

Électromagnétisme

Sujet d'entraînement

Contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault

L'aluminium tient une place de choix dans la fabrication des pièces métalliques des avions en particulier sous forme d'alliage. Dans les avions récents comme l'A380, les alliages d'aluminium représentent 75 % de la masse de l'avion vide. La sensibilité de ces alliages à la corrosion justifie le nombre élevé d'études récentes dans les laboratoires de recherche, publics et privés.

Ce problème s'intéresse à une méthode physique non destructive permettant de détecter des crevasses à l'intérieur d'une structure métallique.

Le but des essais non destructifs est de déceler dans une pièce métallique, et en respectant son intégrité, toute particularité de sa structure. On souhaite ici contrôler la qualité d'une plaque d'aluminium, de faible épaisseur par rapport à ses autres dimensions, en utilisant une technique de contrôle non destructif par courants de Foucault.

Le dispositif utilisé comprend :

- une bobine alimentée par un générateur de tension sinusoïdale de fréquence f . Cette bobine est déplacée à la surface de la plaque à tester, sans contact électrique ;
- un système de mesure d'impédance par détection synchrone afin de mesurer en direct l'impédance de la bobine. En effet, la bobine joue à la fois le rôle d'émetteur et de récepteur : lorsque l'opérateur passe la bobine au dessus d'un défaut interne à la plaque, son impédance interne est légèrement modifiée.

La figure 1 présente le système de détection, le dispositif de mesure d'impédance n'est pas représenté.

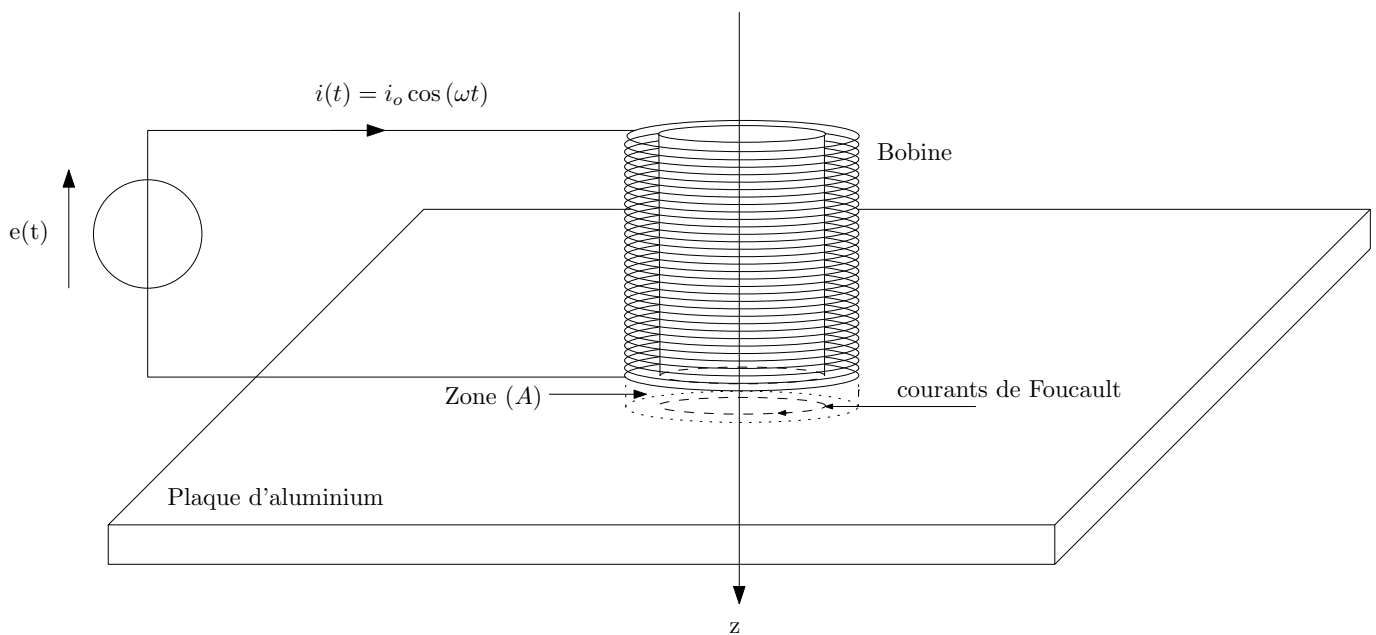


FIGURE 1 – Principe du CND

Données :

