

TD d'Electromagnétisme

Exercice 1 : Représentation du champ magnétique

Représenter, sur les circuits ci-dessous, les lignes de champ magnétique avec leur orientation. On supposera le fer parfait lorsque celui-ci est présent.

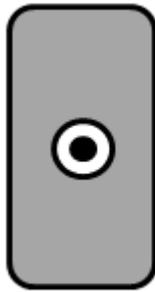


Figure 1

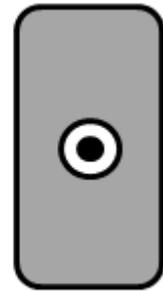


Figure 2

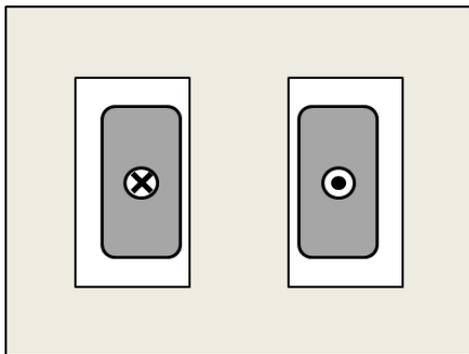


Figure 3

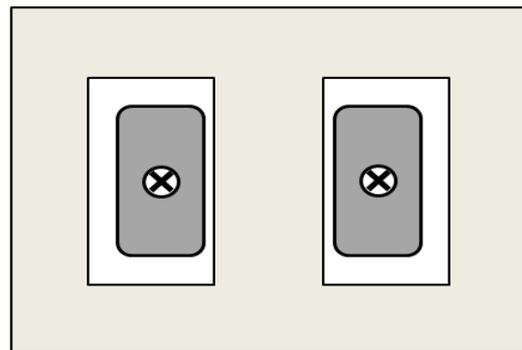


Figure 4

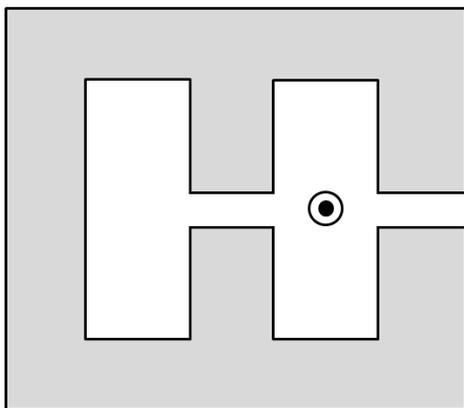


Figure 5

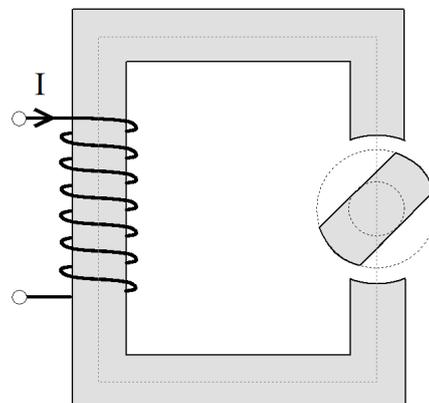
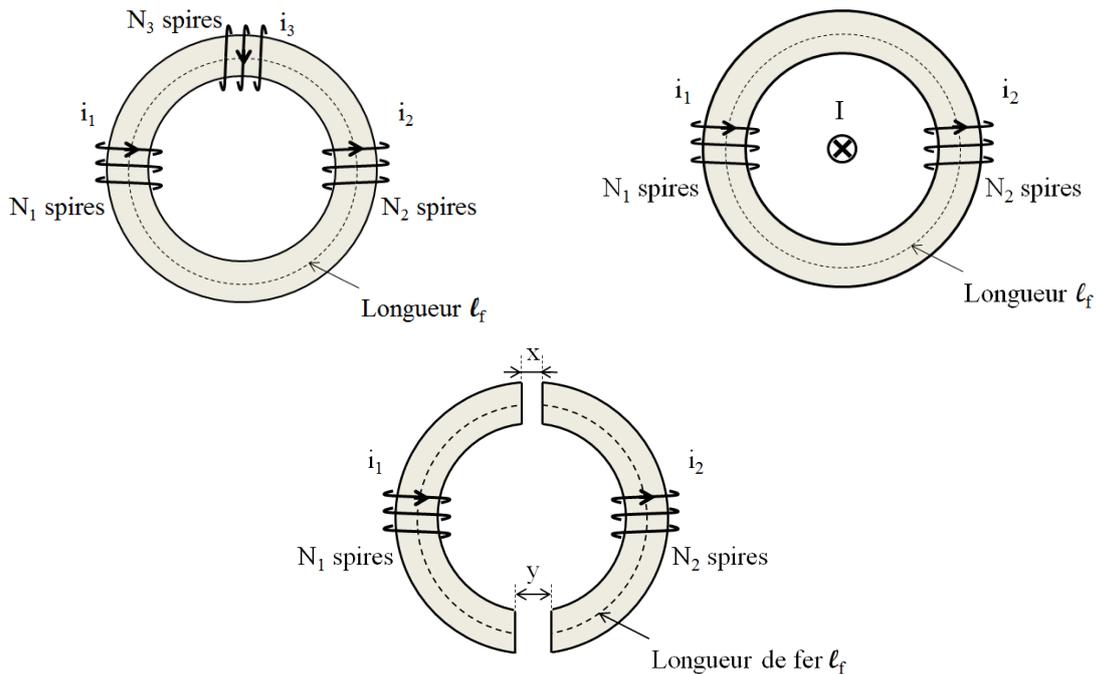


