



SESSION 2009

**CONCOURS EXTERNE
DE RECRUTEMENT DE PROFESSEURS AGRÉGÉS**

**Section : SCIENCES PHYSIQUES
Option C : PHYSIQUE APPLIQUÉE**

**COMPOSITION
D'ÉLECTRONIQUE ET D'ÉLECTROTECHNIQUE**

Durée : 5 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

Cette épreuve contient deux problèmes totalement indépendants.

Il est rappelé que les correcteurs seront particulièrement sensibles à la qualité de la rédaction tant sur le fond (rigueur et clarté des explications) que sur la forme (présentation, lisibilité, respect des notations de l'énoncé, indication du numéro complet de la question traitée, mise en évidence des résultats, applications numériques et unités...).

Si au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale dans sa copie et poursuit sa composition en précisant les initiatives qu'il prend pour la rédaction de sa solution.

PROBLEME 1

Mesures de positions

Ce sujet s'intéresse aux capteurs utilisés pour le pilotage et l'asservissement en position d'actionneurs. La **Figure n° 1** représente un exemple d'actionneur électro-hydraulique (EHA) utilisé pour l'asservissement en position d'une commande de vol d'avion.

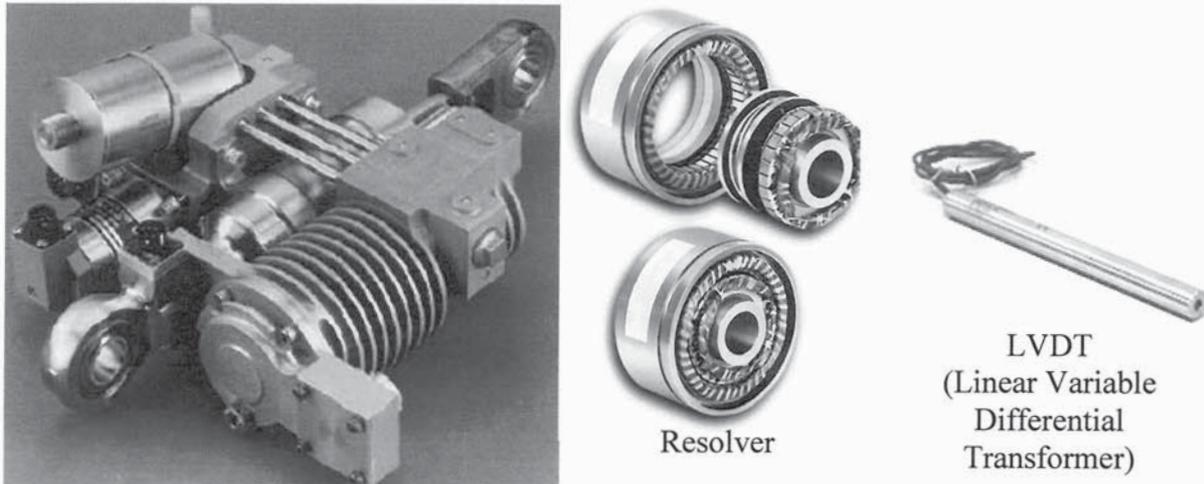


Figure n° 1 – Capteurs de position dans un EHA

Un tel actionneur nécessite plusieurs capteurs de positions :

- Une mesure d'angle au niveau du moteur synchrone à aimants permanents pour assurer l'autopilotage et l'asservissement de vitesse qui peut être réalisé à l'aide d'un capteur à effet Hall ou un resolver ;
- Une mesure de déplacement linéaire au niveau du vérin hydraulique pour assurer l'asservissement en position de la commande de vol. Cette mesure est réalisée à l'aide d'un capteur LVDT (Linear Variable Differential Transformer).

On va s'intéresser ici aux principes de fonctionnement de ces capteurs. Le sujet comporte 3 parties **indépendantes** traitant respectivement :

- des capteurs de position à effet Hall : principe, intégration et électronique de conditionnement ;
- des capteurs de position de type resolver ou LVDT et de l'électronique associée ;
- des précautions de câblage à mettre en œuvre lors de l'utilisation de capteurs en milieux soumis à de la pollution électromagnétique.

Dans chacune de ces 3 parties, des sous-ensembles de questions peuvent être traités de façon indépendantes.

1 - Partie n° 1 : Capteurs à effet Hall

1.1 - Principe physique

L'autopilotage d'un moteur brushless nécessite de connaître la position du rotor afin de synchroniser courants statoriques et pôles magnétiques du rotor. Il est possible d'utiliser pour cela des capteurs de champ magnétique à effet Hall. On utilise alors 3 capteurs, un pour chacune des 3 phases du moteur comme représenté sur la **Figure n° 2**.

1.1.1. Le moteur est constitué de 4 pôles, donner et justifier l'angle mécanique de séparation des 3 capteurs.



Figure n° 2 – Emplacement des capteurs à effet Hall

On va s'intéresser au principe de fonctionnement d'une sonde à effet Hall. Ce composant est constitué d'une plaquette semi-conductrice parcourue par un courant (**Figure n° 3**) et d'une électronique de conditionnement (**Figure n° 5**).

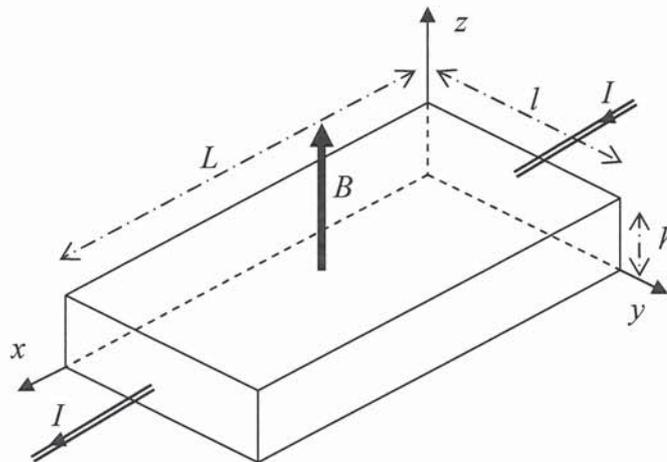


Figure n° 3 – Géométrie d'une sonde à effet Hall

La plaquette conductrice rectangulaire (longueur L , largeur l , hauteur h) de résistivité ρ est soumise à une tension V_L qui entraîne la circulation d'un courant I dans le sens de la longueur. On suppose que la conduction est assurée par des électrons, de charge q , de densité n et de mobilité μ .

