

Transformateur monophasé

Version papier téléchargeable

Table des matières

I - Objectifs	3
II - Principe	4
III - Matériel	7
IV - Manipulations	20
1. 2.1 Mesures préliminaires.....	20
2. 2.2 Transformateur à vide ($I_2 = 0$).....	20
3. 2.3 Transformateur en charge	21
4. 2.4 Mesure du cycle d'hystérésis	22
V - Manipulations virtuelles	24
1. Etude du transformateur à vide	24
1.1. Etude de la tension au secondaire en fonction de la tension primaire	24
1.2. Perte fer pour une tension d'entrée égale à 150V	24
2. Etude du transformateur en charge.....	24
3. Mesure du cycle d'hystérésis.....	24
3.1. Cas du circuit magnétique en fer doux plein	25
3.2. Cas du circuit magnétique en fer doux lamellé	25
VI - Bibliographie	26
VII - Crédits	27

Objectifs



[cf. Objectifs]

Il s'agit d'étudier le principe de fonctionnement du transformateur monophasé et de mettre en évidence les différentes sources de pertes liées à la présence d'un noyau de fer.

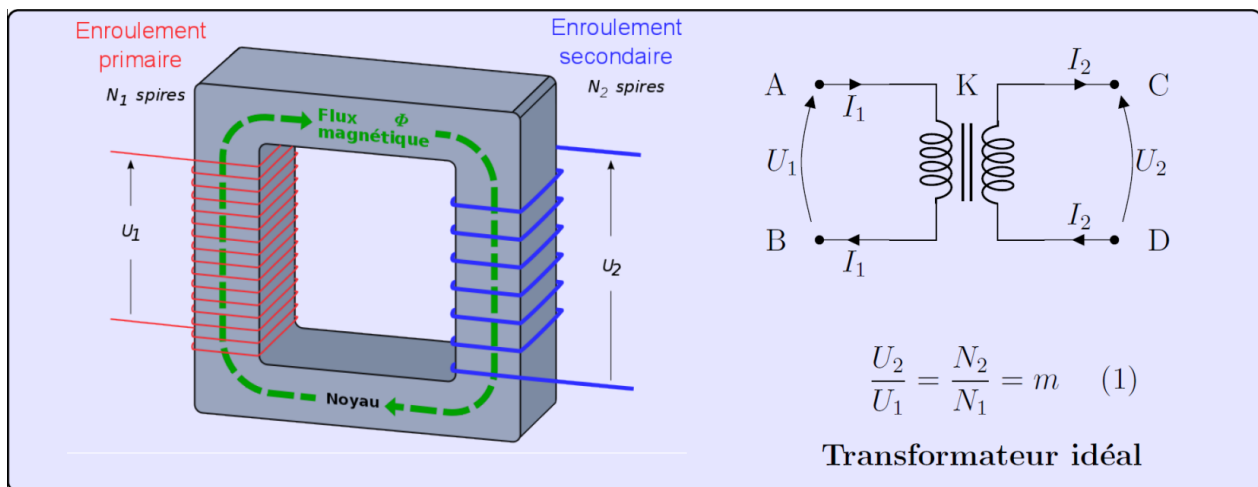
Seront notamment étudiés :

- le cycle d'hystérésis lié à l'aimantation du noyau métallique,
- les pertes fer,
- le rapport de transformation en tension et en courant.



Principe

Le transformateur est un dispositif électrique constitué de 2 circuits indépendants couplés par champ magnétique. Un schéma de ce dispositif est représenté sur la Fig. 1. Le circuit primaire (noté avec l'indice 1) est constitué de N_1 spires enroulées autour d'un noyau métallique qui sert d'une part à amplifier le champ magnétique créé par l'enroulement primaire, et d'autre part à canaliser les lignes de champ vers l'enroulement secondaire (noté avec l'indice 2). Ce dernier est constitué de N_2 spires.



Le transformateur idéal est symbolisé sur la Fig. 1. Si l'on applique une tension sinusoïdale U_1 aux bornes du bobinage primaire, une tension alternative U_2 est mesurée aux bornes du secondaire. Elle vérifie la relation (1) où m est appelé rapport de transformation.