fréquence du générateur	$f = 50 \text{ Hz}$
épaisseur de la plaque	$d = 3,0 \text{ mm}$
longueur de la bobine	$l_b = 12 \text{ cm}$
nombre de spire de la bobine	$N = 1,0 \times 10^3$
rayon moyen du bobinage	$R_b = 2,5 \text{ cm}$
masse molaire de l'aluminium	$M = 27 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
masse volumique de l'aluminium	$\mu = 2,7 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
conductivité électrique de l'aluminium	$\gamma_0 = 3,8 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$
perméabilité magnétique du vide	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$

1 — Expression approchée du champ magnétique créé par la bobine excitatrice dans la plaque

À l'aide d'un logiciel de simulation, on visualise les cartes du champ magnétique $\vec{B}$ créé par la bobine dans différentes situations et ce afin d'établir son expression approchée.

Les figures 3, 4 et 5 représentent les cartes du champ créé par la bobine ainsi que les profils axiaux et radiaux de ce champ dans trois cas, avec une même amplitude de courant i_0 :

- la bobine seule pour $f = 50$ Hz (carte 1) ;
- la bobine en présence de la plaque pour $f = 50$ Hz (carte 2) ;
- la bobine en présence de la plaque pour $f = 200$ Hz (carte 3).

Le profil axial représente l'amplitude du champ magnétique $\vec{B}$ en un point M appartenant à l'axe (Oz) en fonction de sa coordonnée z , l'origine de cet axe étant choisie au centre de la bobine (voir figure 2).

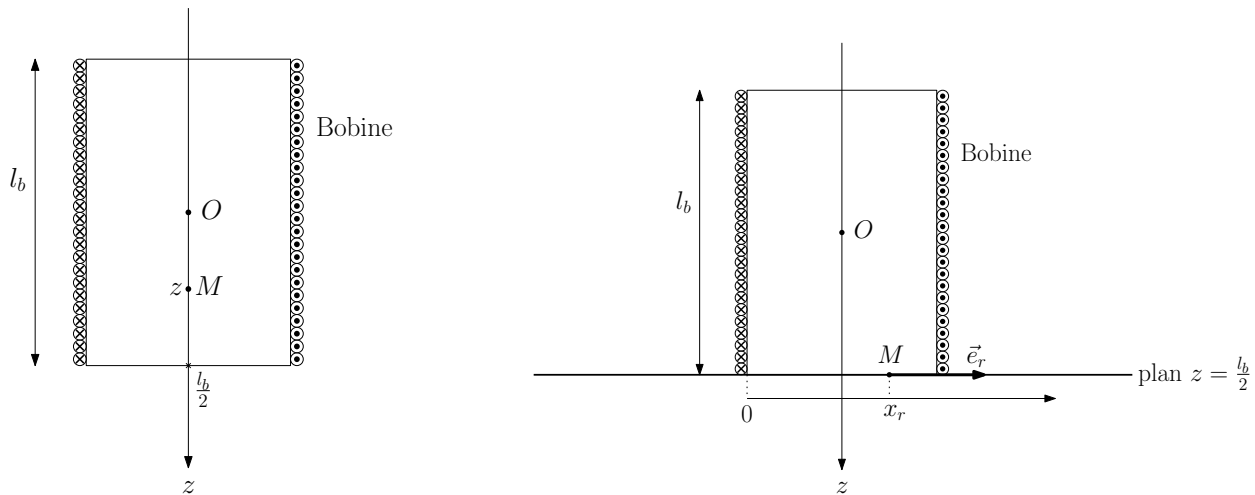


FIGURE 2 – Conventions pour les profils axial et radial

Le profil radial représente l'amplitude du champ magnétique $\vec{B}$ en un point M appartenant au plan $z = l_b/2$ en fonction de son abscisse x_r sur l'axe $(M, \vec{e}_r)$, l'origine de cet axe étant choisie sur un des côtés de la bobine (voir figure 2).