1.1.2. La plaquette est soumise à un champ d'induction \vec{B} orienté selon l'axe z . Donner le nom et l'expression de l'effort \vec{F}_L qui s'exerce sur un électron de vitesse \vec{v} .

- 1.1.3. Quel est l'effet de cette force \vec{F}_L ? Que se passe-t-il en régime stationnaire au niveau de la composante latérale E_y du champ électrique ? Donner la relation entre E_y , le module $B = |\vec{B}|$ du champ magnétique et le module $v = |\vec{v}|$ de la vitesse des électrons.
- 1.1.4. Sur le **document réponse n° 1**, représenter le vecteur vitesse \vec{v} des électrons, les charges stockées, la tension V_L , les champs électriques E_x et E_y en régime stationnaire.
- 1.1.5. Donner le lien entre la mobilité μ des électrons, le champ électrique longitudinal E_x et la vitesse v des électrons.
- 1.1.6. Donner l'expression de la tension de Hall V_H mesurée en fonction des grandeurs locales v , B et I et en fonction de la tension d'alimentation V_L .
- 1.1.7. Donner l'expression de la sensibilité $S = \frac{1}{V_L} \left(\frac{\Delta V_H}{\Delta B} \right)$ par volt d'alimentation pour une plaquette carrée de Silicium de mobilité μ de longueur L , de largeur l et de hauteur h .
- 1.1.8. Donner la relation liant le courant I , la tension V_L , la résistivité ρ et les grandeurs géométriques de la plaquette.
- 1.1.9. Donner l'expression de la résistivité ρ en fonction des grandeurs q (charge d'un électron), n (densité) et μ (mobilité).
- 1.1.10. Exprimer la relation liant le courant I , la composante longitudinale E_x du champ électrique, la densité n , la mobilité μ , la charge élémentaire q d'un électron et les grandeurs géométriques de la plaquette.

1.2 - Intégration du capteur en technologie bipolaire

L'ensemble du capteur, plaquette à effet Hall et électronique, est intégré sur un même substrat de 0,6 mm d'épaisseur de Silicium de type P à l'aide d'une technologie bipolaire. Le processus de base fait appel aux techniques de masquage par oxyde et de diffusions localisées d'impuretés. La **Figure n° 4** donne le schéma en coupe de la réalisation de différents composants à l'aide de cette technologie.

1.2.1 Compléter le tableau du **Document réponse n° 2**. Préciser dans ce tableau la nature (isolante, conductrice ou semi-conductrice) des différentes couches présentes dans cette technologie (N, P, SiO₂, (c)), les moyens de réalisation (dépôt, diffusion, oxydation) et les matériaux utilisés pour leur réalisation.

1.2.2 Donner la nature (comme par exemple transistor NPN, transistor PNP, diode, résistance, capacité, inductance, ...) des exemples de composants (1), (2) et (3) donnés sur la **Figure n° 4**.

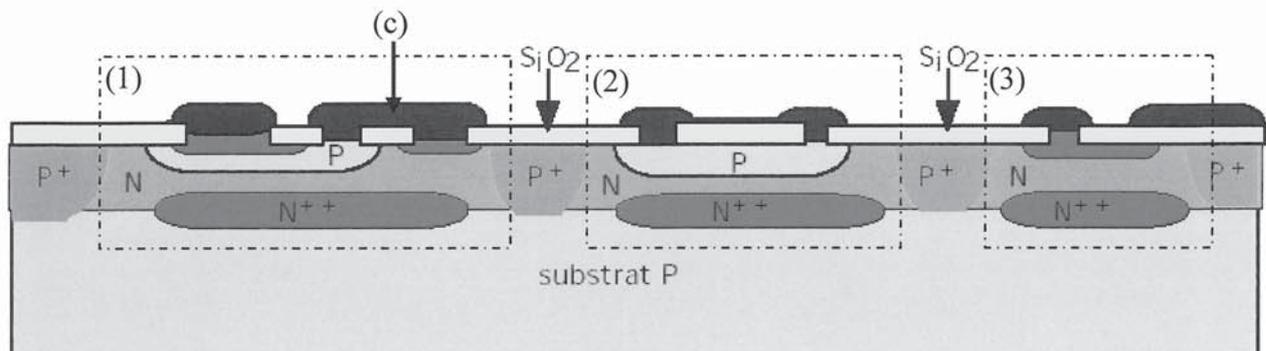


Figure n° 4 – Diverses réalisations de composants en technologie bipolaire

1.2.3. Donner un schéma de principe précisant la nature des différentes couches et connexions utilisées et permettant de réaliser un capteur à effet Hall avec cette même technologie.

1.3 - Etude de l'électronique de conditionnement

La **Figure n° 5** représente le schéma général de l'électronique de conditionnement du capteur. Un régulateur de tension alimente la cellule à effet Hall, l'amplificateur et le trigger de Schmitt nécessaires au pilotage du transistor de sortie. Nous allons nous intéresser ici à la réalisation de l'amplificateur et du trigger de Schmitt.

