

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

SESSION DE 2008

Série Sciences et Technologie de Laboratoire

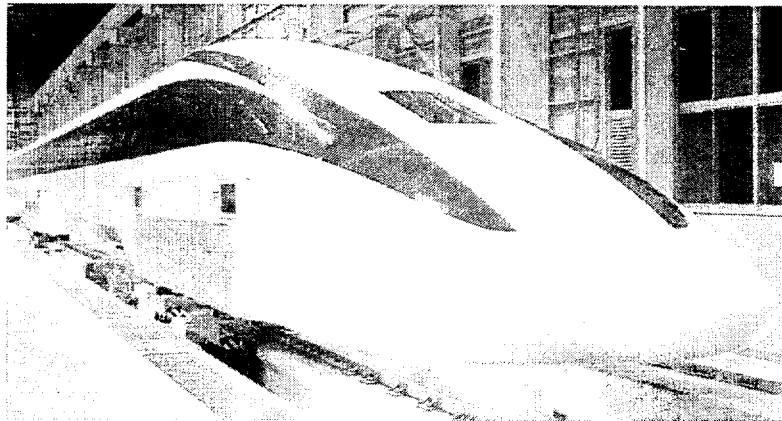
PHYSIQUE DE LABORATOIRE ET DE PROCÉDÉS INDUSTRIELS

ÉPREUVE THÉORIQUE

DURÉE : 6 heures

Lévitation magnétique

Ce sujet propose une étude simplifiée de la mise en œuvre d'un petit système de lévitation magnétique. La lévitation - ou sustentation - magnétique permet de maintenir certains solides en équilibre dans le champ de pesanteur terrestre en compensant leur poids grâce à une force magnétique. L'équilibre obtenu sans contact matériel permet alors d'envisager des vitesses de rotation ou de translation importantes sans usure mécanique. Industriellement on peut citer la réalisation de paliers et volants d'inertie sans frottement ou encore de trains à grande vitesse.



Magneto-levitating train -MagLev- (Japon)

Après avoir expliqué succinctement le principe physique de cette lévitation, on s'intéressera successivement :

- Au choix d'une bobine à noyau de fer en fonction du cahier des charges.
- A la modélisation de la force magnétique et l'instabilité du système.
- A l'identification du système puis à sa correction.
- A la réalisation pratique du système d'asservissement.
- A une étude plus poussée de l'interaction magnétique.

Toutes les réponses devront être clairement justifiées et tous les résultats numériques seront donnés avec l'unité physique SI de la grandeur calculée. Les différentes parties et sous parties peuvent être traitées séparément.

Préliminaires

On souhaite maintenir en équilibre une petite sphère creuse métallique grâce à un électroaimant réalisé à l'aide d'une bobine (ou solénoïde) à noyau de fer. L'équilibre est recherché pour une abscisse z_G du centre de gravité de la sphère de 3 cm par rapport au bord inférieur O de la bobine prise comme origine des positions. (voir figure 1).

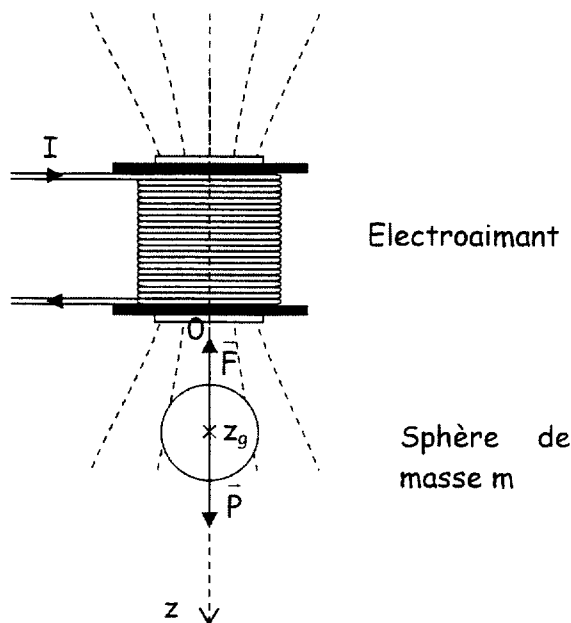


Figure 1

L'expression de l'intensité de la force magnétique d'attraction s'exerçant par unité de surface, entre l'électroaimant et la sphère en est donnée par :

$$\|\vec{F}_s\| = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

B étant l'intensité du champ magnétique au point d'abscisse z et μ_0 la perméabilité du milieu constituant l'entrefer ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ pour l'air). La sphère a pour rayon $r = 1,9 \text{ cm}$ et une masse $m = 10,8 \text{ g}$.

P.1 Appliquer la relation fondamentale de la dynamique à la sphère en équilibre sous l'action de son poids \vec{P} et de la force magnétique \vec{F} . On admettra pour cela que la surface effective à considérer pour passer de $\|\vec{F}_s\|$ à $\|\vec{F}\|$ est $S = \gamma 4\pi r^2$ où γ est un coefficient d'ajustement.

P.2 En déduire la valeur de l'intensité B du champ magnétique à l'équilibre avec $\gamma = 2,17$.

Partie I : Choix de la bobine à noyau de fer

On souhaite déterminer les caractéristiques de la bobine qui permettra de réaliser l'équilibre défini ci-dessus.

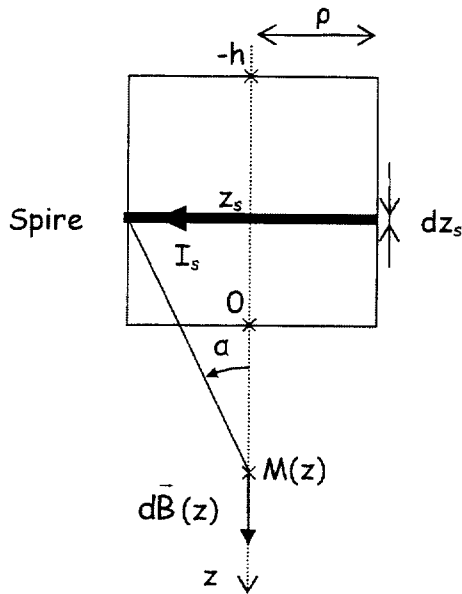


Figure 2

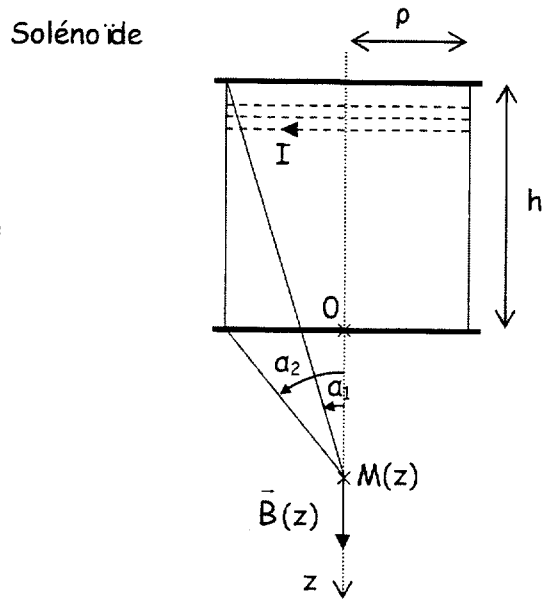


Figure 3

Soit l'axe $[Oz]$ de symétrie d'un solénoïde cylindrique à noyau de fer de longueur h , de rayon ρ avec n spires par mètre parcourues par un courant I .