L'étude du transformateur réel est bien plus compliquée. En effet, plusieurs phénomènes sont à prendre en compte :

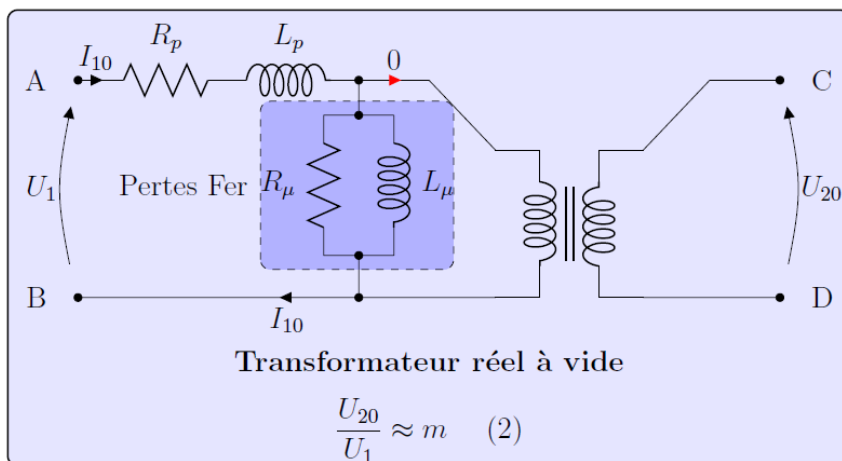
1. La résistance des circuits primaire et secondaire (notés respectivement R_p et R_s),
2. Les pertes liées à l'apparition de courants de Foucault dans le noyau de fer (courants induits),
3. La réponse non-linéaire de l'aimantation du noyau de fer (phénomène d'hystérésis),
4. Un couplage imparfait entre les bobines lié au flux de fuite.

Tous ces phénomènes se traduisent par des pertes. Les points 1 et 2 participent à l'échauffement du transformateur. Le point 3 (hystérésis) se traduit par une distorsion du signal sinusoïdal. Cependant, on peut montrer que les tensions primaire et secondaire à vide sont toujours dans le rapport de transformation m .

1.1 Transformateur à vide

Le circuit primaire d'un transformateur dont le secondaire est en circuit ouvert ($I_2 = 0$) se comporte comme une bobine à noyau de fer. En faisant l'hypothèse d'un courant primaire sinusoïdal, on peut montrer que le schéma électrique équivalent est celui de la Fig. 2 où R_μ et L_μ permettent de tenir compte des phénomènes d'**hystérésis** et de la présence des **courants de Foucault**.

Un courant I_{10} non-nul circule ainsi dans le circuit primaire lorsqu'une tension U_1 lui est appliquée, et ce lorsque $I_2 = 0$. Ce courant I_{10} contribue à ce que l'on appelle les Pertes de Fer P_{fer} . Elles seront évaluées durant le TP en utilisant un circuit simplifié dans l'hypothèse de Kapp de la figure 4.

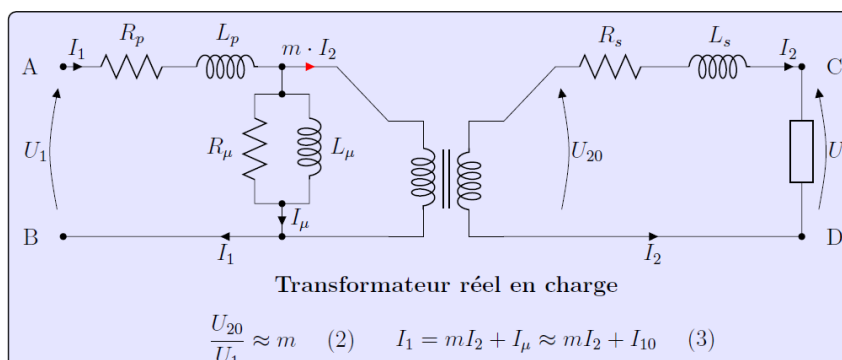


1.2 Transformateur en charge

Lorsqu'un courant I_2 non-nul circule dans le secondaire, celui-ci crée un champ magnétique qui se couple avec le circuit primaire. Au schéma équivalent du transformateur à vide vient s'ajouter l'influence des éléments du secondaire. Le circuit équivalent est celui de la figure 3. Le courant correspondant aux pertes fer I_μ a tendance à saturer et correspond approximativement à celui mesuré lorsque le secondaire est ouvert ($I_\mu = I_{10}$).