1. Justifier que le champ créé en un point M de l'espace est de la forme

$$\vec{B}(M, t) = B_r(r, z, t) \vec{e}_r + B_z(r, z, t) \vec{e}_z.$$

2. Affecter chaque simulation à chaque carte.

3. On s'intéresse au champ magnétique créé dans la partie de la plaque directement au contact avec la bobine (zone (A) sur la figure 1. Dans une première approximation, on suppose que le champ dans cette zone est de la forme

$$\vec{B}(M) = B_0 \cos(\omega t) \vec{e}_z,$$

où B_0 est l'amplitude du champ magnétique supposée uniforme.

3.a) En vous aidant des profils de la carte 2, proposer une valeur numérique pour B_0 .

3.b) En considérant que le champ au centre O de la bobine peut être assimilé au champ créé par un solénoïde infini et en vous aidant de la carte 2, justifier que B_0 peut s'écrire

$$B_0 = \alpha \frac{\mu_0 N i_0}{l_b} \quad (1)$$

où α est un coefficient dont on précisera la valeur numérique.

2 — Courants de Foucault

On se place toujours dans l'hypothèse où le champ magnétique dans la zone (A) est de la forme $\vec{B} = B_0 \cos(\omega t) \vec{e}_z$. Ce champ magnétique étant variable, il apparaît dans la plaque, un champ électrique $\vec{E}$ orthoradial, lui-même à l'origine de courants induits.