Une tranche de solénoïde d'abscisse z_s (comprise entre $-h$ et 0) et d'épaisseur dz_s est assimilable à une spire dans laquelle circule un courant $I_s = nI \cdot dz_s$. Elle produit au point M d'abscisse z un champ magnétique $d\vec{B}(z)$ dirigé selon $[Oz]$ et dont la valeur algébrique dB est définie par la relation :

$$dB = \frac{\mu_r \mu_0 I_s}{2\rho} \sin^3 \alpha \quad \text{avec } \mu_r = 3,3 \text{ pour l'ensemble du problème.}$$

L'intensité du champ magnétique $B(z)$ en un point $M(z)$ de l'axe $[Oz]$ créé par le solénoïde s'obtient en sommant les contributions dB des différentes tranches.

I.1 Justifier que cela revient à calculer l'intégrale suivante :

$$B(z) = \int_{-h}^0 \frac{\mu_r \mu_0 n I}{2\rho} \sin^3 \alpha \cdot dz_s$$

On donne le changement de variable suivant : $z - z_s = \frac{\rho}{\tan \alpha}$, d'où $dz_s = \rho \frac{d\alpha}{\sin^2 \alpha}$.

I.2 A l'aide du changement de variable, montrer que : $B(z) = \frac{\mu_r \mu_0 n I}{2} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$

I.3 En déduire que $B(z)$ au point $M(z)$ s'écrit aussi :

$$B(z) = \frac{\mu_r \mu_0 n I}{2} \left(\frac{-z}{\sqrt{z^2 + \rho^2}} + \frac{z+h}{\sqrt{(z+h)^2 + \rho^2}} \right)$$

On a représenté $B(z)$ sur le document réponse pour $h = 10 \text{ cm}$, $\rho = 2 \text{ cm}$, n et I non précisés.

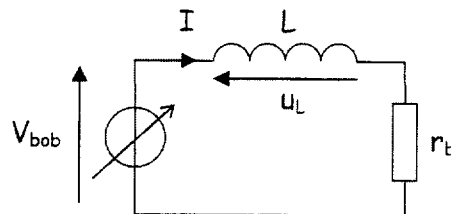
I.4 Commenter la caractéristique $B(z)$ donnée sur le graphique de gauche (document 1 en annexe) en interprétant physiquement la symétrie observée sur le graphe.

On dispose de quatre bobines A,B,C,D au laboratoire afin de générer $B(z)$.

Les quatre bobines ont pour longueur $h = 10 \text{ cm}$ et un rayon équivalent moyen $\rho = 2 \text{ cm}$. Le reste des caractéristiques figure dans le tableau suivant.

	Bobine A	Bobine B	Bobine C	Bobine D
Nombre N de spires	250	500	1000	10000
Courant maximal supporté (A)	5,0	2,5	1,75	0,10
Résistance r_b (Ω)	0,60	2,5	9,0	1350

Le schéma électrique équivalent simplifié d'une bobine est rappelé ci après :



I.5 Rappeler l'expression temporelle de la tension u_L en fonction de l'inductance L et le courant I puis donner l'équation différentielle qui lie V_{bob} à I .

I.6 En régime permanent, lorsque $I = \text{Cte}$, que devient l'équation différentielle précédente ? Que peut-on dire du comportement électrique de la bobine ?

On souhaite créer un champ magnétique d'intensité : $B(z) = 5,18 \cdot 10^{-3} \text{ T}$ à $z = 3 \text{ cm}$

I.7 Calculer pour chacune des bobines les intensités I puis les tensions V_{bob} nécessaires à l'obtention de cette intensité de champ magnétique (on présentera les résultats sous la forme d'un tableau).

La source de tension ajustable dont on dispose au laboratoire délivre au maximum $I_{\text{max}} = 2 \text{ A}$ sous $V_{\text{bob max}} = 30 \text{ V}$.

I.8 Compte tenu des contraintes énoncées précédemment, identifier la seule bobine satisfaisant au cahier des charges. Préciser alors l'intensité I du courant qui permettra de maintenir la sphère en lévitation à $z = 3 \text{ cm}$.

Partie II : Modélisation de la force magnétique, nécessité d'un asservissement

Le choix de la bobine étant fait, on sait que le champ et la force magnétique croissent avec l'intensité I du courant dans la bobine et décroissent lorsque la position z_G du centre de gravité de la sphère augmente. On admet alors que la norme de la force \bar{F} s'exprime par la relation :

$$\|\bar{F}\| = k \frac{I^2}{z_G^2}$$

On se propose de déterminer expérimentalement k .

Pour ce faire, on fait varier la masse m de la sphère en la lestant avec du sable ce qui permet de fixer $\|\bar{F}\| = P = mg$ à l'équilibre. $\|\bar{F}\|$ étant fixée par chaque valeur $m \in \{10,8g; 12,8g; 13,8g; 15,8g\}$, on positionne grâce à des cales la sphère à diverses positions z_G de la bobine. On relève alors les intensités I qui permettent de compenser le poids pour chacune de ces positions. On obtient finalement le réseau de caractéristiques :

$$\frac{I}{\sqrt{\|\bar{F}\|}} = f(z_G) \quad \text{à } \|\bar{F}\| \text{ donnée.}$$

On présente sur le document 2 en annexe la caractéristique expérimentale moyenne $\frac{I}{\sqrt{\|\bar{F}\|}} = f(z_G)$ obtenue à partir de quatre caractéristiques.

II.1 Quel intérêt y a-t-il à tracer $\frac{I}{\sqrt{\|\bar{F}\|}} = f(z_G)$?