Figure 6

Exercice 2 : Calcul du champ magnétique

Appliquer aux circuits ci-dessous, le théorème d'Ampère.

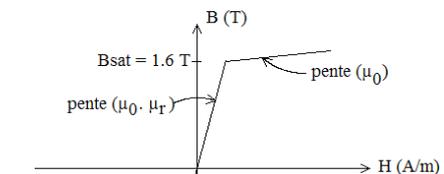
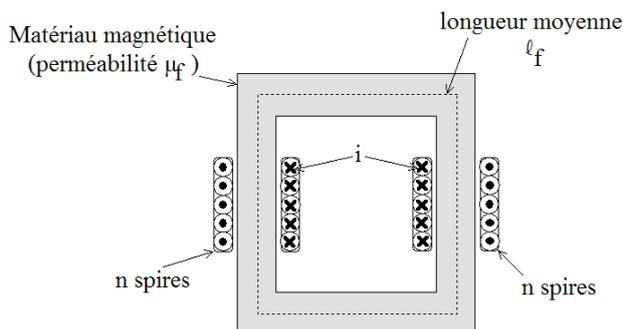


Exercice 3 : Champ et aimantation

Circuit magnétique 1 (application au transformateur, disjoncteur différentiel...)

On étudie un circuit magnétique constitué d'un cadre en fer sur lequel se trouvent deux bobinages parcourus par le même courant (i) et comportant un nombre de spires identique (n). On donne les caractéristiques suivantes :

- Perméabilité relative du fer : $\mu_r = 5000$ (dans sa partie linéaire)
- Longueur moyenne de fer : $l_f = 40$ cm
- Nombre de spires : $n = 50$
- Courant : $i = 1$ A



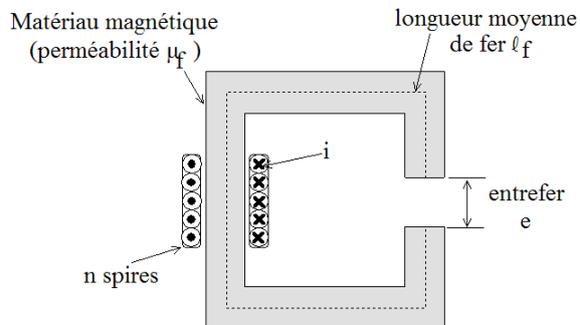
Représentation simplifiée de la caractéristique magnétique du matériau

1. Représenter les lignes de champ magnétique.
2. Calculer la valeur du champ magnétique dans le fer.
3. En déduire la valeur de l'induction dans le fer.
4. Placer le point de fonctionnement sur la caractéristique magnétique.
5. Pour un courant i deux fois plus important (2A), estimer la valeur de l'induction correspondante.

6. Si les courants dans les deux bobinages sont maintenant de signes opposés. Que vaut le champ dans le fer ?

Circuit magnétique 2 (Application aux inductances...)