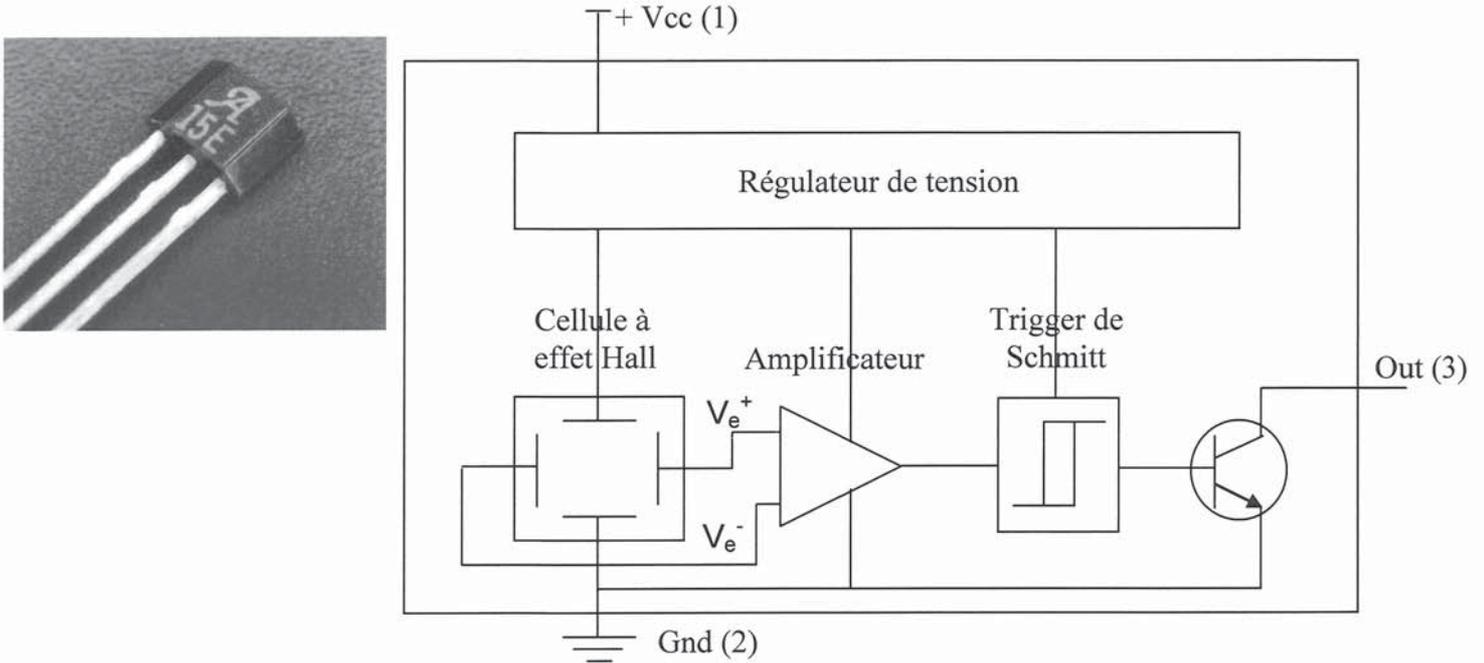


Figure n° 5 – Schéma général de l'électronique de conditionnement

1.3.1. L'amplificateur est réalisé selon le schéma de la **Figure n° 6**. Quel est le nom d'un tel dispositif ?

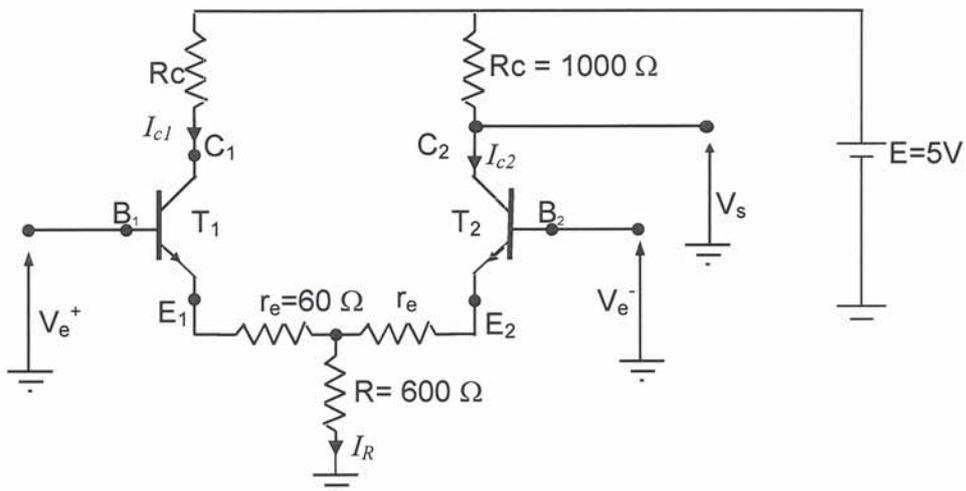


Figure n° 6 – Schéma de l'amplificateur

On suppose que les transistors T1 et T2 sont identiques : ils ont un même gain en courant β et une même tension de seuil base-émetteur V_{BE} . Leurs caractéristiques, mesurées à l'aide d'un traceur de courbes, sont données sur la **Figure n° 7**.