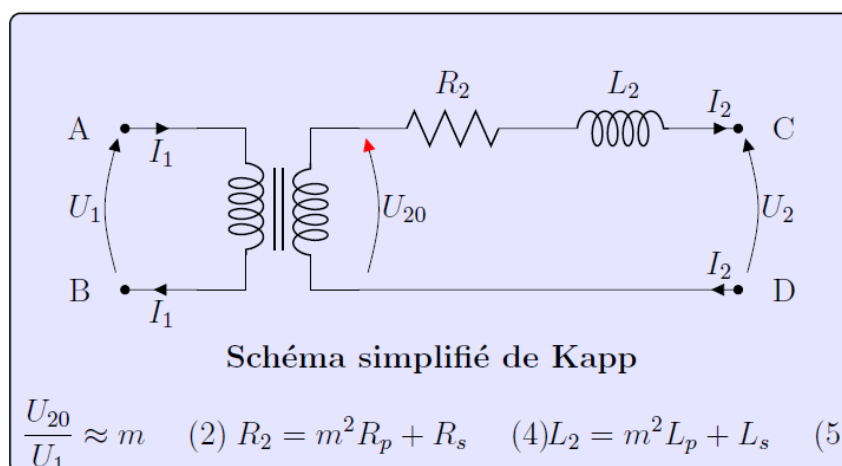
1.3 Circuit simplifié dans l'hypothèse de Kapp

Les tensions primaire et secondaire **à vide** sont proportionnelles : elles sont dans le rapport de transformation m . En ce qui concerne les courants, le courant I_μ intervient. Cependant, ce courant est en général **négligeable**. L'hypothèse de Kapp revient à négliger ce courant, si bien que les courants I_1 et I_2 sont également proportionnels (le rapport de proportionnalité étant m).



De plus, il est possible encore de simplifier le schéma du transformateur en ramenant tous les défauts à un circuit RL série au secondaire.

Dans ce cas, on peut montrer que le secondaire se comporte comme une source de tension de f.e.m. $U_{20} = m \cdot U_1$ en série avec une résistance $R_2 = R_s + m^2 \cdot R_p$ et une inductance $L_2 = L_s + m^2 \cdot L_p$ (Fig. 4). **C'est ce dernier circuit qui sera utilisé dans la suite.**



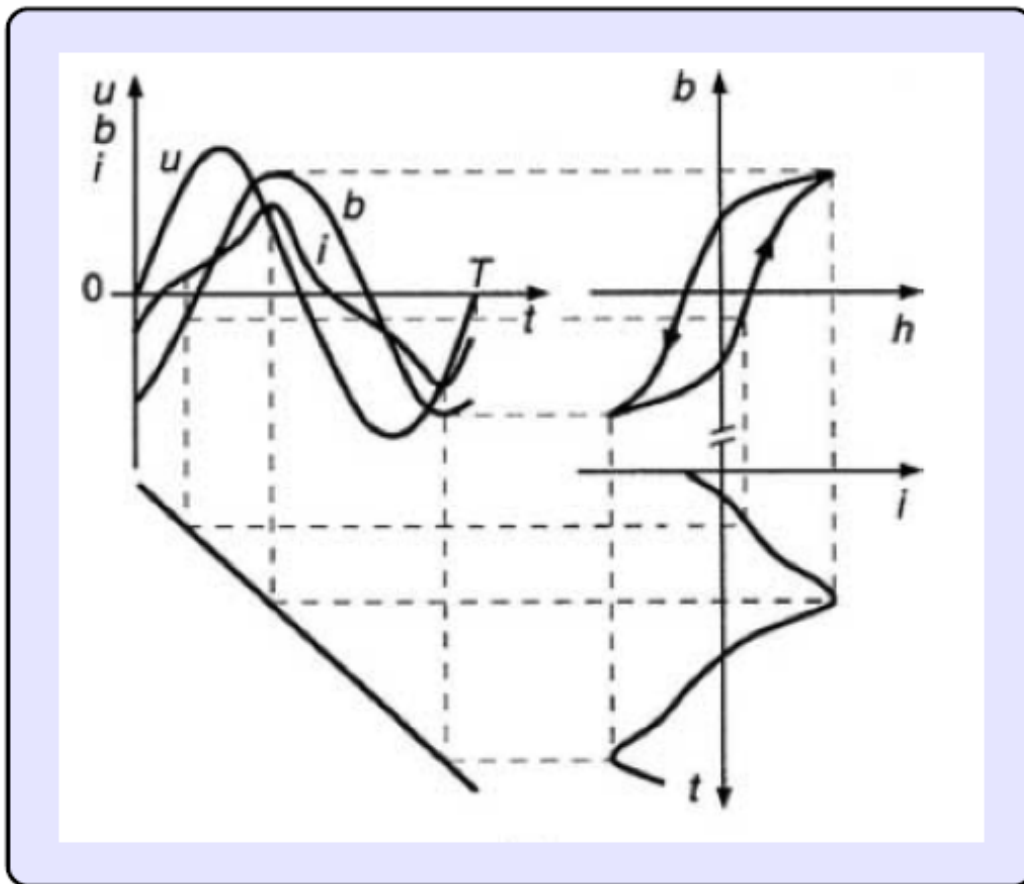
1.4 Hystérésis magnétique

Sous l'effet d'un champ magnétique excitateur \vec{H} créé par l'enroulement primaire, le noyau de fer (réalisé en ferrite ou en alliage ferromagnétique) réagit et crée son propre champ magnétique \vec{B} plus intense.

