



**ÉTUDE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT
D'UN DÉTECTEUR DE MÉTAUX À BATTEMENT
DE FRÉQUENCE**

Sommaire

Introduction

I. Étude théorique du principe de battement de fréquence

II. Montage et réalisation du détecteur

III. Tests des performances du détecteur et de ses limites

Conclusion

INTRODUCTION



Définition :

Appareil qui permet de délimiter la position d'objets métalliques grâce à l'induction magnétique.

Domaines d'application :

- * archéologie
- * sécurité
- * militaire
- * médical
- * loisir
- * bâtiment



Objectifs :

- ➔ Comprendre le fonctionnement d'un détecteur de métaux
- ➔ Fabriquer un détecteur à battement de fréquence
- ➔ Étudier ses performances et identifier ses limites

*Lien avec le thème
«Milieux : interactions,
interfaces, homogénéité,
ruptures » ?*

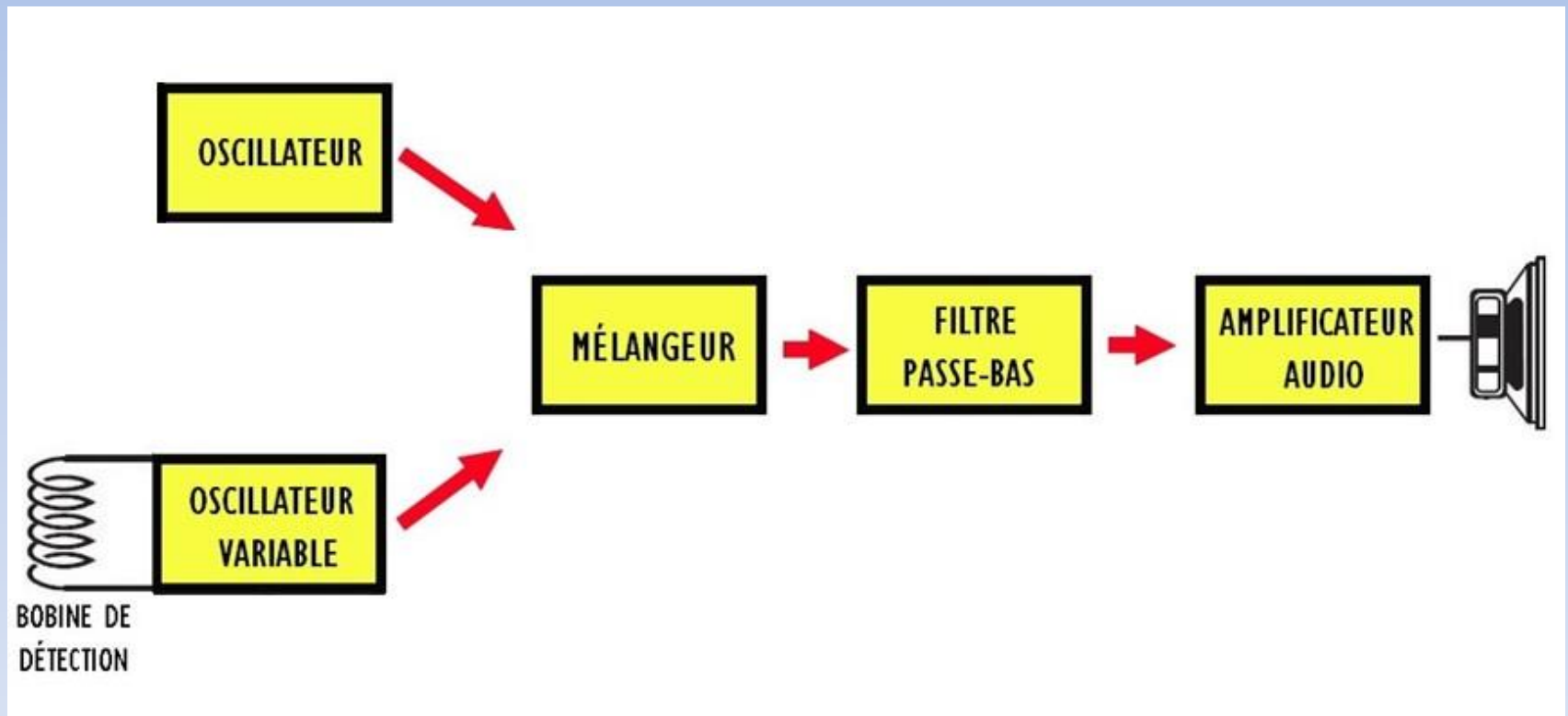
Étude de l'interaction
entre un métal
homogène et des
bobines

Types de détecteurs de métaux :

- * **détecteur à battement de fréquence (BFO)**
- * détecteur balance induction (IB-TR)
- * détecteur à très basse fréquence (VLF)
- * détecteur à induction pulsée
- * radar à pénétration de sol

I. Étude théorique du principe de battement de fréquence

1. Schéma de principe du détecteur à battement de fréquence



2. Induction électromagnétique :

Phénomène physique qui fait apparaître un courant électrique, appelé courant induit, dans un circuit placé dans un champ magnétique variable.