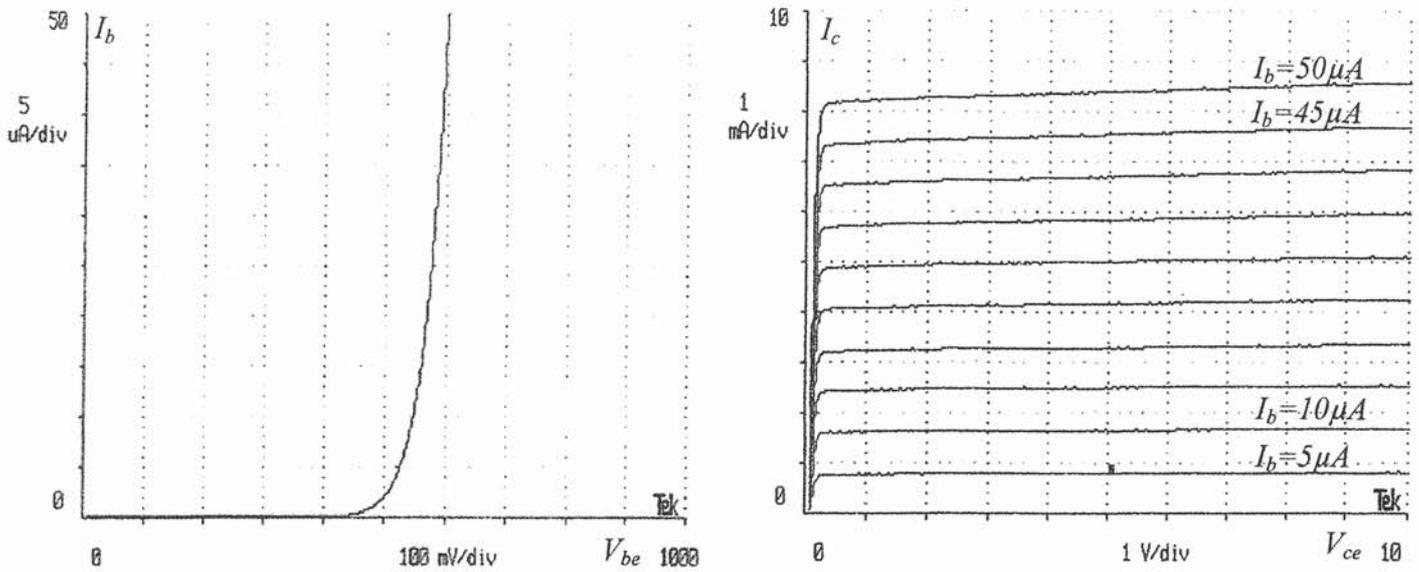


Figure n° 7 – Caractéristiques des transistors bipolaires

- 1.3.2. Que vaut V_{BE} lorsque le transistor est passant ? Que vaut l'amplification en courant β ?
- 1.3.3. Donner la relation mathématique liant le courant de base I_b et la tension V_{be} pour un transistor. Comment évolue graphiquement cette évolution pour une augmentation de température ?
- 1.3.4. Dans le cas du schéma **Figure n° 6**, donner l'intérêt d'avoir placé les résistances r_e .

On néglige dans l'étude les effets des impédances amont et aval du circuit amplificateur (cellule à effet Hall et trigger de Schmitt). Les tensions V_{e+} et V_{e-} , issues de la cellule à effet Hall, sont de la forme :

$$V_{e+} = V_0 + \frac{v_d}{2} \text{ et } V_{e-} = V_0 - \frac{v_d}{2}$$

Avec :

- $V_0 = \frac{E}{2}$, la tension de repos sous champ magnétique nul ;
- v_d , la tension différentielle générée sous l'action d'un champ.

L'ensemble des grandeurs du circuit peuvent être écrites sous la forme :

$$X = X_0 + x$$

Avec :

- X_0 une composante continue représentative du point de repos
- x une variation de petite amplitude autour de ce point de repos

Dans un premier temps, on s'intéresse au point de polarisation du circuit. Dans ce cas $v_d = 0\text{V}$.

- 1.3.5. Dans ce cas, quelles sont les relations liant I_{c1} , I_{c2} et I_R ? Calculer la valeur numérique de I_R .
- 1.3.6. Donner l'expression et la valeur numérique de la tension de sortie au repos $V_S = V_{S0}$.

Dans un second temps on s'intéresse à l'évolution v_s de la tension de sortie V_s pour une petite tension d'entrée v_d . On utilisera pour effectuer les calculs le formalisme petits signaux.

- 1.3.7. Donner la représentation équivalente d'un transistor bipolaire en petits signaux (les fréquences d'utilisation sont faibles).
- 1.3.8. Donner l'expression et la valeur numérique équivalente r_{be} aux jonctions base-émetteur des transistors T_1 et T_2 (pour l'application numérique on prendra $kT/q = 25$ mV).
- 1.3.9. Donner un schéma équivalent petits signaux du montage et déterminer l'expression et la valeur numérique du gain v_s/v_d .

Le trigger de Schmitt est réalisé suivant le schéma de la **Figure n° 8**.

- 1.3.10. Quelle est la fonction du trigger de schmitt ?
- 1.3.11. Pour ce circuit, on supposera que les transistors Q_1 et Q_2 (de caractéristiques identiques à T_1 et T_2) fonctionnent en commutation. Comment modéliser les transistors dans ce cas ?

On désire tracer l'évolution de la sortie V_T en fonction de la tension d'entrée V_S .

- 1.3.12. On suppose que la tension V_S d'entrée est petite. Quels sont les états des transistors Q_1 et Q_2 ?
- 1.3.13. Calculer dans ce cas le niveau de la tension de sortie $V_T = V_{TL}$. On ne négligera pas les courants absorbés dans les bases des transistors et les chutes de tensions V_{be} et V_{ce} pour un transistor passant.
- 1.3.14. La tension d'entrée V_S augmente. Pour quelle valeur V_{S1} a-t-on basculement des états des transistors Q_1 et Q_2 ?
- 1.3.15. Quelle est la tension de sortie $V_T = V_{TH}$ dans ce cas ?
- 1.3.16. La tension d'entrée rediminue. Pour quelle valeur V_{S2} a-t-on de nouveau basculement des états des transistors Q_1 et Q_2 ? On néglige le courant de base I_{b1} .
- 1.3.17. Tracer le cycle d'hystérésis de ce comparateur (V_T fonction de V_S).