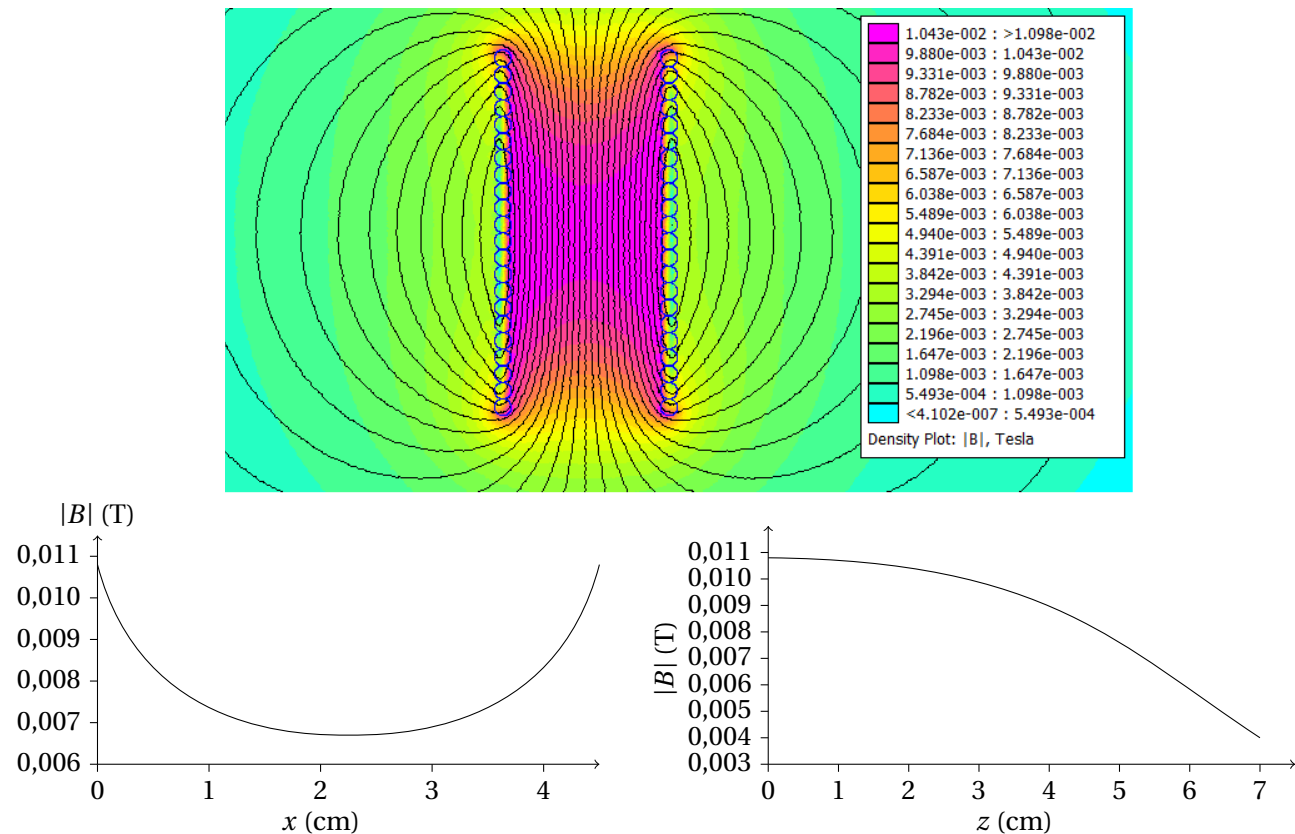


FIGURE 3 – Première simulation

4. À l'aide de la forme intégrale de l'équation de Maxwell-Faraday, déterminer dans la zone (A) l'expression du champ électrique $\vec{E}$ induit par les variations temporelles de $\vec{B}$.
5. Établir que l'expression du vecteur densité volumique de courant $\vec{j}$ est donnée par la relation

$$\vec{j} = \frac{\gamma_0 \omega B_0}{2} r \sin(\omega t) \vec{e}_\theta$$

où $\vec{e}_\theta$ est le vecteur unitaire orthoradial des coordonnées cylindriques.

3 — Modification de l'impédance de la bobine excitatrice

L'impédance de la bobine en l'absence de la plaque est $\underline{Z} = R + jL\omega$. En présence de la plaque, cette impédance est modifiée. Le but de cette sous-partie est de déterminer cette nouvelle impédance.

On modélise les variations de l'impédance $\underline{Z}$ de la bobine en présence de la plaque de la manière suivante

$$\underline{Z} = (R + \delta R) + j\omega(L - \delta L) \quad \text{ou} \quad \delta R \langle i^2 \rangle = \langle P_J \rangle \quad \text{et} \quad \frac{1}{2} \delta L \langle i^2 \rangle = \langle E_m \rangle$$

avec

- P_J la puissance dissipée par effet Joule par les courants de Foucault dans la plaque;
- E_m l'énergie magnétique stockée dans la plaque;
- $\langle X \rangle$ désignant la valeur moyenne temporelle de la grandeur $X(t)$.

6. En exploitant soigneusement les annexes 1 et 2, déterminer les valeurs numériques de R et de L qui caractérisent l'impédance de la bobine en l'absence de la plaque.
7. Justifier à l'aide d'un argument énergétique simple, que la partie réelle de l'impédance de la bobine augmente.
8. Justifier, en utilisant les cartes données par les figures 3, 4 et 5, que la partie imaginaire de l'impédance de la bobine diminue.