● Loi de Faraday :

Tout circuit soumis à une variation de flux ϕ voit apparaître à ses bornes une force électromotrice e telle que :

$$\boxed{\mathbf{e} = - \frac{d\phi}{dt}} \quad \text{où } \phi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS}$$

AUTO-INDUCTION

Courant variable
dans la bobine



Flux propre
variable



Induit une FÉM
dans la bobine

Définition de

l'inductance propre : $\phi = Li$

FÉM d'auto-induction : $e = -L \frac{di}{dt}$

avec L l'inductance propre de la bobine (en H)

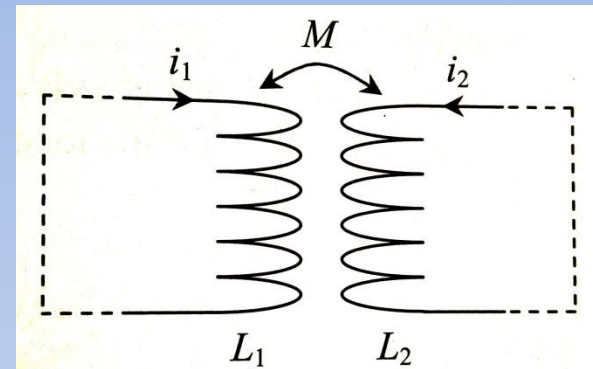
i l'intensité du courant de la bobine

ϕ le flux propre

M coefficient d'inductance mutuelle tel que

$$M \leq L_1 L_2$$

INDUCTION MUTUELLE



Circuit (C1)
et (C2) en
présence

Flux induit :

$$\phi_{12} = M i_1 \quad \text{et} \quad \phi_{21} = M i_2$$

FÉM d'induction mutuelle :

$$e_{1 \text{ ind}} = -L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

et

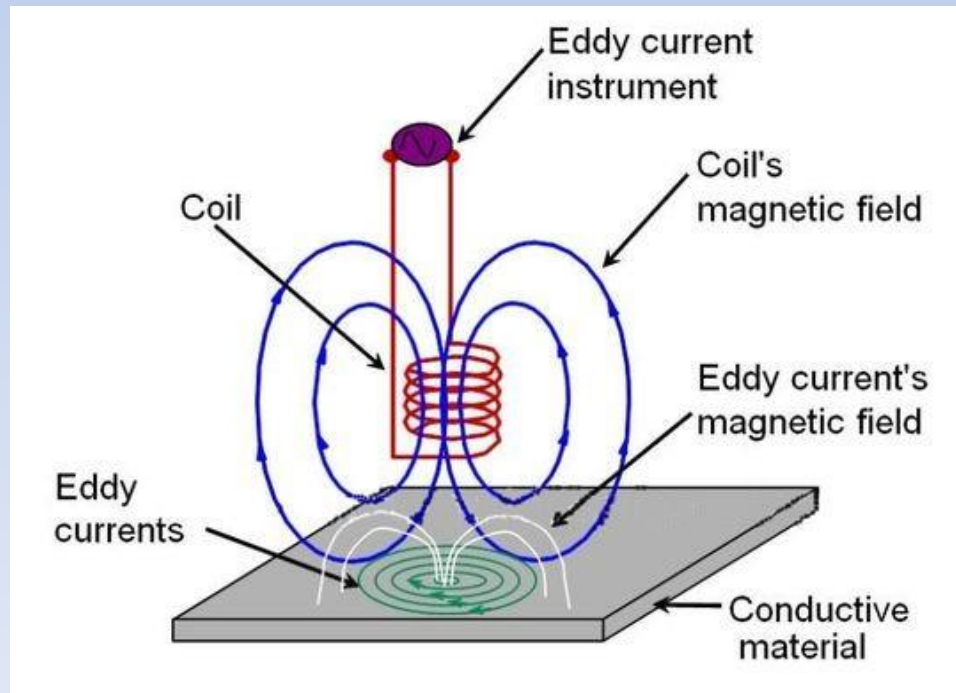
$$e_{2 \text{ ind}} = -L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$

3. Courants de Foucault :

Courants induits apparaissant au sein d'un conducteur non filiforme

→ *énergie reçue dissipée en chaleur par effet Joule dans le conducteur*

→ *Sont créés par la variation d'un champ magnétique extérieur traversant ce milieu ou par déplacement de cette masse dans un champ magnétique*



4. Caractéristiques des métaux :

● Conductivité électrique :

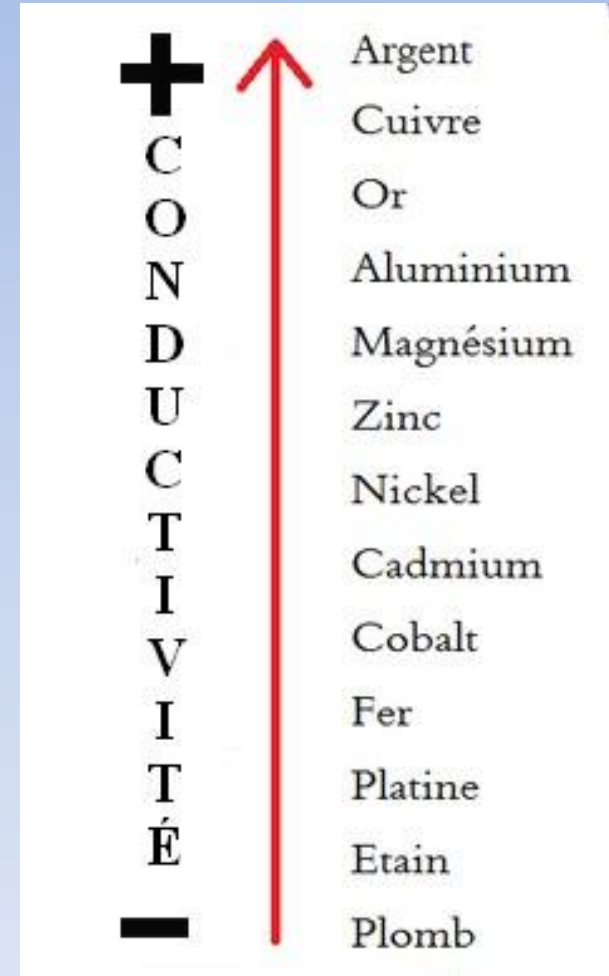
→ σ (en $S.m^{-1}$), inverse de la résistivité ρ