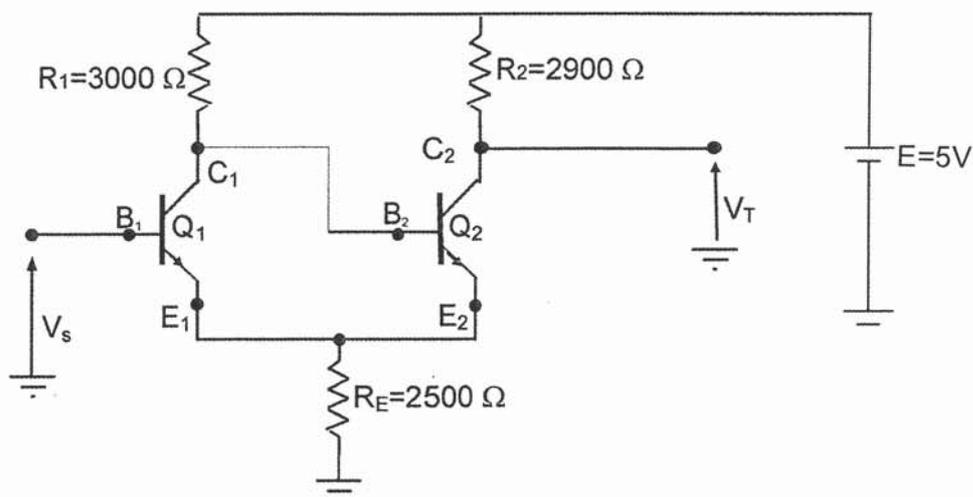


Figure n° 8 – Schéma du trigger de Schmitt

2 - Partie n° 2 : capteurs de type résolveur ou LVDT

2.1 - Modélisation des résolveurs et LVDT

Il est possible de réaliser un capteur de déplacement à l'aide de trois bobinages couplés par l'intermédiaire d'un noyau magnétique mobile (**Figure n° 9**). La structure magnétique peut être linéaire dans les cas des LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ou rotatif dans le cas des résolveur. Nous étudierons ici principalement le cas linéaire des LVDT.

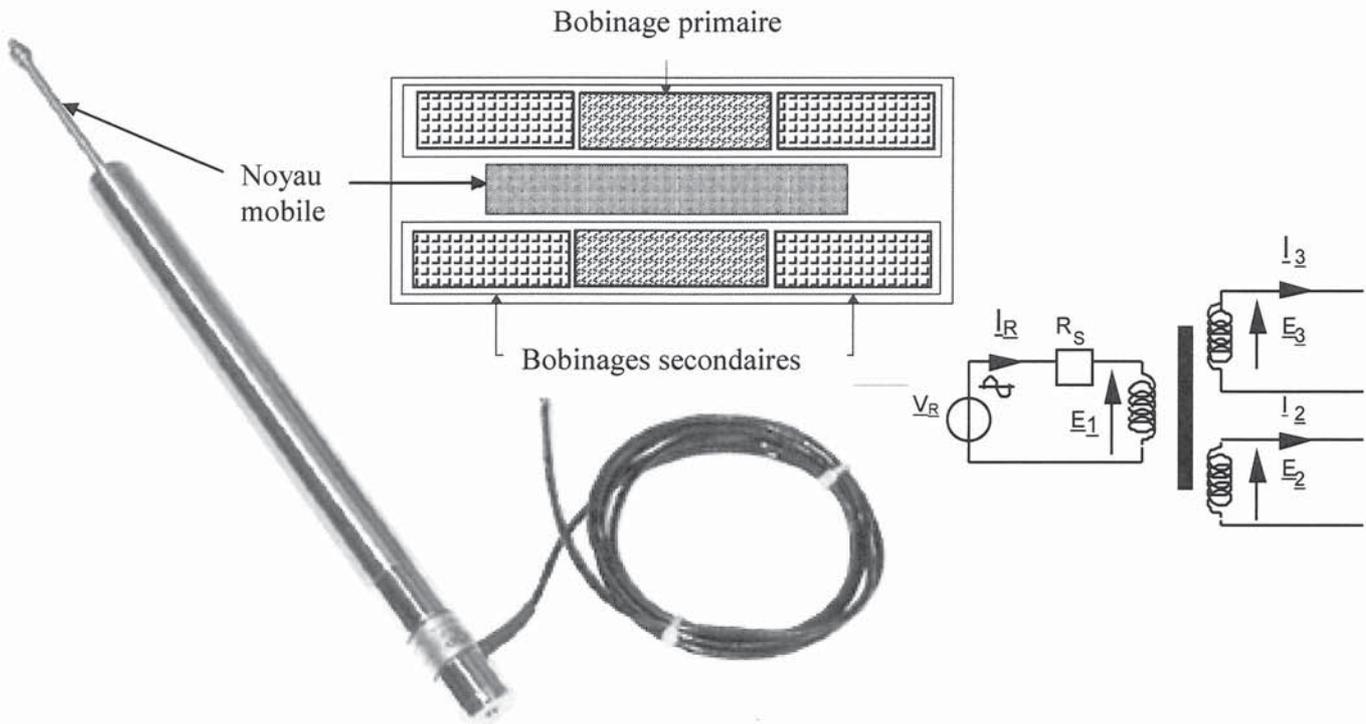


Figure n° 9 – Capteur linéaire de déplacement

Une grandeur sinusoïdale de la forme $x(t)=X.\cos(\omega t+\varphi)$ sera exprimée dans le sujet à l'aide de la notation complexe suivante $\underline{X}=X.e^{j\varphi}$.

Le premier bobinage est alimenté par un courant sinusoïdal de référence I_R . Les deux autres servent de mesure ($I_2 = I_3 = 0$). Le circuit magnétique du capteur est caractérisé par :

- une inductance L du bobinage 1 ;
- une mutuelle $M'(x) = L'(1 + ax + bx^2)$ entre les bobinages 1 et 2 ;
- une mutuelle $M''(x) = L'(1 - ax + bx^2)$ entre les bobinages 1 et 3.

- 2.1.1. La résistance R_s du schéma de la **Figure n° 9** représente la résistance de câblage du bobinage 1 du capteur. Donner l'expression en notation complexe, des tensions \underline{E}_1 , \underline{E}_2 et \underline{E}_3 , aux bornes de ces bobinages sont fonctions du courant I_R .
- 2.1.2. Un amplificateur d'instrumentation permet d'obtenir une tension $\underline{S}=K_d(\underline{E}_2-\underline{E}_3)$. Exprimer \underline{S} en fonction de I_R et x .
- 2.1.3. Exprimer I_R en fonction de R_s , L , ω et \underline{V}_R .
- 2.1.4. Donner l'expression de la fonction de transfert : $\underline{I}(j\omega)=\underline{S}/\underline{V}_R$.
- 2.1.5. Tracer le diagramme de Bode asymptotique (gain et phase) de $\underline{I}(\omega)$. Dans quelle gamme de fréquence devrait-on travailler pour que $|\underline{I}(\omega)|$ soit indépendant de ω et proportionnel à x .