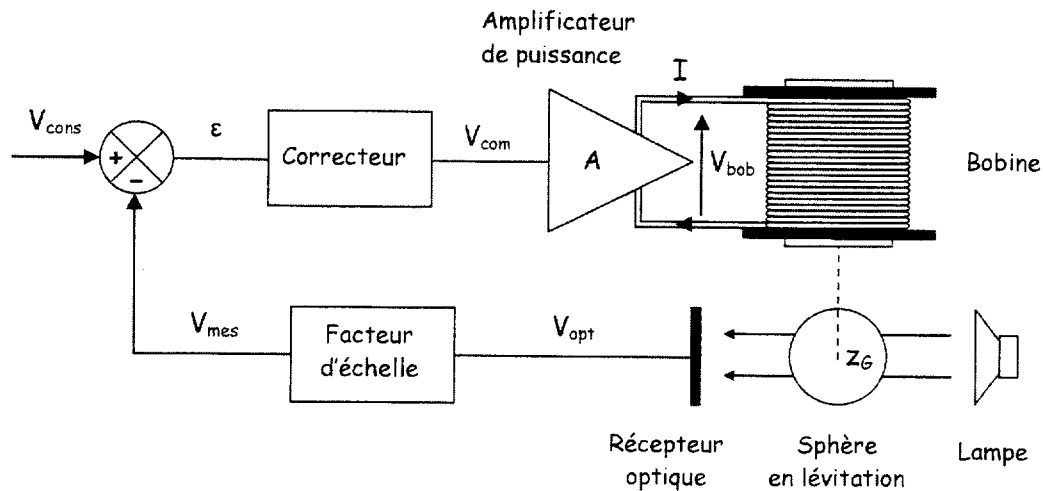
II.2 La courbe expérimentale suit elle exactement la loi proposée ? Sinon proposer un domaine de distances z_G pour laquelle la loi est suivie à 5% d'erreur relative à la grandeur expérimentale.

II.3 Déterminer le coefficient directeur de la caractéristique idéale et en déduire k .

II.4 En déduire l'intensité I_0 du courant qui permet d'équilibrer la sphère à $z_{G0} = 3$ cm.

II.5 En menant un raisonnement qualitatif simple d'écart accidentel de la sphère par rapport à la position d'équilibre (I_0, z_{G0}) , expliquer pourquoi l'équilibre est instable.

Le constat précédent fait qu'il est nécessaire d'asservir le système si l'on veut espérer maintenir la sphère en équilibre. On propose le schéma synoptique suivant :

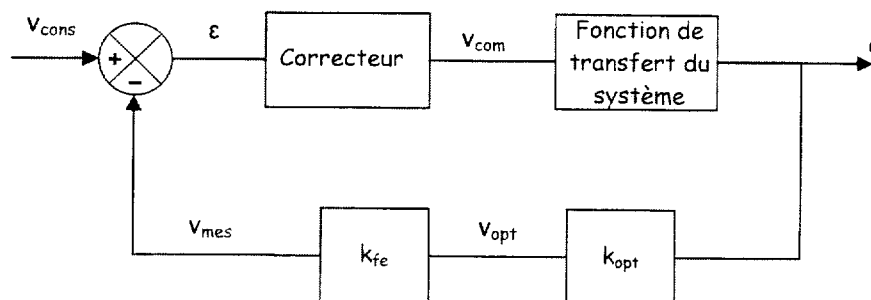


La position z_G de la sphère est repérée grâce à une cellule solaire. La sphère placée entre la lampe et le capteur modifie par sa position la surface éclairée du capteur. Celui-ci, de type cellule solaire, délivre ainsi une tension V_{opt} image de la position z_G de la sphère.

Le facteur d'échelle permet de fixer le rapport entre les variations de la tension de consigne et la position de la sphère ; c'est donc un simple gain entre V_{opt} et V_{mes} .

Enfin le correcteur élabore à partir de l'écart ϵ entre la consigne de position V_{cons} et la mesure V_{mes} le signal de commande V_{com} de l'amplificateur de puissance. Ce dernier fournit alors à la bobine le courant I qui permet de moduler la force magnétique.

Dans le cas où la position de la sphère varie peu autour de la position d'équilibre, ce que l'on recherche, le système est linéaire et admet donc pour diagramme fonctionnel (noter l'emploi de lettres minuscules) :



La position de la sphère *varie peu* autour de la position d'équilibre z_{G0} . On exprime ainsi pour de petits écarts e à z_{G0} :

- la position z_G de la sphère par $z_G = z_{G0} + e$.
 e désigne donc pour la suite du problème la position de la sphère.
- L'intensité I du courant par $I = I_0 + i$.
 i désigne donc pour la suite du problème l'intensité du courant dans la bobine.

La caractéristique expérimentale $V_{opt} = f(z_G)$ est donnée sur le document 3 en annexe. On recherche une loi de variation linéaire autour du point de fonctionnement $z_{G0} = 3$ cm.

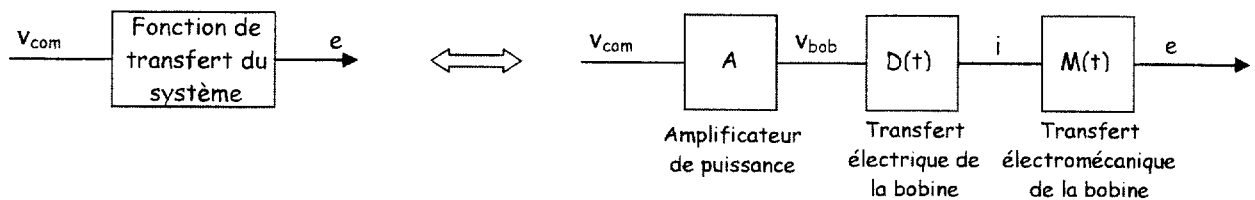
II.6 Déterminer l'équation $V_{opt} = V_{opt0} + k_{opt}.e$ de la caractéristique linéarisée autour de $z_G = z_{G0}$. Préciser la valeur de k_{opt} et son unité.

II.7 Ecrire alors v_{opt} (v minuscule) en fonction de e . Expliquer plus généralement la distinction que l'on fait entre les grandeurs $\{z_G; I; V_{opt}; \dots\}$ et $\{e; i; v_{opt}; \dots\}$.

On choisit le facteur d'échelle k_{fe} tel que $v_{mes} = k_{fe}.v_{opt}$.

II.8 Quelle doit être la valeur de k_{fe} si on veut qu'une variation de position de + 1 cm se traduise par une variation de tension de +1 V sur v_{mes} ?

Partie III : Identification du système.