→ Loi d'Ohm: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

● Résistance :

→ R (en Ω), inverse de la conductance G

→ $R = \rho \cdot \frac{L}{S}$



II. Montage et réalisation du détecteur

1. Montage de mon détecteur :

avec :

$$R1 = 10 \text{ k}\Omega$$

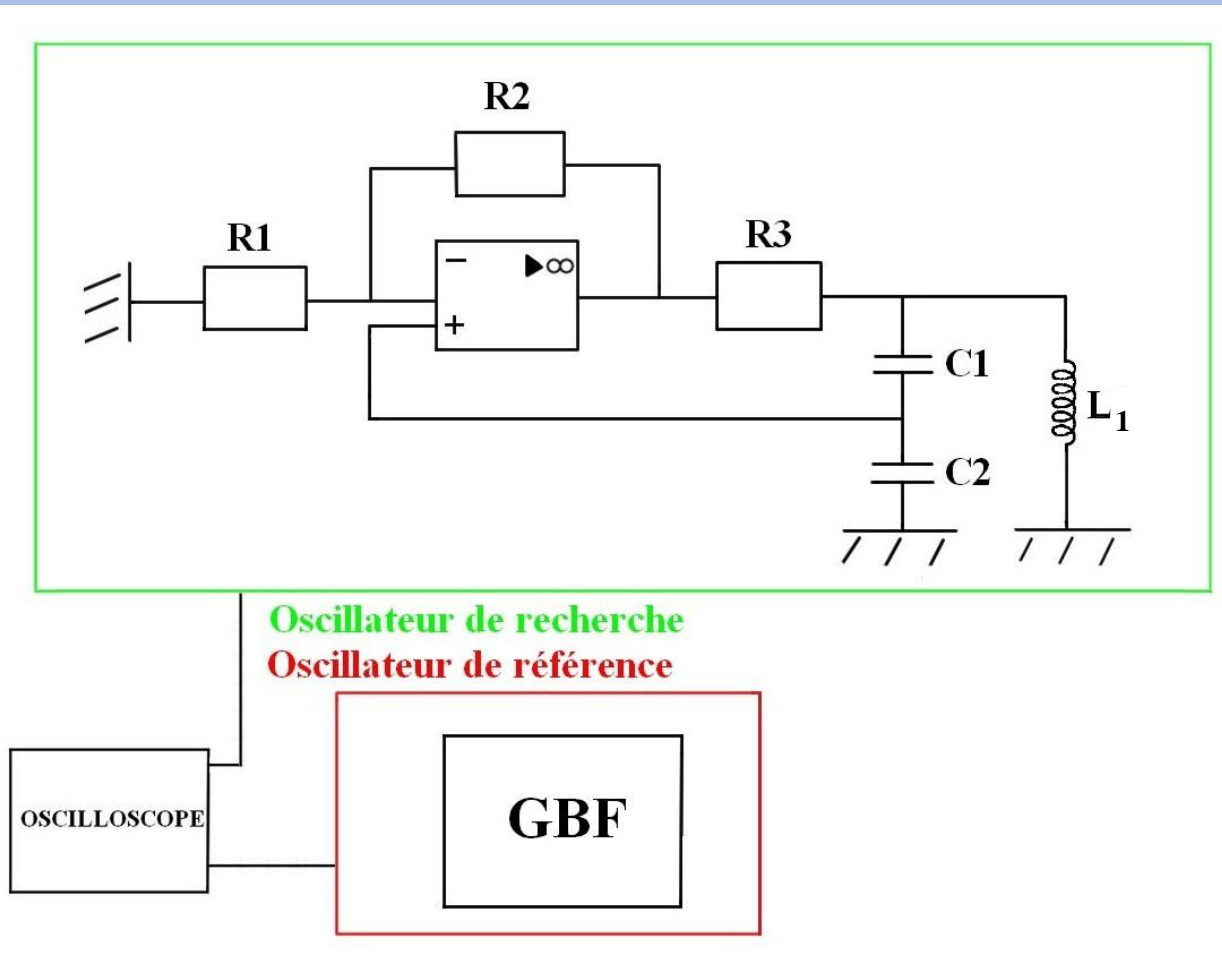
$$R2 = 33 \text{ k}\Omega$$

$$R3 = 20 \text{ k}\Omega$$

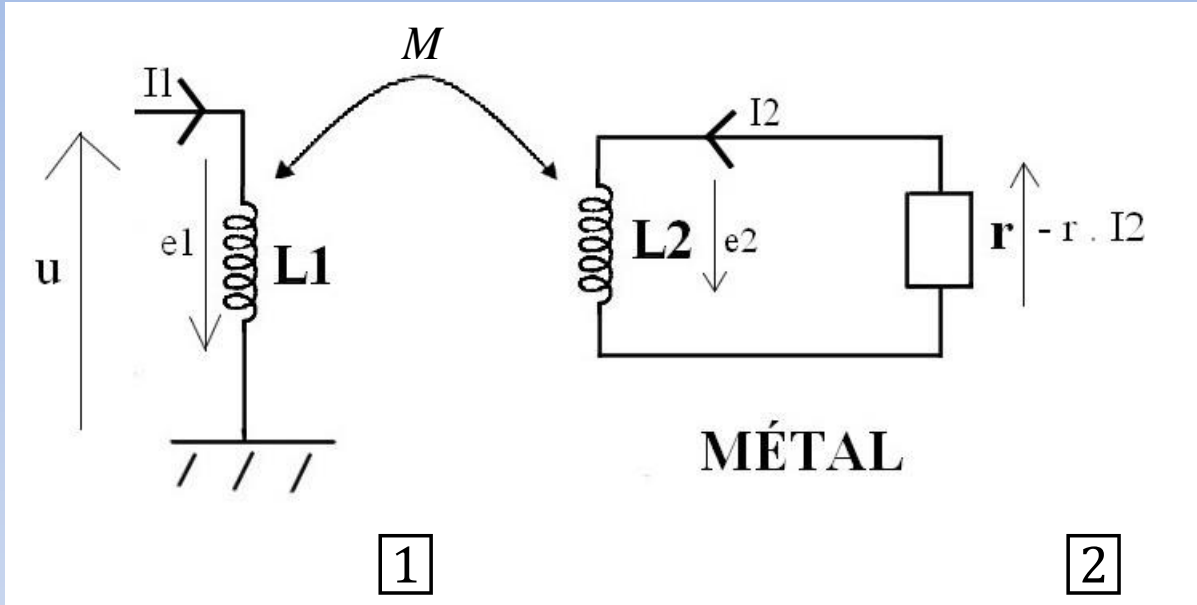
$$C1 = 900 \text{ pF}$$

$$C2 = 900 \text{ pF}$$

$$L_1 = 0,173 \text{ H}$$



Couplage bobine/métal



Si on néglige la résistance r devant L2 :