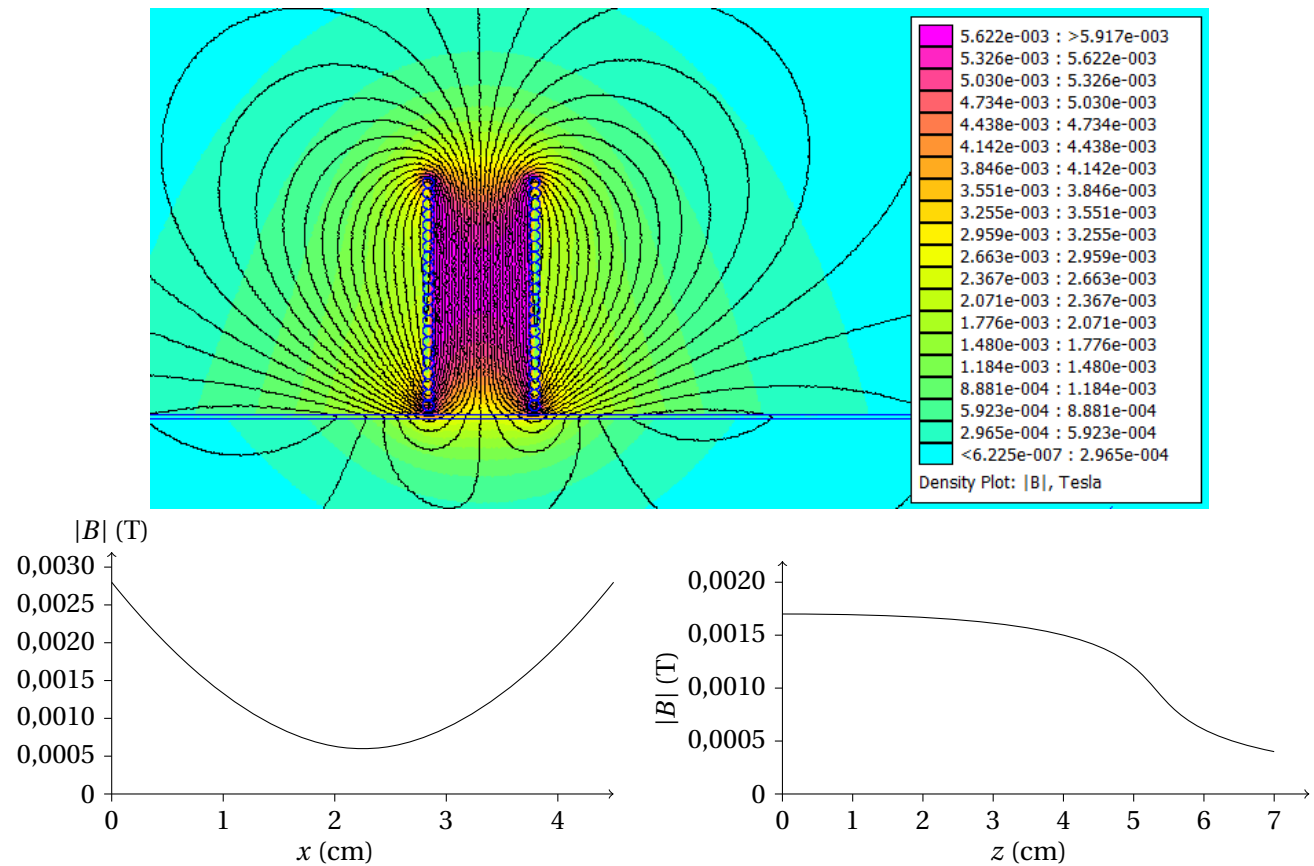


FIGURE 4 – Deuxième simulation

9. Montrer que

$$P_J = \frac{\pi d R_b^4 \gamma_0 \omega^2 B_0^2}{8} \sin^2(\omega t).$$

Déduire, en utilisant la relation (1), l'expression de δR en fonction de α , N , d , R_b , γ_0 , ω et l_b .

10. L'énergie électromagnétique E_m est due au champ magnétique $\vec{B}'$ créé par les courants de Foucault dans la plaque. Pour simplifier, on suppose que ce champ $\vec{B}'$ est nul en dehors de la zone (A) et que dans la zone (A) il est de la forme $\vec{B}' = B'(r, z, t) \vec{e}_z$.

10.a) En utilisant la forme intégrale de l'équation de Maxwell-Ampère écrite dans le cadre de l'approximation des régimes quasi-stationnaires, déterminer le champ magnétique $\vec{B}'$ créé dans la zone (A). On supposera ce champ nul pour $r = R_b$.

10.b) En déduire l'expression de E_m .

10.c) Déduire, en utilisant la relation (1), l'expression de δL en fonction de α , N , d , R_b , γ_0 , ω et l_b .

10.d) Déterminer un ordre de grandeur de δR et δL . Conclure.

10.e) Discuter des avantages et inconvénients à travailler à fréquence plus élevée.