On cherche les relations linéaires qui relient la tension de commande v_{com} , le courant i et la position e de la sphère lorsqu'elle oscille au voisinage du point d'équilibre $z_G = z_{G0}$ pour $I = I_0$.

La fonction de transfert A de l'amplificateur est une simple constante : $v_{bob} = A.v_{com}$. Les expressions de $D(t)$ et $M(t)$ sont plus complexes.

Transfert électromécanique de la bobine.

On rappelle qu'à l'équilibre obtenu pour $I_0 = 1,6$ A et $z_{G0} = 3$ cm, on a $P + F_0 = 0$.

Lorsque $I = I_0$ devient $I = I_0 + i$ et $z_G = z_{G0}$ devient $z_G = z_{G0} + e$
 la force $F = F_0$ devient $F = F_0 + f$ avec $F = -k \frac{I^2}{z_G^2}$ (fonction non linéaire de I et z_G).

Montrer alors que la relation fondamentale de la dynamique projetée sur l'axe $[Oz]$ s'écrit :

$$m \frac{d^2 e}{dt^2} = f$$

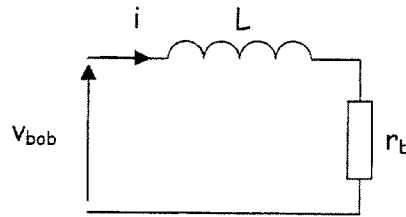
- On souhaite une expression linéaire de f en fonction de i et e ainsi on pose $f = k_e.e + k_i.i$

III.1 Montrer que k_e : dérivée de F par rapport à z_G en $I = I_0$ et $z_G = z_{G0}$ s'écrit : $k_e = \frac{2kI_0^2}{z_{G0}^3}$.

III.2 Montrer que k_i : dérivée de F par rapport à I en $I = I_0$ et $z_G = z_{G0}$ s'écrit : $k_i = -\frac{2kI_0}{z_{G0}^2}$.

III.3 Calculer numériquement k_e et k_i avec $k = 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ N.m}^2 \cdot \text{A}^{-2}$.

Transfert électrique de la bobine.



III.4 Montrer que v_{bob} et i obéissent à l'équation différentielle

$$\tau_{\text{elec}} \frac{di}{dt} + i = \frac{V_{\text{bob}}}{r_b} \quad \text{où} \quad \text{on}$$

précisera l'expression de τ_{elec} en fonction de L et r_b .

III.5 On relève expérimentalement la réponse de la bobine à un échelon de tension (document 4 en annexe). Déduire de ce relevé la constante de temps τ_{elec} puis l'inductance L de la bobine si $r_b = 9 \Omega$.

Fonctions de transfert isomorphes.

La synthèse du correcteur qui permettra de stabiliser l'équilibre ne peut se faire que grâce à certains outils mathématiques. L'outil principal est la transformée de Laplace.

Elle permet de transformer une équation différentielle d'ordre n dont la variable est le temps en un polynôme de degré n dont la variable est p (variable de Laplace). Il est, entre autres, plus facile de manipuler des polynômes que des équations différentielles.

Pour une grandeur $x(t)$ et sa transformée $X(p)$:

$$a_n \frac{d^n x}{dt^n} + \dots + a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = 0 \xleftrightarrow[L^{-1}]{} a_n p^n X + \dots + a_2 p^2 X + a_1 p X + a_0 X = 0$$

L'équivalence ci dessus permet de donner une règle simplifiée pour passer de $x(t)$ à $X(p)$:

$$a_k \frac{d^k x}{dt^k} \xleftrightarrow[L^{-1}]{} a_k p^k X \quad \text{par exemple : } 7 \frac{d^2 x}{dt^2} \xleftrightarrow[L^{-1}]{} 7 p^2 X$$

III.6 Donner la transformée de Laplace de l'équation électromécanique

$$m \frac{d^2 e}{dt^2} = k_e e + k_i i \quad \text{en utilisant les correspondances } i(t) \rightarrow I(p) \text{ et } e(t) \rightarrow E(p)$$

III.7 Montrer que l'équation obtenue peut s'écrire $E(p) = \frac{k_e}{1 - (\tau p)^2} I(p)$ où on précisera

l'expression de τ en fonction de m et k_e . Faire l'application numérique de τ .

III.8 A partir de l'équation électrique (question III.4) et en raisonnant comme aux deux questions précédentes, exprimer $I(p)$ en fonction de $V_{bob}(p)$.

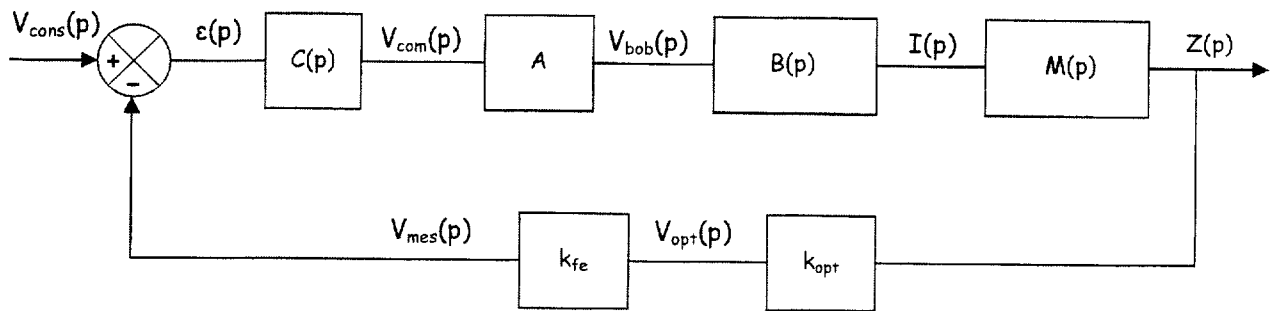


Diagramme fonctionnel isomorphe du système asservi

Synthèse du correcteur.

En bouclant le système sans correcteur l'équilibre reste instable. On cherche la fonction de transfert $C(p)$ du correcteur qui permettra la stabilité du système. La synthèse à proprement parler de $C(p)$ dépasse le cadre de cet exercice.

On choisit un correcteur dit à « avance de phase » connu aussi sous le nom de « dérivée filtrée ». On a alors : $C(p) = K_p \frac{1+aTp}{1+Tp}$ dont il faut définir les paramètres $a (> 1)$ et T (On fixe $K_p = 2$).