2.1.6. Donner la valeur numérique du déphasage introduit par $\underline{I}(\omega)$ pour $R_s = 75 \Omega$, $L = 7 \text{ mH}$ et une fréquence d'utilisation de 4 kHz.

2.2 - Electronique de conditionnement

On cherche à recueillir un signal continu image de la position x (positive ou négative) du capteur.

2.2.1. Donner la nature du traitement à effectuer sur le signal de sortie de l'amplificateur différentiel (différence des tensions $e_2(t)$ et $e_3(t)$ des bobinages 2 et 3). Justifier graphiquement pour 2 exemples de valeur de x .

On s'intéresse maintenant à l'électronique mise en jeu pour traiter le signal issu de cet amplificateur différentiel. Le schéma de principe est donné **Figure n° 10**.

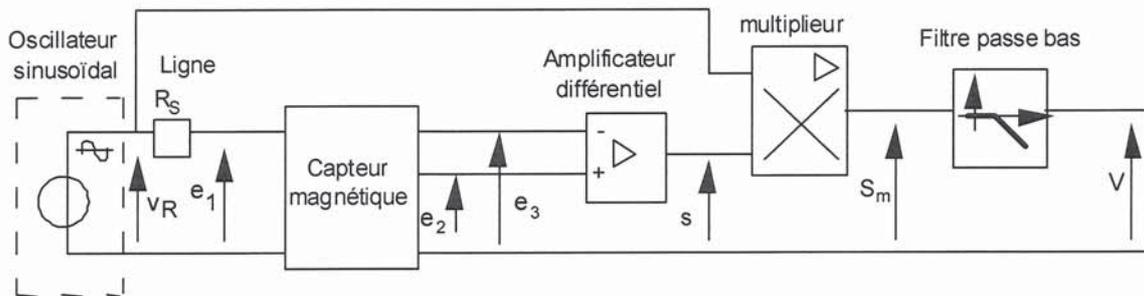


Figure n° 10 – Electronique de traitement

2.2.2. Donner le nom du montage utilisé ici. Pourquoi un détecteur de crête (diode + circuit RC) n'est pas utilisé ici ?

Le signal $s(t)$ a pour expression $s(t) = K \cdot x \cdot \cos(\omega t + \varphi)$. Le signal $v_R(t)$ s'exprime par $v_R(t) = E \cdot \cos(\omega t)$. Le multiplieur délivre une tension $s_m(t) = K_m \cdot v_R(t) \cdot s(t)$.

- 2.2.3. Calculer l'expression de $s_m(t)$ et donner sa décomposition spectrale. Préciser alors quel est le terme représentatif de la position x .
- 2.2.4. Compte tenu de l'expression de $s_m(t)$, comment doit-on choisir la fréquence de coupure du filtre passe-bas pour que $v(t)$ soit proportionnelle à x ?
- 2.2.5. Quel est l'effet d'une variation de la résistance de ligne R_s (élévation de température de la ligne menant au capteur par exemple) sur le signal de sortie ?
- 2.2.6. Quel est l'intérêt du montage **Figure n° 11** ? Donner l'expression de la tension de sortie V_s en supposant le terme en $b \cdot x^2$ négligeable devant 1.

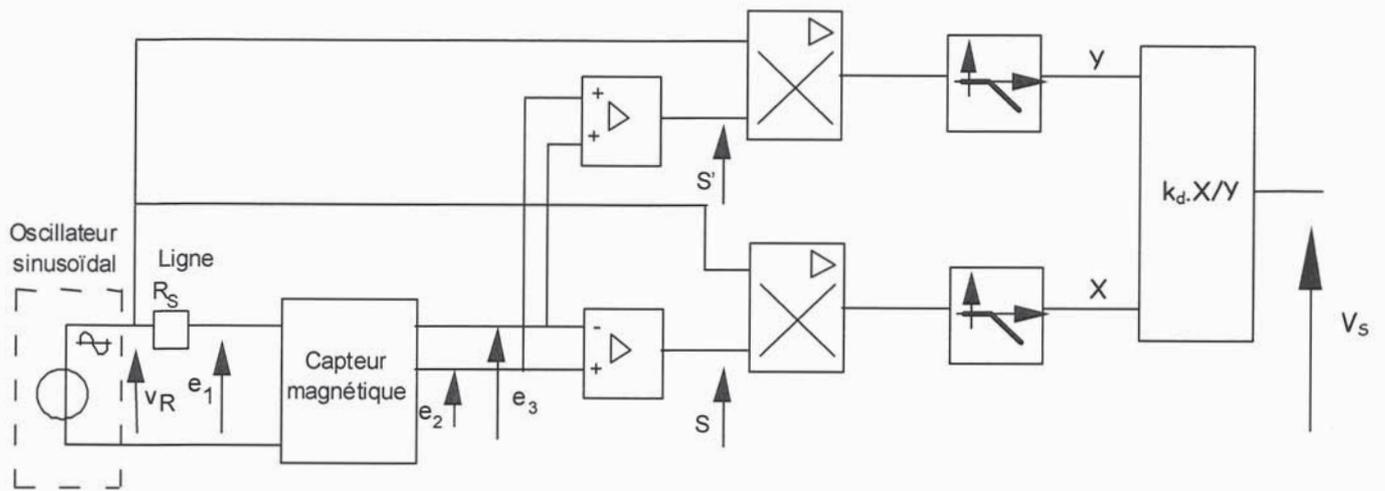


Figure n° 11 – Electronique de traitement avec diviseur

3 - Partie 3 : CEM des câbles de connections

Les capteurs LVDT ou résolveur et leurs câbles (menant à l'électronique de conditionnement) sont placés dans l'environnement du moteur et du convertisseur de puissance. Des précautions sont à prendre pour éviter les bruits électromagnétiques trop importants. La **Figure n° 12** indique un exemple de câblage pour un conditionneur de résolveur.