$$\underline{Z_{\acute{e}q}} = j\omega L_{\acute{e}q}$$

→ Voir annexe 1

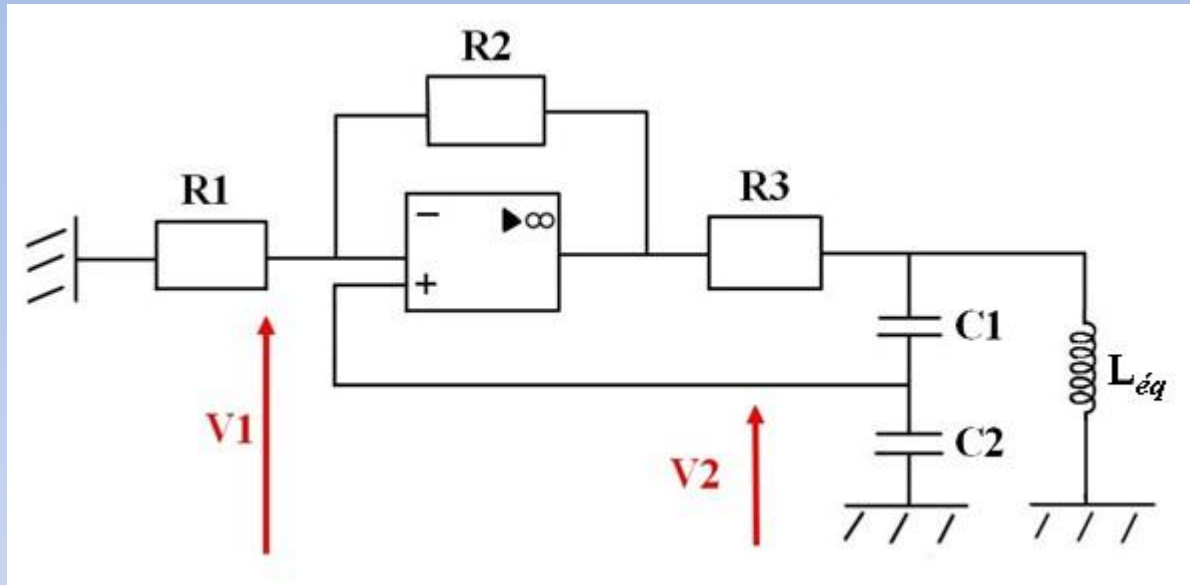
⇒ Inductance équivalente :

$$L_{\acute{e}q} = L1(1 - k^2)$$

⇒ Coefficient de couplage :

$$k = \frac{M}{\sqrt{L1 \cdot L2}}$$

Oscillateur de recherche (type Colpitts)



Fonction de transfert :

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{\underline{V2}}{\underline{V1}} = \frac{H_0}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

→ Voir annexe 2

Avec :

- $H_0 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times \frac{C_1}{C_1 + C_2}$