L'avance de phase maximum φ_{\max} est apportée à la fréquence ω_{\max} avec :

$$\omega_{\max} = \frac{1}{T\sqrt{a}} \quad \text{et} \quad \sin(\varphi_{\max}) = \frac{a-1}{a+1}$$

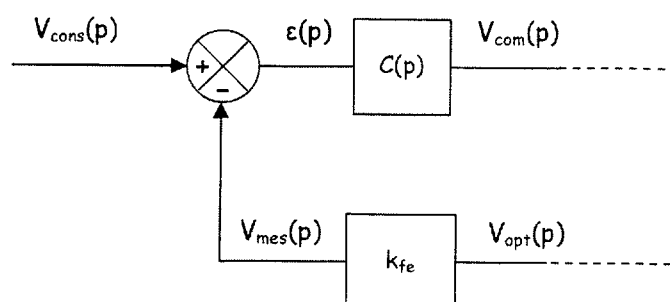
III.9 Calculer a tel que l'avance de phase $\varphi_{\max} = 50^\circ$.

III.10 Calculer l'intervalle T satisfaisant à la double condition : $\frac{1}{T} \leq \omega_{\max} \leq \frac{1}{T_{\text{elec}}}$.

On donne $T_{\text{elec}} = 25 \text{ ms}$, $\tau = 39 \text{ ms}$ et $a = 10$.

Partie IV : Réalisation pratique.

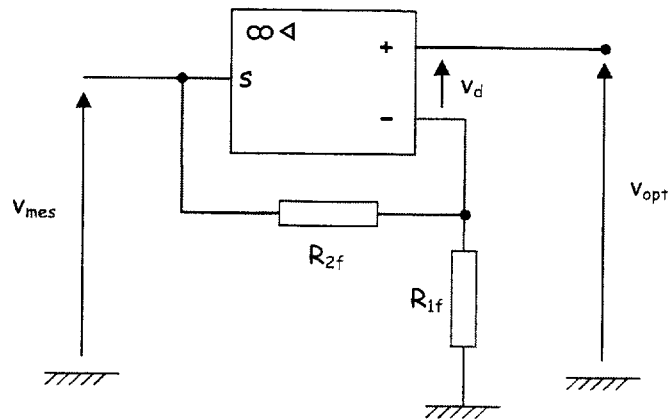
On réalise les différentes fonctions nécessaires (comparateur, correcteur, facteur d'échelle) à l'aide d'amplificateurs opérationnels supposés parfaits. Le schéma synoptique est donné sur le document 5 en annexe.



IV.1 Donner en justifiant le régime de fonctionnement de l'ensemble des amplificateurs opérationnels du document 5.

IV.2 Définir la tension différentielle d'entrée v_d d'un amplificateur opérationnel et donner sa ou ses valeurs en fonction de votre réponse précédente.

Facteur d'échelle



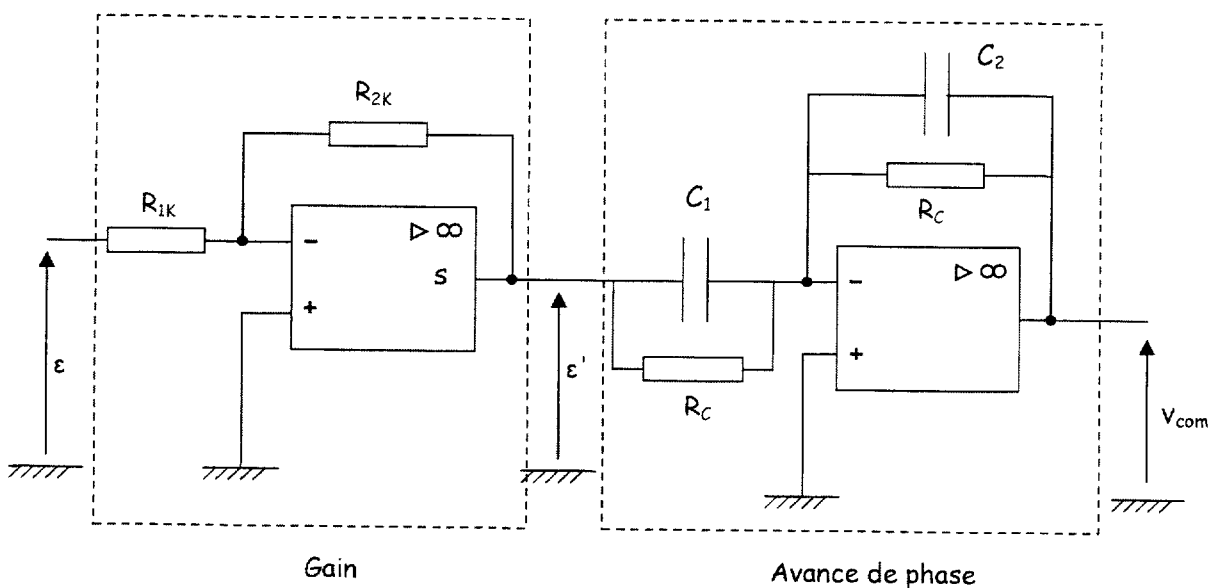
IV.3 Exprimer les potentiels v^+ et v^- en fonction des données du montage et en déduire la relation entre v_{mes} et R_{1f} , R_{2f} , v_{opt} .

IV.4 Sachant que l'on avait posé $v_{mes} = k_{fe} v_{opt}$ avec $k_{fe} = 13$ et que $R_{1f} = 1 \text{ k}\Omega$, quelle valeur faut-il donner à R_{2f} ?

Correcteur

On traitera séparément les étages de gain et d'avance de phase. On rappelle que l'on veut obtenir $C(p) = \frac{V_{com}(p)}{\varepsilon(p)} = K_p \frac{1+aTp}{1+Tp}$ fonction de transfert isomorphe du correcteur. On admettra qu'il est ici équivalent de travailler avec la fonction de transfert isochrone

$$C(j\omega) = \frac{V_{com}(j\omega)}{\varepsilon(j\omega)} = K_p \frac{1+aTj\omega}{1+Tj\omega}$$



IV.5 Exprimer ε' en fonction de ε , R_{1K} et R_{2K} .