Ce champ résulte de l'orientation de micro-domaines magnétiques présents dans le milieu lui-même. \vec{B} n'est ainsi plus une fonction linéaire de \vec{H} car une fois les domaines orientés, le champ sature.

D'autre part, le milieu lui-même peut devenir magnétique (les micro-domaines conservent une certaine orientation permanente) même lorsque \vec{H} redevient nul. Cet effet s'appelle l'**hystérésis magnétique**. C'est par exemple ce phénomène qui est utilisé pour sauvegarder les données numériques sur un support magnétique tel un disque dur.

La figure 5 représente une courbe typique d'hystérésis magnétique. Sur cette figure, on peut voir par exemple que pour un champ excitateur nul, deux champs magnétiques \vec{B} sont possibles (positifs ou négatifs). **Le champ dans le matériau dépend donc de l'histoire de celui-ci.** On comprend donc tout de suite que si le champ excitateur est alternatif, le champ total \vec{B} présent dans le noyau de fer sera déphasé et pourra saturer, ce qui entraînera une distorsion du signal créé dans le secondaire comme représenté sur la Fig. 5.



Matériel

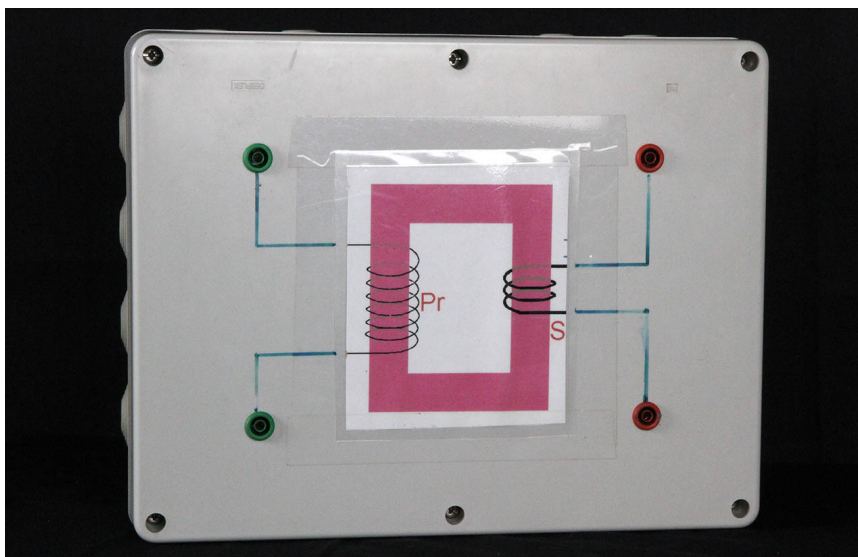


Transformateur à vide ou en charge

Vous disposez :