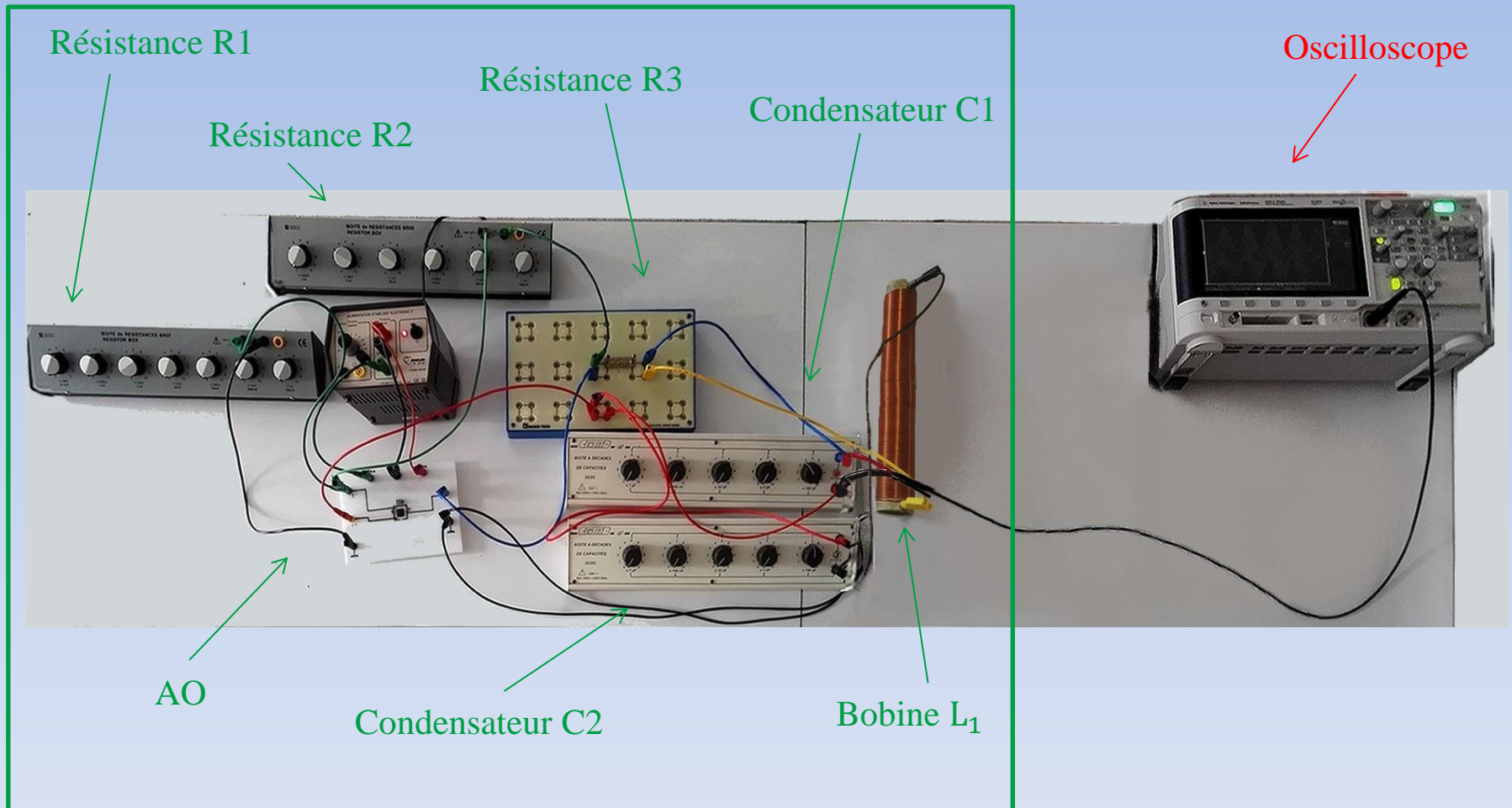
- $Q = R_3 \sqrt{\frac{C_1 \cdot C_2}{(C_1 + C_2) L_{\text{éq}}}}$

- $\omega_0 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_{\text{éq}} \cdot C_1 \cdot C_2}}$

⇒ Fréquence d'oscillation :

$$\mathbf{F = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{L_{\text{éq}} \cdot C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}}}$$

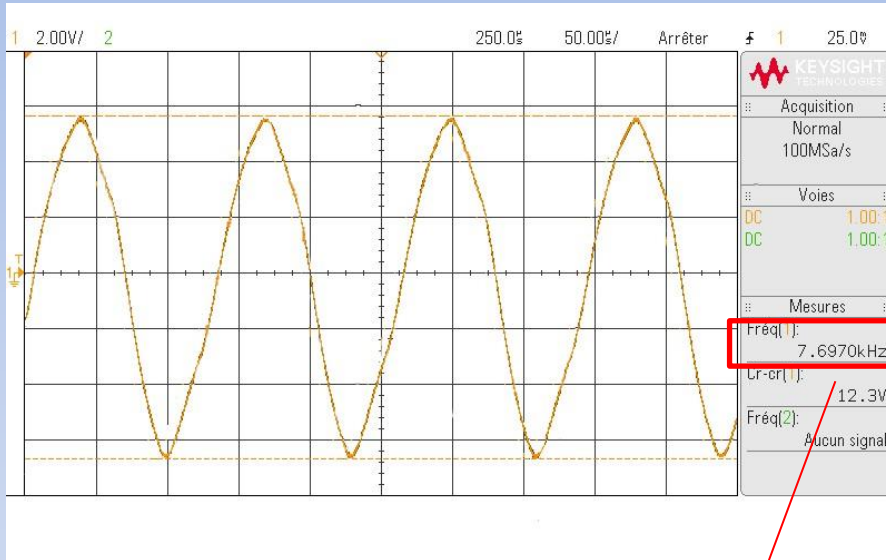
2. Réalisation du montage :



OSCILLATEUR DE RECHERCHE

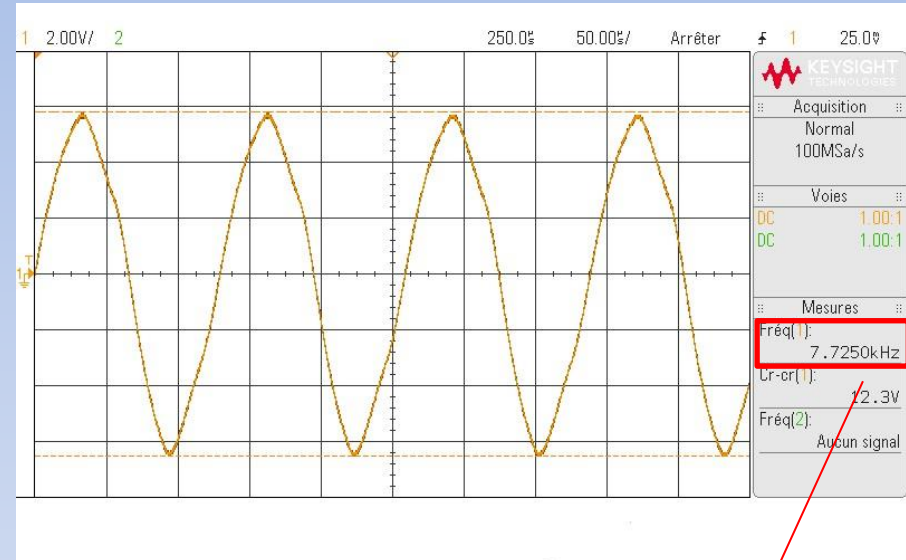
III. Tests de la performance du détecteur et de ses limites