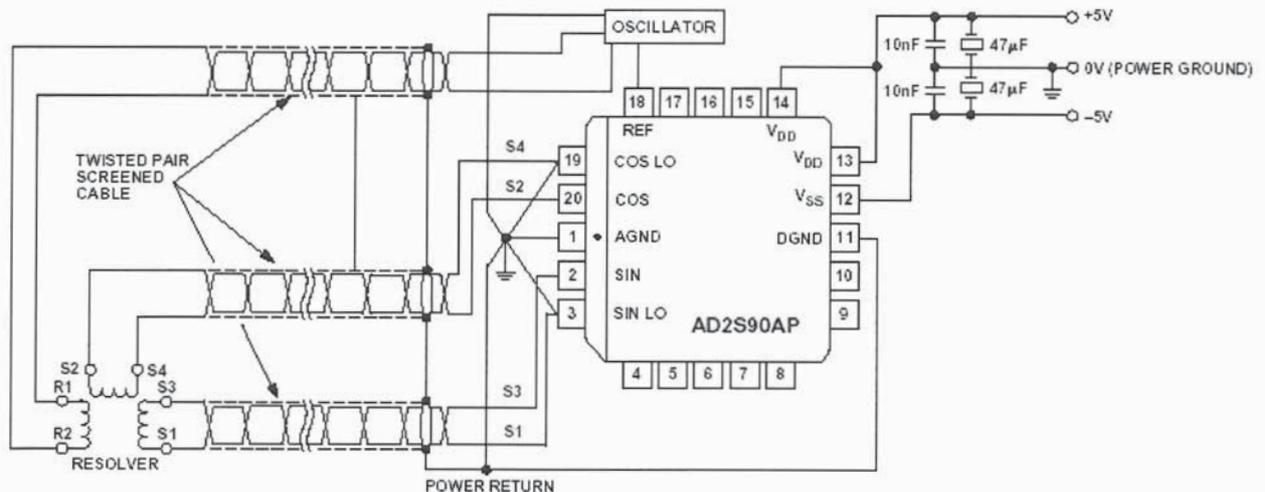


Figure n° 12 – Câblage d'un résolveur et de son électronique de conditionnement

3.1 - Harmoniques générées par une cellule de commutation d'onduleur

Un convertisseur est une source potentielle de bruits électromagnétiques large spectre. Nous allons étudier ici les harmoniques qui sont susceptibles d'être générées par les signaux à fronts raides transitant dans une cellule de commutation élémentaire. La **Figure n° 13** présente une telle cellule et les créneaux de courants perturbateurs.

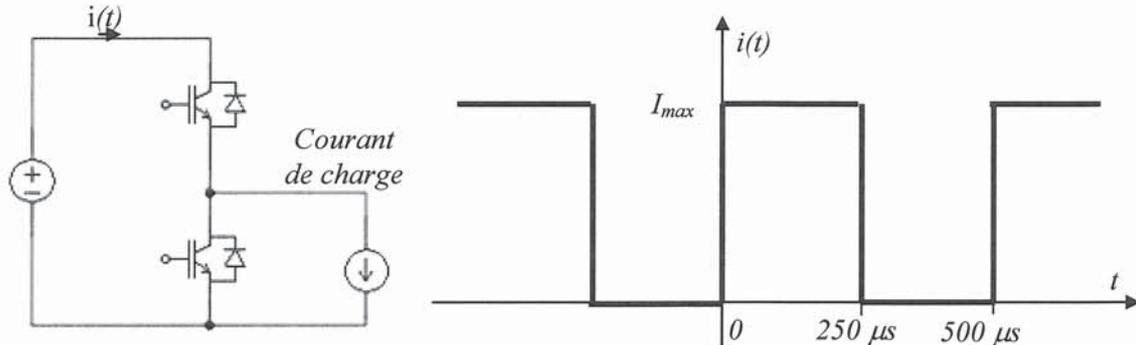


Figure n° 13 – Cellule de commutation et courant perturbateur

Le courant $i(t)$ est assimilé ici à un signal de forme rectangulaire $0-I_{max}$ A, de rapport cyclique 0,5. Le courant $i(t)$ est périodique et peut donc s'écrire sous la forme d'une série de Fourier :

$$i(t) = \langle i \rangle + \sum_n A_n \cdot \cos(n\omega t) + B_n \cdot \sin(n\omega t).$$

- 3.1.1. Calculer la valeur moyenne $\langle i \rangle$ et la valeur efficace I_{eff} du courant $i(t)$ de la **Figure n° 13**.
- 3.1.2. Quelle est la fréquence du fondamental de la décomposition en série de Fourier de $i(t)$? Pour la représentation **Figure n° 13** de $i(t)$, a-t-on A_n ou B_n nul ? Si oui, pourquoi ?
- 3.1.3. Donner l'expression et calculer les valeurs des 3 premiers coefficients A_n ou B_n non nuls (donner une réponse numérique avec 2 chiffres après la virgule) pour $I_{max} = 1A$.
- 3.1.4. Représenter graphiquement le spectre de $i(t)$ sur une large gamme de fréquence. Indiquer l'évolution des harmoniques en haute fréquence.
- 3.1.5. Les commutations ne sont en réalité pas instantanées. Le courant présente des pentes entre 0 et I_{max} d'une durée de 100 ns. Donnez la nouvelle représentation de $i(t)$. Calculer les valeurs des 3 premiers coefficients A_n ou B_n non nuls (donner une réponse numérique avec 2 chiffres après la virgule) pour $I_{max} = 1 A$.
- 3.1.6. Pour quelles fréquences observe-t-on des différences entre les deux spectres ?

3.2 - Perturbations par couplage magnétique

Les signaux transmis sur les câbles des capteurs peuvent donc être parasités par un champ magnétique variable de large spectre.