Annexe 1 : mesure de l'impédance de la bobine détectrice

Pour mesurer l'impédance de la bobine, on réalise le montage donné figure 6 où

- la résistance R' vaut 500Ω ;
- l'amplificateur linéaire intégré fonctionne en régime linéaire;
- le générateur basse fréquence est réglé en générateur de créneaux de fréquence $f = 1/T = 1 \text{ kHz}$: pour $0 \leq t \leq T/2$, $e(t) = E = 5,00 \text{ V}$ et pour $T/2 \leq t \leq T$, $e(t) = 0$;
- la tension $Y_1(t)$ est utilisée pour déclencher la carte d'acquisition. La fréquence d'échantillonnage étant $f_e = 50 \text{ kHz}$ et la durée d'acquisition est de 20 ms .

Le chronogramme de $Y_2(t)$ est donné figure 7.

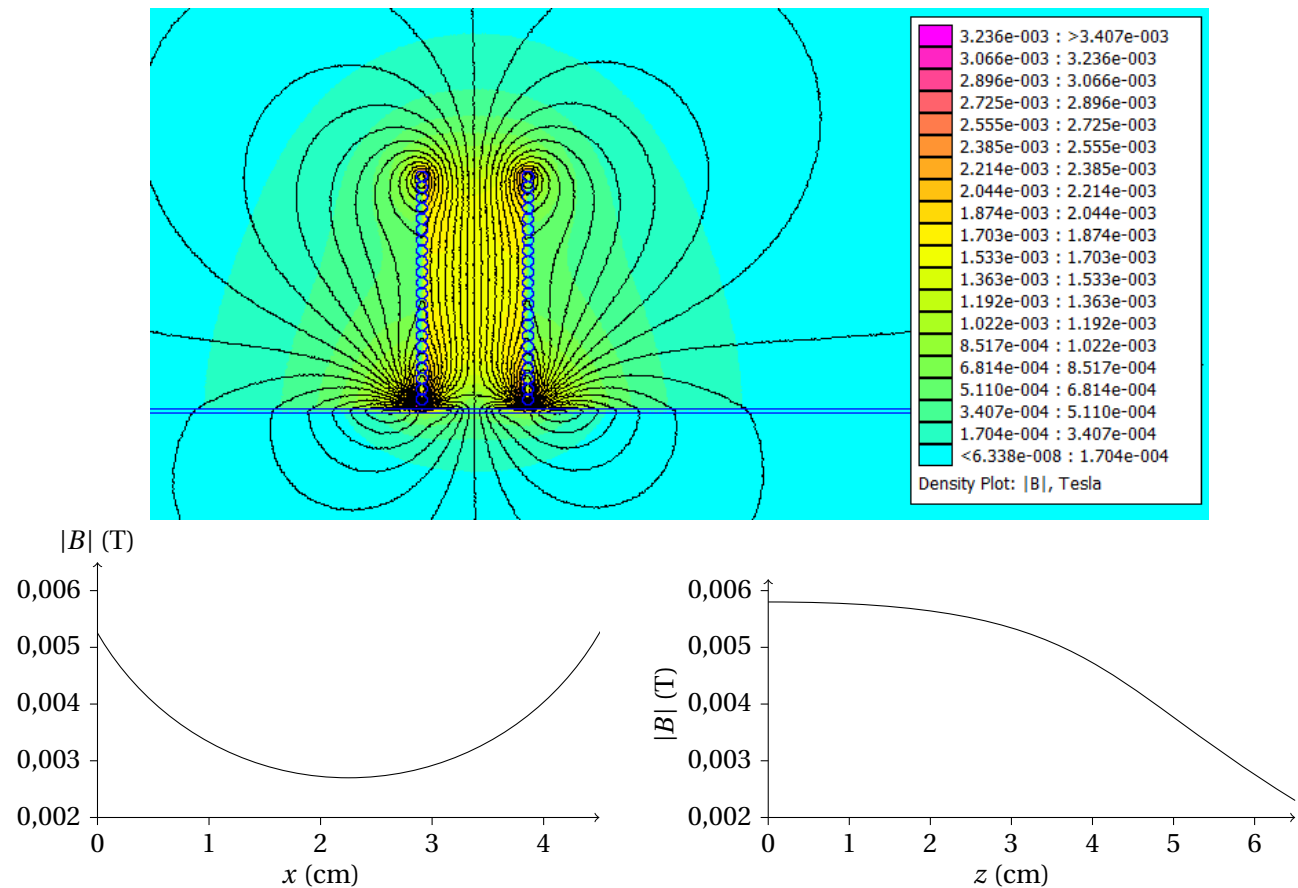


FIGURE 5 – Troisième simulation

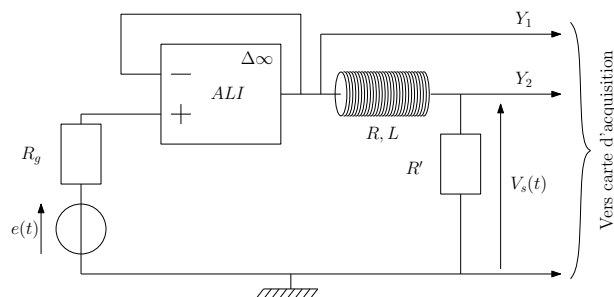


FIGURE 6 – Schéma du montage