On étudie le circuit magnétique avec entrefer comme ceux utilisés pour la réalisation d'inductances. On donne les caractéristiques suivantes :



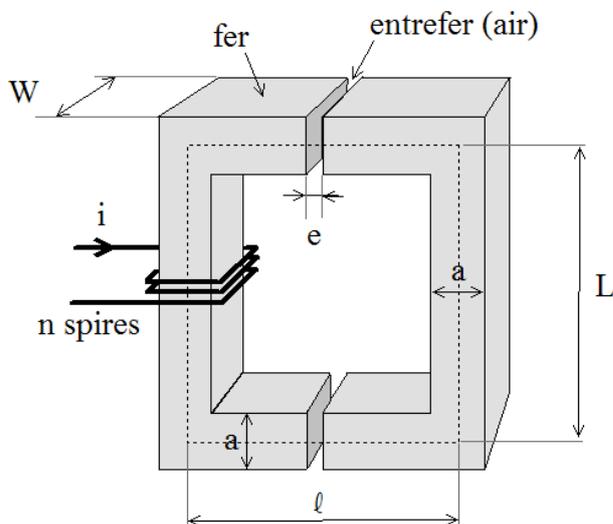
- Perméabilité relative du fer : $\mu_r = 5000$
- Longueur moyenne de fer : $\ell_f = 40 \text{ cm}$
- Épaisseur d'entrefer : $e = 2 \text{ mm}$
- Nombre de spires : $n = 50$
- Courant : $i = 10 \text{ A}$

1. Représenter les lignes de champ magnétique.
2. Appliquer le théorème d'Ampère sur le contour défini par la ligne moyenne de champ.
3. Quelle relation lie le flux magnétique dans le fer au flux magnétique dans l'entrefer ?
4. En déduire la relation entre l'induction dans le fer et l'induction dans l'entrefer.
5. Calculer la valeur de l'induction dans le circuit magnétique.

Exercice 4 : Circuit magnétique pour inductance

On réalise une inductance à partir du circuit magnétique ci-dessous. Celui-ci comporte deux entrefers d'épaisseur e . On donne les caractéristiques suivantes :

- Perméabilité relative du fer : $\mu_r = 5000$
- Nombre de spires : $n = 548$



Dimensions géométriques

- $e = 2\text{ mm}$
- $W = 2\text{ cm}$
- $a = 2\text{ cm}$
- $l = 5\text{ cm}$
- $L = 8\text{ cm}$

Hypothèse 1 :

On approximera $(l - e)$ par l

Hypothèse 2 :

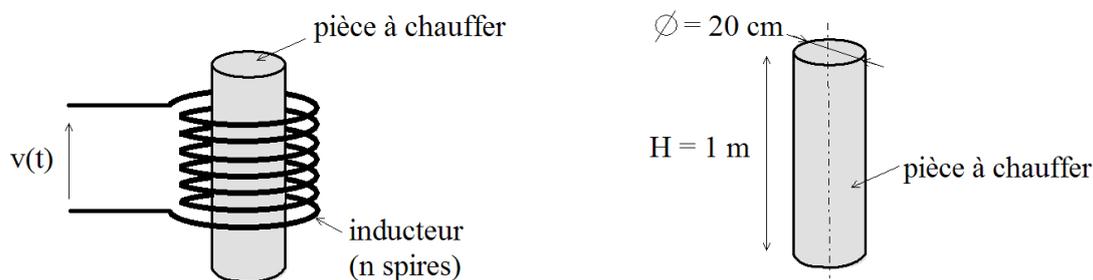
Pas de fuites magnétiques et pas de dispersion des lignes de champ dans l'entrefer

1. Appliquer le théorème d'Ampère sur le contour défini par la ligne moyenne de champ.
2. Exprimer la relation entre l'induction dans le fer et l'induction dans l'entrefer
3. Pour une induction de $1,7\text{ T}$, calculer l'énergie magnétique stockée dans le fer (on approximera le volume de fer par la valeur $2 \cdot (L+l) \cdot (a \cdot W)$).
4. Toujours pour $1,7\text{ T}$, calculer l'énergie magnétique stockée dans les deux entrefers.
5. Conclure sur la valeur de l'énergie magnétique stockée dans l'ensemble du circuit magnétique (fer + entrefer).
6. Calculer la valeur des ampères-tours à fournir pour obtenir une induction de $1,7\text{ T}$ dans le circuit magnétique.
7. Combien faudrait-il d'ampères-tours pour un matériau de perméabilité relative $\mu_r = 500$. Conclure ?
8. En déduire la valeur de l'inductance ainsi réalisée (considérer le cas où $\mu_r = 5000$).