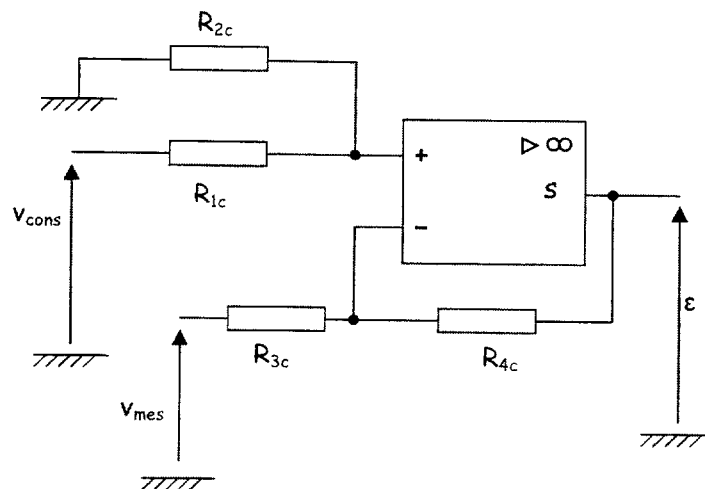
IV.6 On a $\varepsilon' = -K_p \varepsilon$ avec $K_p = 2$ et on donne $R_{1K} = 10 \text{ k}\Omega$. Quelle est la valeur de R_{2K} ?

IV.7 En remplaçant les couples (R_c, C_1) et (R_c, C_2) par leurs impédances complexes équivalentes et en vous inspirant des calculs fait à la question précédente exprimer $V_{com}(j\omega)$ en fonction de $\varepsilon'(j\omega)$, R_c , C_1 et C_2 .

IV.8 On pose $C_1 = a C_2$. Monter alors que $\frac{V_{com}(j\omega)}{\varepsilon'(j\omega)} = -\frac{1+aTj\omega}{1+Tj\omega}$ où on précisera T en fonction de R_c et C_1 ou C_2 .

IV.9 On donne $T = 10 \text{ ms}$, $a = 10$ et $R = 100 \text{ k}\Omega$. Calculer les valeurs de C_1 et C_2 .

Soustracteur (comparateur)



IV.10 Donner l'équation reliant ε , v_{mes} , v_{cons} et R_{1c} , R_{2c} , R_{3c} , R_{4c} . On pourra procéder par méthode directe ou bien par superposition.

IV.11 Quelle relation doit il y avoir entre R_{1c} , R_{2c} , R_{3c} , R_{4c} pour avoir $\varepsilon = v_{cons} - v_{mes}$?

Partie V : Etude de l'interaction magnétique.

La lévitation décrite précédemment dépend essentiellement de l'interaction magnétique entre le champ magnétique \vec{B} créé par le solénoïde et la sphère métallique ; ainsi, dans cette partie, il va en particulier être établi que la lévitation n'est pas permise pour n'importe quelle matière.

Toute matière acquiert sous l'effet d'un champ magnétique une aimantation induite \vec{M} , telle que $\vec{M} = \frac{X_m}{1 + X_m} \frac{\vec{B}}{\mu_0}$ où X_m représente la susceptibilité magnétique (sans unité). Trois types de matière, ou milieu matériel, se distinguent alors d'un point de vue magnétique selon la valeur de X_m :

- les matériaux diamagnétiques : X_m négatif et faible ($\approx -10^{-5}$)
- les matériaux paramagnétiques : X_m positif et faible ($\approx 10^{-5}$ à 10^{-3})
- les matériaux ferromagnétiques : X_m positif et très important ($\gg 1$)

Des exemples de corps purs appartenant à ces trois types de milieu matériel magnétique sont donnés dans le tableau 1.

On peut montrer que, pour tout type de matière soumis à un champ magnétique orienté selon l'axe $[Oz]$, la composante suivant $[Oz]$ de la force d'interaction magnétique s'exprime en un point d'abscisse z selon $F(z) = K_V M(z) \frac{dB}{dz}$, où K_V est une constante positive homogène à un volume.

V.1 Donner une nouvelle expression de $F(z)$ faisant intervenir exclusivement l'intensité B du champ magnétique.

V.2 Compte-tenu de l'évolution de l'intensité $B(z)$ du champ magnétique créé par le solénoïde (document 1), déterminer par méthode *purement graphique* le signe de la composante $F(z)$ de la force magnétique qui s'appliquerait sur un matériau diamagnétique placé en un point d'abscisse z positif.

V.3 Montrer alors qu'il est impossible de faire léviter une sphère métallique en cuivre dans les conditions opératoires décrites lors des parties précédentes.

V.4 Justifier, à l'aide du signe de la composante $F(z)$ de la force magnétique qui s'appliquerait sur des matériaux paramagnétique ou ferromagnétique placé en un point d'abscisse z positif où règne le champ magnétique d'intensité $B(z)$ créé par le solénoïde, qu'il est a priori possible de faire léviter ces deux types de matériaux.

V.5 On admettra par la suite que $K_V \approx 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$.

a) Estimer pour les deux types de matériaux la norme $\|\vec{F}(z)\|$ de la force magnétique à l'abscisse $z = 3 \text{ cm}$.

b) En déduire le type de milieu matériel magnétique auquel appartient la sphère métallique étudiée précédemment.

c) Proposer un ou plusieurs corps purs pouvant constituer cette sphère.

V.6 Le dioxygène est une substance paramagnétique pour laquelle il est possible de faire léviter des gouttelettes liquides en imposant une température de travail très basse ($\sim 90 \text{ K}$) à l'endroit où règne le champ magnétique.

a) A partir de connaissances sur le dioxygène, expliquer pourquoi il faut travailler à une température très basse pour pouvoir obtenir cette lévitation.

b) On indique qu'à une température de 90 K la masse volumique du dioxygène liquide vaut $\rho(O_2, l) = 1141 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et sa susceptibilité magnétique $X_m(O_2, l) = 3,45 \cdot 10^{-3}$. En déduire le rayon des gouttelettes de dioxygène liquide pouvant léviter à une distance $z = 3 \text{ cm}$ du solénoïde en supposant que le champ magnétique \vec{B} créé par celui-ci demeure inchangé.

V.7 Origine microscopique du magnétisme.

La nature magnétique d'un corps pur provient essentiellement du mouvement des électrons autour des noyaux atomiques, créant ainsi des moments magnétiques atomiques. Il est de ce fait possible de prévoir cette nature magnétique à partir de la structure électronique de l'atome constituant le corps pur étudié. Ainsi, on peut montrer que lorsque les couches ou sous-couches électroniques sont remplies pour un atome, son moment magnétique résultant est nul car les contributions des divers électrons se compensent ; la matière formée à partir de cet atome est diamagnétique. Dans le cas des matériaux paramagnétique et ferromagnétique, les couches électroniques des atomes ne sont pas pleines et, en présence d'un champ magnétique \vec{B} , les différents moments magnétiques atomiques vont s'aligner avec celui-ci pour conduire à l'aimantation induite \vec{M} , orientée dans le sens de \vec{B} comme déjà indiqué précédemment. On indique simplement pour information que l'importante différence entre les valeurs de \vec{M} pour les matériaux paramagnétique et ferromagnétique découle d'interactions supplémentaires entre moments magnétiques atomiques dans le cas du dernier cité.