Résultat de l'expérience



Tension aux bornes de l'oscillateur de recherche sans métaux

Fréquence= 7 697 Hz

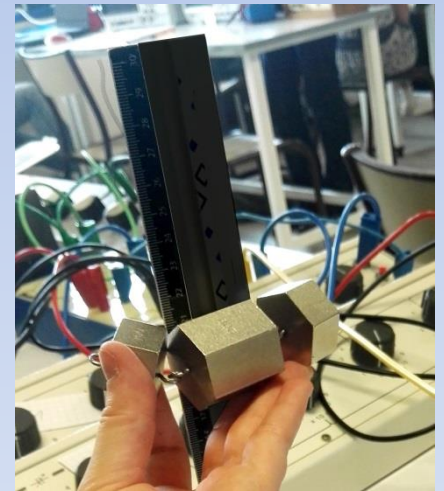
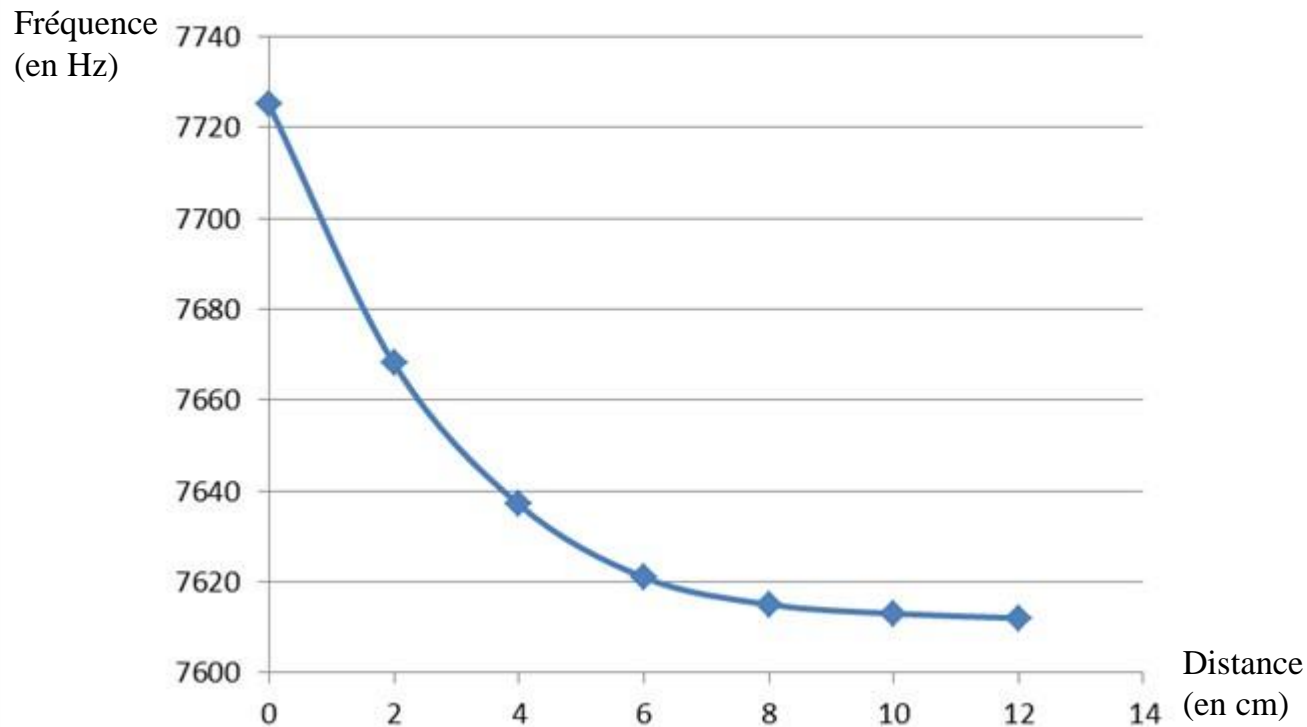


Tension aux bornes de l'oscillateur de recherche avec métaux

Fréquence= 7 725 Hz

Distance de détection pour une masse en fer de 400 g

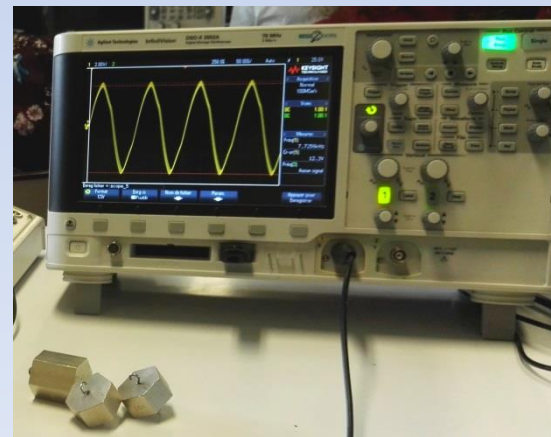
Fréquence en fonction de la distance de détection



Détection d'objets de différentes dimensions

	Pas de métal	50g de fer	100g de fer	200g de fer	400g de fer
Variation de la fréquence de l'oscillateur (en Hz)	0	4,6	8,2	12,5	16

On se place à une distance de 5 cm pour toutes les mesures.