Exercice 5 : chauffage par induction

Un dispositif de chauffage par induction comporte un bobinage (appelé inducteur) alimenté en alternatif par une tension sinusoïdale d'expression :

$$v(t) = V_M \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \quad \text{avec} \quad V_M = 3000 \cdot \sqrt{2} \text{ Volts}$$



La pièce à chauffer, placée au centre du bobinage, est un acier de perméabilité relative supposée constante $\mu_r = 2000$.

1. Rappeler quels types de pertes existent dans un matériau ferromagnétique soumis à un champ magnétique variable.

Si on considère la température homogène dans la pièce à chauffer, l'élévation de température de la pièce en mode de convection naturelle est donnée par la relation :

$$\Delta\theta = \frac{\text{pertes}}{h \cdot S_{th}}$$

avec :

$h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (coefficient d'échange thermique)

S_{th} : la surface d'échange thermique. On prendra $S_{th} = 0.7 \text{ m}^2$.

2. On souhaite chauffer la pièce à $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. La température extérieure étant de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, quelle doit être la puissance de chauffe ?

Les pertes volumiques sont approximées par le modèle suivant : $p(\text{W/m}^3) = 1,3 \cdot (B_{\text{eff}} \cdot f)^2$, où B_{eff} représente l'induction efficace dans la pièce.

3. On souhaite avoir, dans le matériau, une induction efficace $B_{\text{eff}} = 1,3 \text{ T}$. Quelle doit être alors la fréquence de la source d'alimentation ?

4. En déduire la valeur du flux efficace φ_{eff} dans la pièce à chauffer.

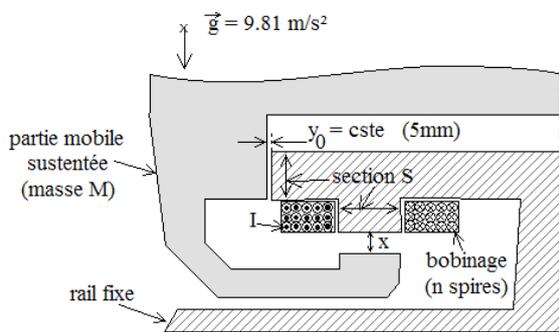
5. Rappeler l'expression liant ce flux à la tension aux bornes du bobinage dans le cas où l'on néglige les fuites magnétiques et la résistance du bobinage.

6. En déduire le nombre de spires n de l'inducteur ?

7. Proposer un modèle électrique équivalent à l'ensemble du système de chauffage par induction.

Exercice 6 : Sustentation magnétique

On étudie le principe de la sustentation magnétique appliqué au train Transrapid allemand. Une rame est constituée de 3 blocs de 60 tonnes chacun. Chaque bloc étant sustenté par quatre cellules telles que celle représentée par la figure ci-après.



Circuit magnétique utilisé pour la sustentation du train
(Une des quatre cellules élémentaires)



Train à sustentation magnétique
(Transrapid allemand)

On supposera, dans cet exercice que :

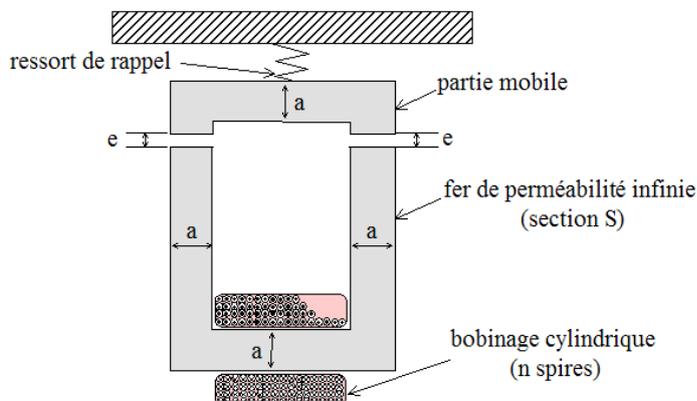
- le guidage est parfait et que l'entrefer radial y_0 est constant
- le fer est de perméabilité infinie.