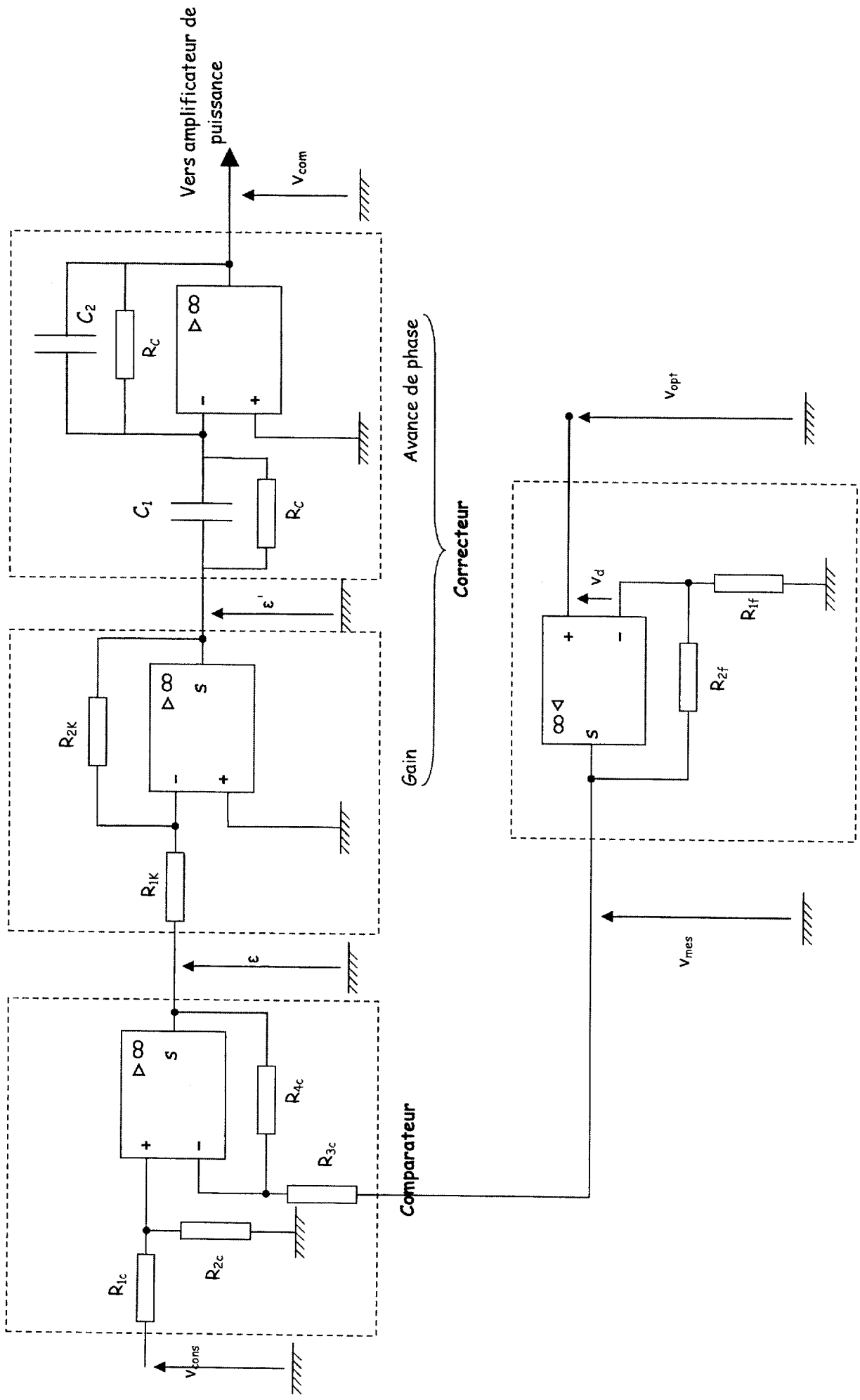
a) On indique que le numéro atomique Z du zinc (Zn) est $Z(\text{Zn}) = 30$. Après avoir rappelé ce que représente le numéro atomique Z , donner la structure électronique de Zn à l'aide des lettres K, L, M, représentant les couches principales. Justifier que le zinc est diamagnétique.

b) Quelle est la nature magnétique des gaz rares (dernière colonne de la classification périodique) ?

c) Le numéro atomique du fer (Fe) est $Z(\text{Fe}) = 26$. Donner la structure électronique et indiquer pour conclure son comportement magnétique.

Corps pur	Susceptibilité magnétique X_m
Bismuth (liquide)	$-1,7 \cdot 10^{-5}$
Calcium	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Cuivre	$-9,4 \cdot 10^{-6}$
Fer	$\gg 1$
Magnésium	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Nickel	$\gg 1$
Or	$-3,4 \cdot 10^{-5}$
Sodium	$0,85 \cdot 10^{-6}$
Tungstène	$7,7 \cdot 10^{-5}$
Zinc	$-1,6 \cdot 10^{-5}$