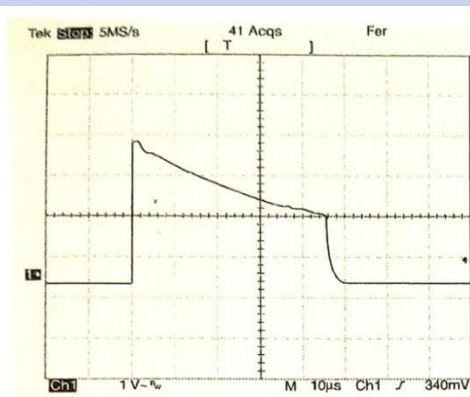
Impacts de l'environnement et de la composition des métaux

* Discrimination :

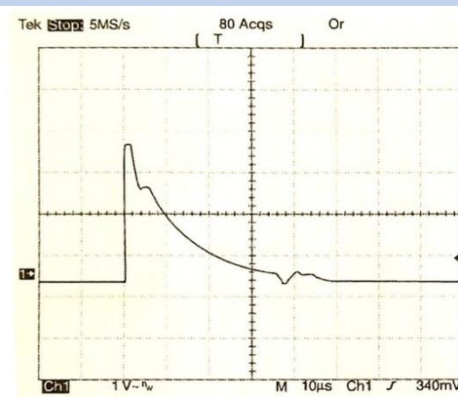
Permet la détection sélective grâce à l'élimination des métaux ferreux de la recherche

* Effets de sol :

Interférences provoquées par les différentes natures de sol du fait de leur composition \Rightarrow faux signaux



Fer



Or

Courbes d'amortissement du fer et de l'or

*Détection de différents métaux :

	Or	Argent	Aluminium	Fer
Distance de détection (en cm)	2	2	2	1,8
Variation de fréquence de l'oscillateur (en Hz)	1,1	1,1	1,1	1

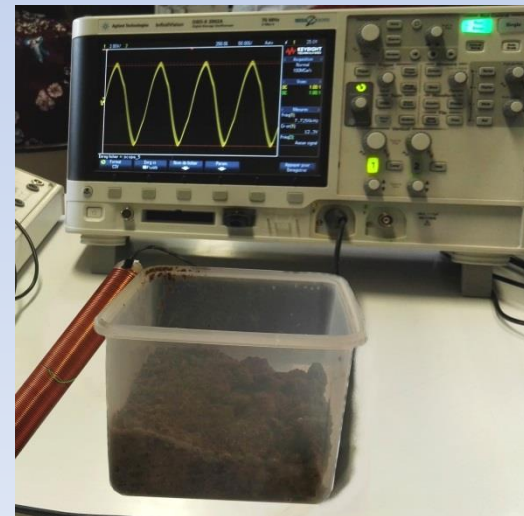
Chaque métaux est en quantité de 10g.



*Impact de l'environnement sur la détection :

	Air	Terre	Sable
Variation de fréquence de l'oscillateur (en Hz)	8,2	8	8,1

On utilise une masse de fer de 100g à une distance de 5cm de l'oscillateur.



CONCLUSION

- Simple à fabriquer
- Simple à comprendre

MAIS:

- Courte portée de détection
- Faible sensibilité
- Pas de discrimination possible
- Sensible à la composition du sol et de l'environnement

ANNEXE 1 *Calcul de $\underline{Z}_{\text{éq}}$*

Loi des mailles :

$$\begin{cases} L_1 \frac{d I_1}{dt} + M \frac{d I_2}{dt} = u & \boxed{1} \\ -L_2 \frac{d I_2}{dt} - M \frac{d I_1}{dt} = r \cdot I_2 & \boxed{2} \end{cases}$$

On passe en RSF :

$$\begin{cases} -j\omega L_1 \cdot \underline{I_1} - j\omega M \cdot \underline{I_2} = \underline{U} & \boxed{1} \\ -j\omega L_2 \cdot \underline{I_2} - j\omega M \cdot \underline{I_1} = r \cdot \underline{I_2} & \boxed{2} \end{cases}$$

$$\boxed{1} \Leftrightarrow \underline{I_2} = \frac{-j\omega M}{r + j\omega L_2} \underline{I_1} \quad \text{et on injecte dans } \boxed{2} :$$

$$\underline{U} = \underbrace{\left[j\omega L_1 + \frac{M^2 \omega^2}{r + j\omega L_2} \right]}_{\underline{Z}_{\text{éq}}} \underline{I_1}$$