- 3.2.1. Rappeler quelles peuvent être ici les sources de champs magnétiques et la relation liant la tension $e(t)$ induite dans une spire de surface S et perpendiculaire au champ magnétique $B(t)$ environnant.
- 3.2.2. On s'intéresse au cas de la **Figure n° 14 (a)** où l'émetteur est une source de tension. Calculer la fraction $V_{RR}(t)$ de la tension parasite $e(t)$ apparaissant aux bornes de l'impédance d'entrée R_R du récepteur. Quel est l'intérêt de plaquer le fil de signal capteur contre le fil de masse ou de les torsader ?
- 3.2.3. On s'intéresse au cas de la **Figure n° 14 (b)** où le signal capteur serait émis à l'aide une source de courant. Calculer l'expression de la fraction de courant $I_e(t)$ due à la tension parasite $e(t)$. Que conclure si l'impédance de la source de courant est très grande ?

- 3.2.4. On s'intéresse au cas de la **Figure n° 14 (c)** où la transmission et la réception du signal se fait de manière différentielle sur deux fils. Calculer la tension de sortie de l'amplificateur différentiel de gain différentiel unitaire. Quelles sont les précautions à prendre pour avoir cette sortie égale à $V_E(t)$?
- 3.2.5. Dans quel cas opère t-on lors de l'utilisation d'un LVDT ou résolveur ?

3.3 - Perturbations par couplage électrique

Les champs magnétiques ne sont pas les seuls à perturber le signal transmis sur une ligne. Un champ électrique peut également être perturbateur. L'effet d'un champ électrique créé par une tension V_P peut être modélisé par la **Figure n° 15**. Cette tension perturbatrice est couplée à la ligne de données issues du capteur par une capacité C_{LP} . La ligne présente également une capacité parasite C_{LM} par rapport à la masse.

- 3.3.1. Calculer la transmittance de Laplace liant la tension perturbatrice V_P à la tension V_{RR} au niveau du récepteur R_R (E_s est nul).
- 3.3.2. Donner la réponse $V_{RR}(t)$ correspondant à un échelon unitaire sur V_P .
- 3.3.3. Quel est l'effet de plaquer la ligne de données contre la masse ?
- 3.3.4. Expliquer en quoi une liaison symétrique par paire différentielle peut améliorer la transmission.
- 3.3.5. La présence d'une tresse ou d'un feuillet métallique de blindage relié à la masse permet également de lutter contre ces perturbations. Expliquer pourquoi.

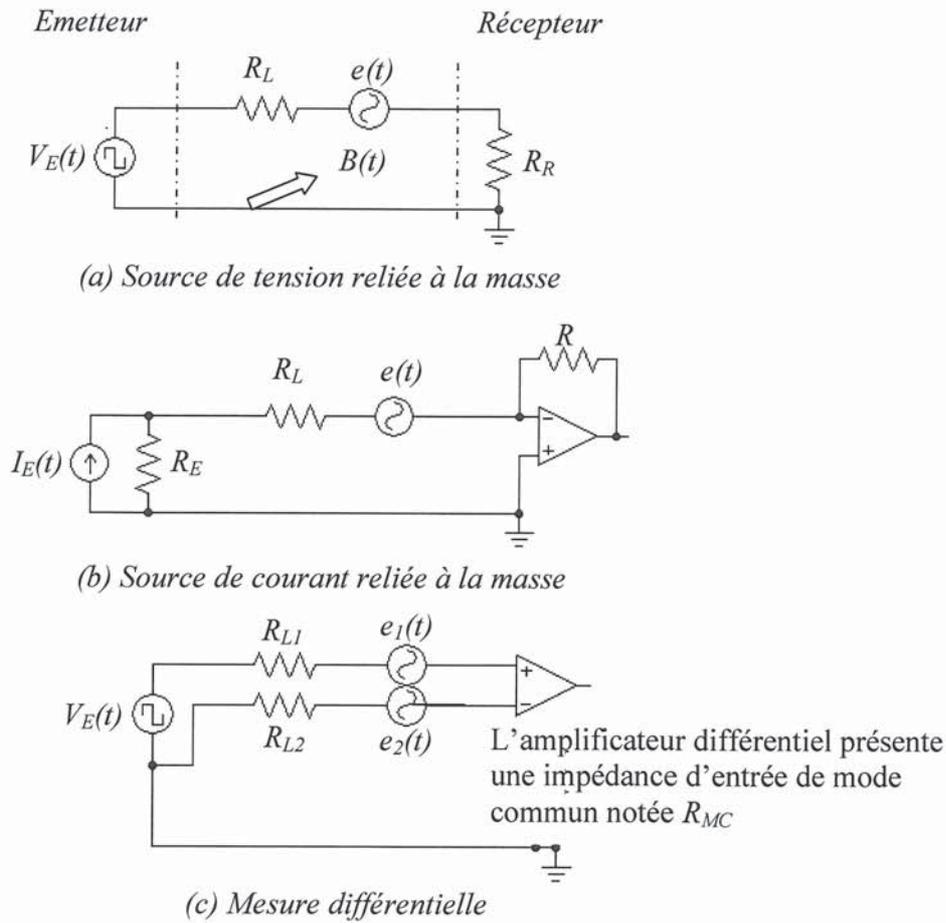


Figure n° 14 – Perturbations dues à un champ magnétique

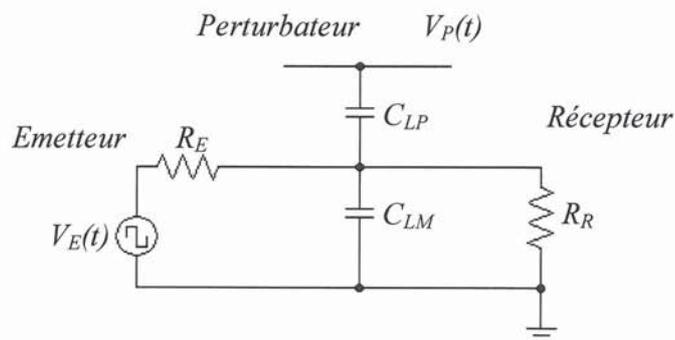


Figure n° 15 – Couplage capacitif