistance hydraulique :

$$\begin{aligned}
 D_{\text{vol}} &= \frac{\pi a^4}{8\eta l} \cdot (P_e - P_s) \\
 &= \frac{1}{R_{\text{hyd}}} \cdot (P_e - P_s) \\
 \text{Soit } R_{\text{hyd}} &= \frac{8\eta l}{\pi a^4}
 \end{aligned}$$

25. La résistance du memristor (c.f. schéma 4 de l'énoncé) varie en fonction du sens de variation du courant et du signe du courant. Si on fait l'analogie avec un tuyau parcourue par un courant fluide, on voit qu'on peut faire varier la résistance hydraulique en faisant varier le diamètre du tube (avec des variations rapides puisque en $\frac{1}{a^4}$) : le memristor se comporte comme un tuyau dont le diamètre varierait en fonction de la valeur du débit du fluide, de son sens de variation et enfin du sens dans lequel le fluide s'écoulerait.

III Le memristor des HP Labs

26. Les résistances des deux parties du memristors sont associées en série, avec des résistances linéiques $r_{\text{on}} = \frac{R_{\text{on}}}{l}$ et $r_{\text{off}} = \frac{R_{\text{off}}}{l}$ suivant que l'on est dans la zone dopée ou non. Si on note z_o la frontière on obtient :

$$M_{\text{mem}_o} = R_{\text{on}} \frac{z_o}{l} + R_{\text{off}} \frac{l - z_o}{l}$$

27. On reconnaît dans le terme $\mu \frac{R_{\text{on}} i(t)}{l}$ une loi du type $\vec{v} = \mu \vec{E}$ qui caractérise le mouvement des particules chargées, mais le champ qui

apparaît ici est celui qu'on obtient lorsque l'ensemble du film est dopé : $E = \frac{R_{on}i(t)}{l} = \frac{u(t)}{l}$ alors que seulement une partie du film l'est. **Que fallait-il répondre ???**

28. On détermine $z(t)$ par intégration de la relation $\frac{dz}{dt} = \mu \frac{R_{on}i(t)}{l}$ avec $i(t) = \frac{dq}{dt}$ on obtient $z(t) = \mu \frac{R_{on}q(t)}{l} + cste$. Avec les CI proposée

$$z(t) = z_0 + \mu \frac{R_{on}q(t)}{l}$$

Pour que le memristor soit le plus conducteur possible, comme $R_{on} \ll R_{off}$, il faut que $z = l$. Dans le cas le plus défavorable on part de $z_0 = 0$

et alors $Q_{min} = \frac{l^2}{\mu R_{on}}$

29. Pour une situation correspondant à un z quelconque on détermine $M(q)$ à partir de la relation établie à la question 26

$$M(z) = M(z_0) + (z - z_0) \frac{R_{on} - R_{off}}{l} \text{ d'où}$$

$$M(q) = M_{mem_o} + q\mu R_{on} \frac{R_{on} - R_{off}}{l^2} \text{ où on voit l'intérêt de travailler avec un } l \text{ petit, un système nanométrique, pour que le coefficient devant } q \text{ soit le plus grand possible.}$$

30. On calcule $q(t)$ comme à la question 6 :

$$i = \frac{dq}{dt}, \text{ avec la condition } q(0) = 0 :$$

$$q(t) = \begin{cases} 0 & \text{pour } t < 0 \\ \frac{i_0}{\omega} [1 - \cos(\omega t)] & \text{pour } t \geq 0 \end{cases}$$

Puis φ par intégration de $d\varphi = M(q)dq = (M_{mem_o} - q\mu R_{on} \frac{R_{off}}{l^2})dq$

avec l'approximation $R_{on} \ll R_{off}$ d'où $\varphi(q) = M_{mem_o}q - \frac{\mu}{2l^2} R_{on}R_{off}q^2$

avec comme CI $q(t=0) = 0$ et $\varphi(t=0) = 0$

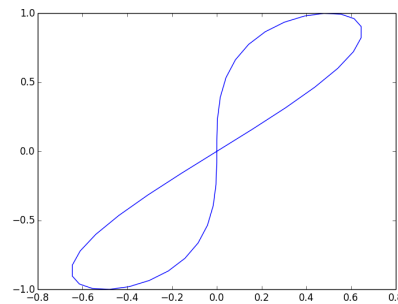
En remplaçant $q(t) = \frac{i_0}{\omega} [1 - \cos(\omega t)]$ on obtient :

$$\varphi(t) = \frac{M_{mem_o}i_0}{\omega} (1 - \cos(\omega t)) - \frac{\mu R_{on}R_{off}i_0^2}{2l^2\omega^2} (1 - \cos(\omega t))^2$$

et enfin avec $u(t) = \frac{d\varphi}{dt}$

$$u(t) = M_{mem_o}i_0 \sin(\omega t) - \frac{\mu R_{on}R_{off}i_0^2}{l^2} \sin(\omega t)(1 - \cos(\omega t))$$

31. La question précédente donne une définition paramétrique de la courbe $u = f(i)$ dont l'allure est bien du type de celle proposée figure 4.



Courbe $u = f(i)$, avec : $i_o = 1A$, $M_{mem_o} = 1\Omega$ et $\frac{\mu R_{on} R_{off} i_o}{l^2} = 0,2\Omega$

La courbe expérimentale est relativement cohérente avec la modélisation proposée, avec deux états de fonctionnement possible et un passage d'un état à l'autre plus violent, ce qui est préférable pour bien distinguer les deux états. Le composant obtenu présente bien les caractéristiques voulues.