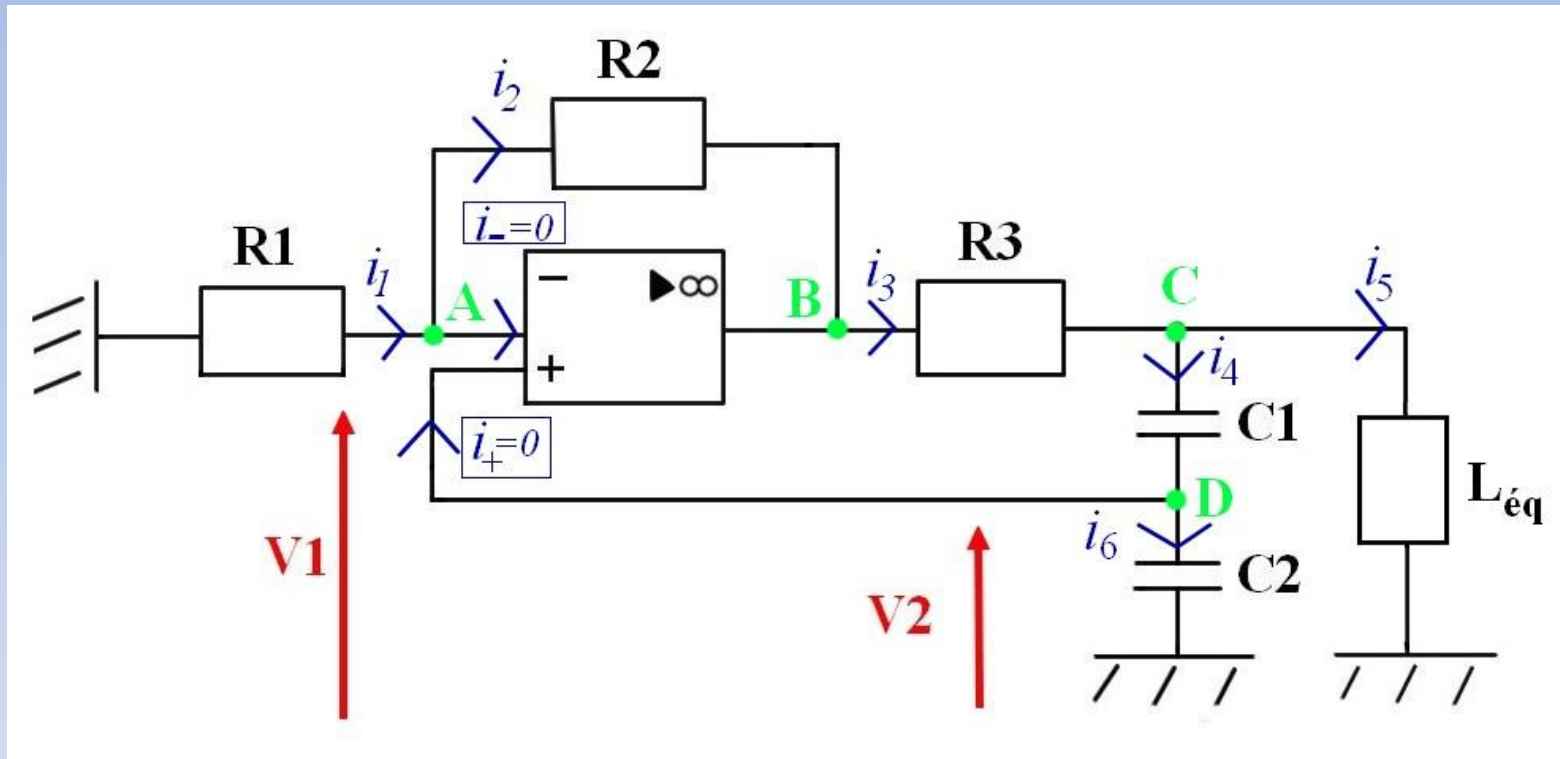
$$\underline{Z}_{\acute{e}q} = \frac{rM^2\omega^2}{r^2 + (L_2\omega)^2} + j \left[\omega L_1 - \frac{L_2 \cdot M^2 \omega^3}{r^2 + (L_2\omega)^2} \right]$$

Si on néglige la résistance r face   L_2 :

$$\underline{Z}_{\acute{e}q} = j\omega L_1 \left[1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} \right]$$

$L_{\acute{e}q}$

ANNEXE 2 *Calcul de $\underline{H}(j\omega)$*



$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{Loi des nœuds en A :} \quad \underline{i_1} = \underline{i_2} \\
 \text{Loi des nœuds en C :} \quad \underline{i_3} = \underline{i_4} + \underline{i_5} \\
 \text{Loi des nœuds en D :} \quad \underline{i_4} = \underline{i_6}
 \end{array} \right.$$

$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} -\frac{\underline{V}_A}{R1} = \frac{\underline{V}_A - \underline{V}_B}{R2} \\ \frac{\underline{V}_B - \underline{V}_C}{R3} = \frac{\underline{V}_C}{j\omega L_{\acute{e}q}} + j\omega C1(\underline{V}_C - \underline{V}_D) \\ j\omega C1(\underline{V}_C - \underline{V}_D) = j\omega C2\underline{V}_D \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \underline{V}_B = \frac{R1 + R2}{R1} \underline{V}_A \\ \frac{\underline{V}_B}{R3} + j\omega C1\underline{V}_D = \left(\frac{1}{R3} + \frac{1}{j\omega L_{\acute{e}q}} + j\omega C1 \right) \underline{V}_C \\ \underline{V}_C = \frac{C1 + C2}{C1} \underline{V}_D \end{array} \right. \quad \boxed{1}$$

$$\boxed{1} \Leftrightarrow \frac{R2 + R1}{R1 \cdot R3} \underline{V}_A = \left(\frac{C1 + C2}{C1} \left(\frac{1}{R3} + \frac{1}{j\omega L_{\acute{e}q}} + j\omega C1 \right) - j\omega C1 \right) \underline{V}_D$$

$$\Leftrightarrow \frac{\underline{V}_D}{\underline{V}_A} = \frac{\frac{R2 + R1}{R1} \times \frac{C1}{C1 + C2}}{1 + \frac{R3}{j\omega L_{\acute{e}q}} + j\omega C1 R3 - j\omega \frac{C1^2 R3}{C1 + C2}}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\underline{V}_D}{\underline{V}_A} = \frac{\frac{R1 + R2}{R1} \times \frac{C1}{C1 + C2}}{1 - \frac{jR3}{\omega L_{\acute{e}q}} + j\omega R3 \frac{C1 \cdot C2}{C1 + C2}}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\frac{\underline{V}_D}{\underline{V}_A} = \frac{\frac{R1 + R2}{R1} \times \frac{C1}{C1 + C2}}{1 + jR3 \sqrt{\frac{C1C2}{(C1 + C2)L_{\acute{e}q}}} \left(\omega \sqrt{\frac{C1C2L_{\acute{e}q}}{C1 + C2}} - \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{C1 + C2}{C1C2L_{\acute{e}q}}} \right)}}$$