1. Représenter les lignes de champ magnétique.
2. Expliquer simplement le principe de la sustentation appliqué au circuit magnétique
3. Appliquer le théorème d'Ampère sur le contour défini par la ligne moyenne de champ.
4. En déduire l'expression de l'induction dans l'entrefer d'épaisseur x en fonction de la force magnétomotrice du bobinage.
5. Calculer le nombre d'Ampère-tours nécessaires pour obtenir une induction dans l'entrefer de 1,8 T lorsque les deux entrefers sont égaux $y_0 = x = 5$ mm.
6. Donner l'expression de l'énergie magnétique totale stockée dans le circuit magnétique en fonction du produit $(n.I)$.
7. Rappeler la relation liant la force à l'énergie magnétique dans le cas où seule la grandeur x est variable.
8. En déduire l'expression de la force en fonction de x .
9. Pour un entrefer x de 5 mm, quelle doit être la section du circuit magnétique pour assurer la sustentation du train.

Exercice 7 : Actionneur électromagnétique (électroaimant)

On étudie ici, le principe de l'électroaimant (figure ci-dessous). Celui-ci est constitué d'une partie fixe (circuit en U) et d'une partie mobile. Au repos, lorsque la bobine n'est pas alimentée, le ressort de rappel exerce une force (vers le haut) de 4N.

On fera l'hypothèse suivante : **le fer est de perméabilité infinie**



Dimensions géométriques

- $a = 1 \text{ cm}$
- $e = 3 \text{ mm}$
- $S = a^2$

On rappelle l'expression de la force d'origine magnétique entre deux surfaces S séparées d'un entrefer e où règne une induction magnétique B :

$$F = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \cdot S$$

1. Que peut-on dire de la relation entre l'induction dans le fer et l'induction dans les deux entrefers ?
2. Pour une intensité de l'effort magnétique égale à dix fois l'effort de rappel du ressort, calculer la valeur de l'induction nécessaire dans le circuit magnétique.
3. Calculer le nombre de spires nécessaires si on limite le courant dans la bobine à 5A.

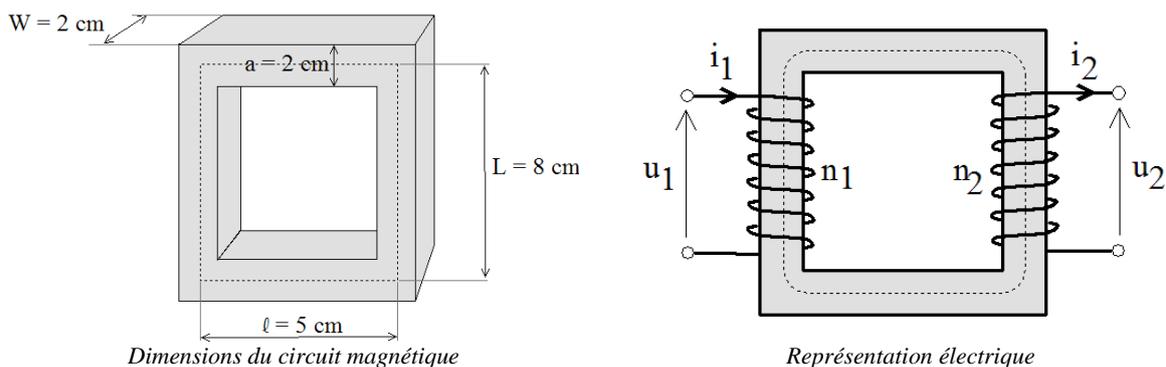
Exercice 8 : Transformateur monophasé

On étudie le principe de fonctionnement d'un transformateur monophasé. On donne :

- $\mu_r = 5000$: la perméabilité relative du fer
- $n_1 = 2000$: le nombre de spires du bobinage primaire

Hypothèses :

- Circuit magnétique sans fuites magnétiques et sans pertes
- Circuit électrique parfait (bobinages de résistance nulle)



1. Sur la figure ci-dessus, les flux du primaire et du secondaire, sont-ils additifs ou soustractifs ?
2. Appliquer le théorème d'Ampère sur le contour défini par la ligne moyenne de champ.
3. Que devient la relation obtenue précédemment si la perméabilité relative du fer est infinie ?