Annexe 2 : L'amplificateur opérationnel idéal en régime linéaire

L'amplificateur opérationnel (ALI), représenté figure 8, est un composant électronique permettant d'amplifier la différence de potentiel entre les entrées V_+ et V_- .

Un ALI idéal est un ALI vérifiant les conditions suivantes :

1. les courants d'entrée $i_+(t)$ et $i_-(t)$ sont nuls;
2. lorsque l'ALI idéal fonctionne en régime linéaire, on a $V_+(t) = V_-(t)$ et $V_s(t) < V_{\text{sat}} \approx 12 \text{ V}$;
3. lorsque l'ALI idéal fonctionne en régime non linéaire, on a : $V_s(t) = +V_{\text{sat}}$ si $V_+(t) > V_-(t)$ et $V_s(t) = -V_{\text{sat}}$ si $V_+(t) < V_-(t)$.

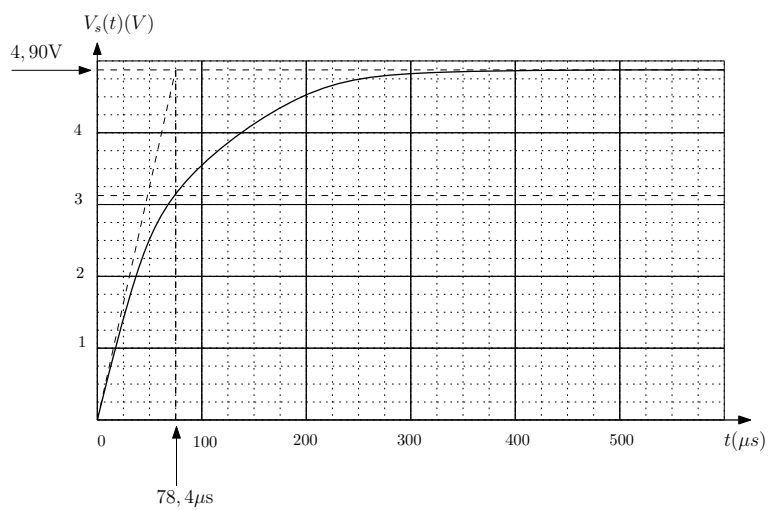
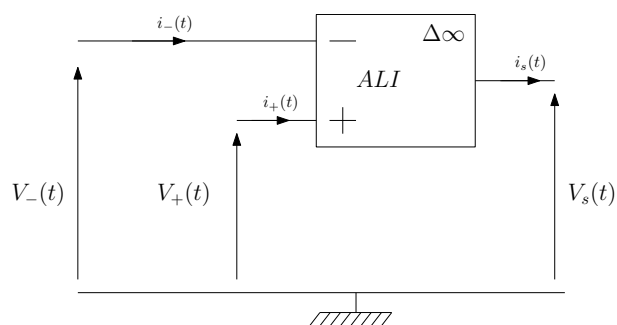
FIGURE 7 – Chronogramme de Y_2 

FIGURE 8 – Schéma du montage