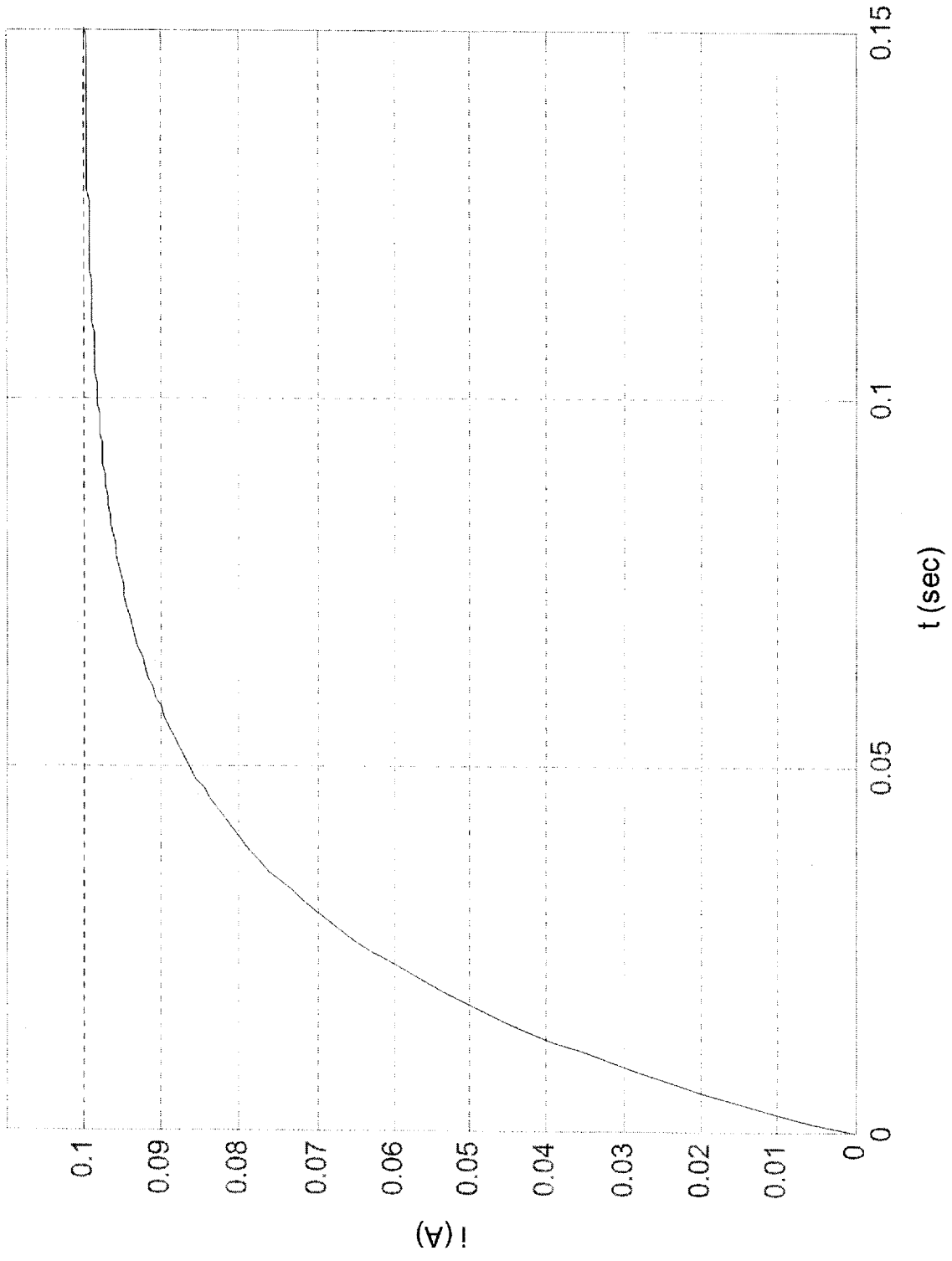
Tableau 1 : Susceptibilités magnétiques de quelques corps purs.



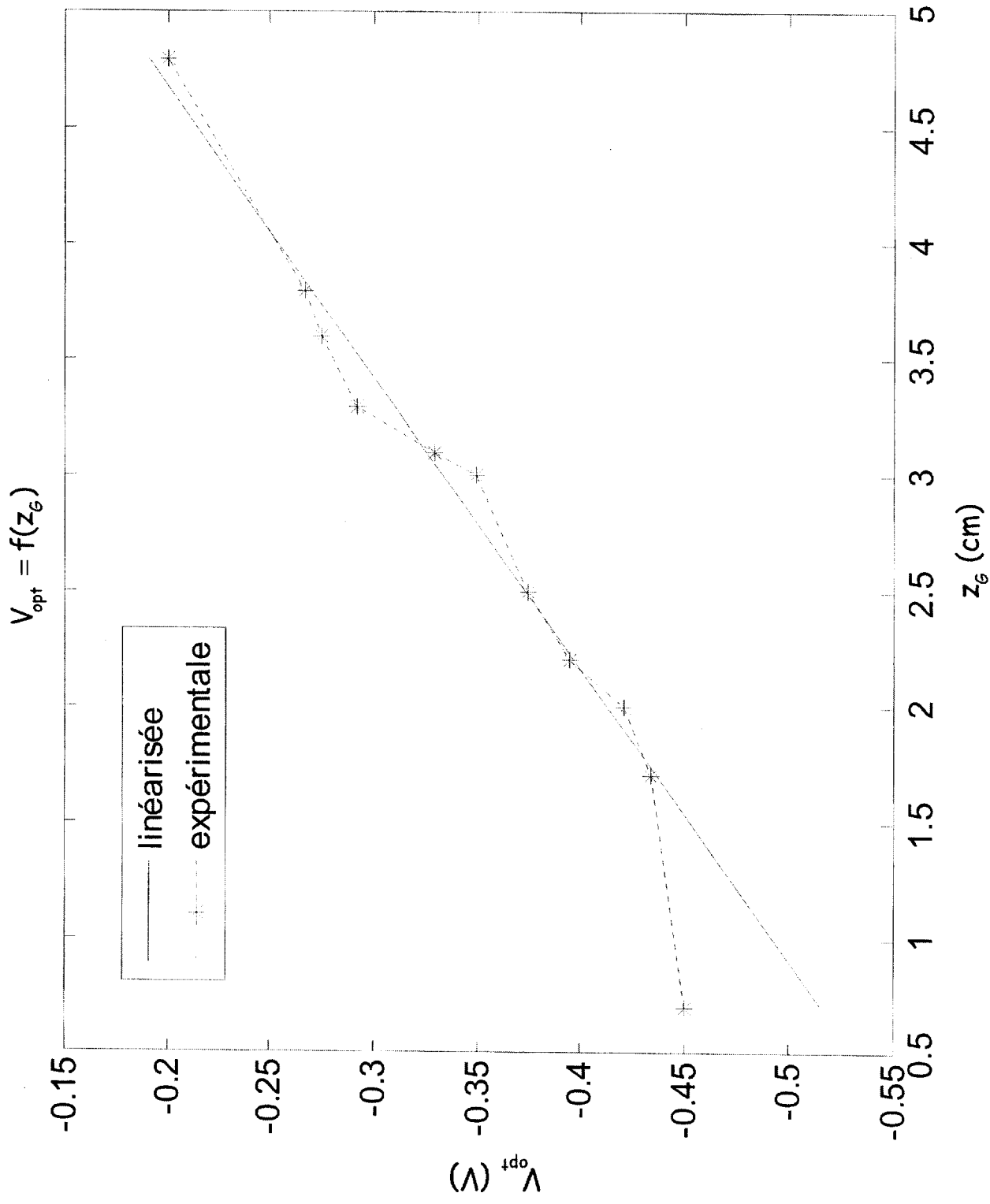
Facteur d'échelle

Document 5

Réponse indicielle du courant i



Document4



$$\frac{I}{\sqrt{F}} = f(z_G)$$