Transformateur en fonctionnement à vide

4. Qu'appelle-t-on fonctionnement à vide ?

On donne l'expression de la tension primaire : $u(t) = U \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega \cdot t)$.

Avec :

$$U = 240\text{V} \quad \text{et} \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

5. Calculer l'expression du flux magnétique dans le circuit magnétique.
5. En déduire la valeur maximale et la valeur efficace du flux.
6. Calculer l'expression de la tension dans le secondaire du transformateur.
7. Calculer le nombre de spires n_2 nécessaire pour obtenir une tension efficace au secondaire de 24V.

Exercice 9 : Transformateur monophasé de forte puissance

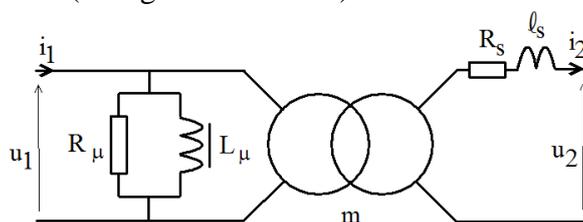
On dispose d'un transformateur monophasé (50 Hz) dont la plaque signalétique porte les indications suivantes :

Puissance apparente : $S = 230 \text{ kVA}$
Tension primaire : $U_1 = 20 \text{ KV}$
Tension secondaire : $U_2 = 410 \text{ V}$
Tension de court-circuit : $U_{1cc} = 4\% \text{ de } U_1$.

D'autre part, une série de mesures a donné les résultats suivants :

Puissance absorbée à vide : $P_0 = 1007 \text{ W}$
Courant absorbé à vide : $I_{10} = 0,46 \text{ A}$
Puissance absorbée en CC : $P_{cc} = 538 \text{ W}$

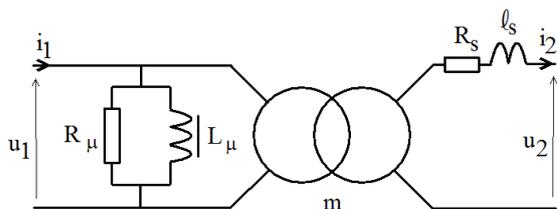
On souhaite, à partir de ces données, identifier les paramètres du modèle électrique équivalent au transformateur (cf. figure ci-dessous).



1. Rappeler la signification de chacun des éléments du modèle équivalent.
2. Calculer le rapport de transformation.
3. Calculer la valeur efficace nominale du courant secondaire.
4. Calculer R_μ et X_μ ($X_\mu = L_\mu \cdot \omega$).
5. Calculer R_s et l_s .
6. Déterminer la chute de tension dans le secondaire du transformateur lorsque celui-ci alimente une charge inductive absorbant le courant nominal avec un facteur de puissance de 0,8.
7. Que vaut alors le rendement du transformateur.

Exercice 10 : Transformateur monophasé

On donne le modèle électrique équivalent d'un transformateur monophasé (50 Hz) suivant :



Avec :

$$R_{\mu} = 2,13 \text{ k}\Omega$$

$$L_{\mu} = 404 \text{ mH}$$

$$R_s = 48 \text{ m}\Omega$$

$$l_s = 0,598 \text{ mH}$$

La plaque signalétique nous donne également les indications suivantes :

- Tension primaire : $U_1 = 381 \text{ V}$
- Tension secondaire à vide : $U_{20} = 160 \text{ V}$
- Puissance apparente : $S = 11,4 \text{ kVA}$

1. Calculer la valeur des courants nominaux, au primaire et au secondaire.
2. Calculer la valeur de la composante active du courant magnétisant.
3. Calculer la valeur de la composante réactive du courant magnétisant.
4. Calculer la valeur des pertes fer pour une alimentation sous 381 V.
5. Pour un essai en court-circuit sous la tension nominale, quelle serait la valeur du courant au secondaire du transformateur ? Conclusion ?
6. Quelle tension primaire doit-on appliquer lors de l'essai en court-circuit ?