d'une alimentation 0-220V réglable



d'un transformateur



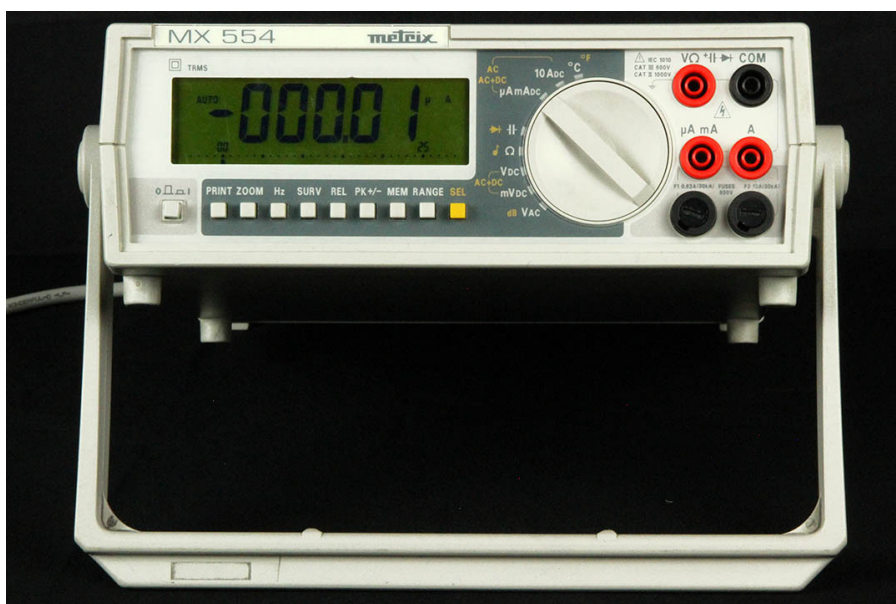
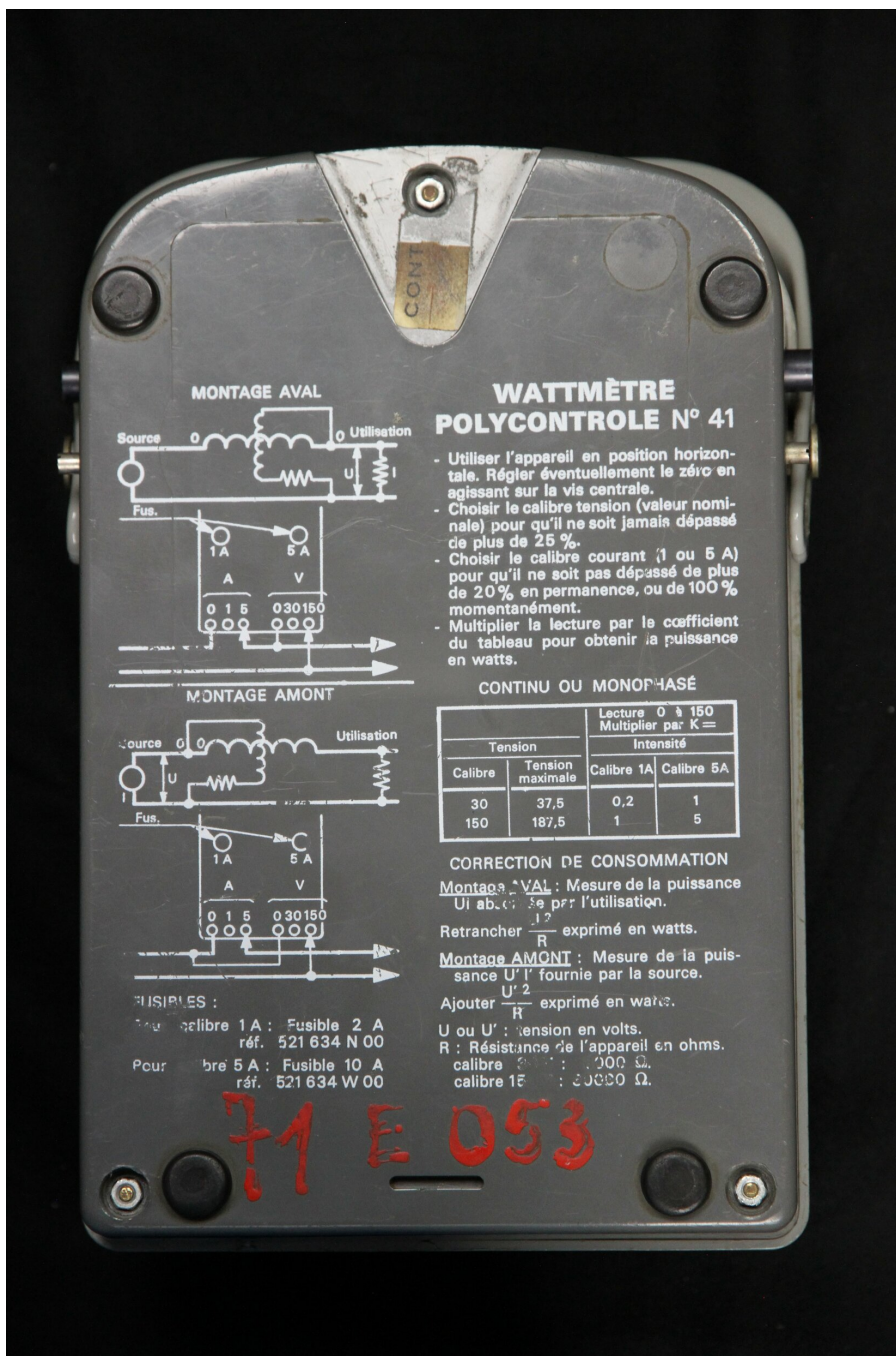
d'un ampèremètre



d'un voltmètre



d'un wattmètre dont les caractéristiques sont les suivantes :



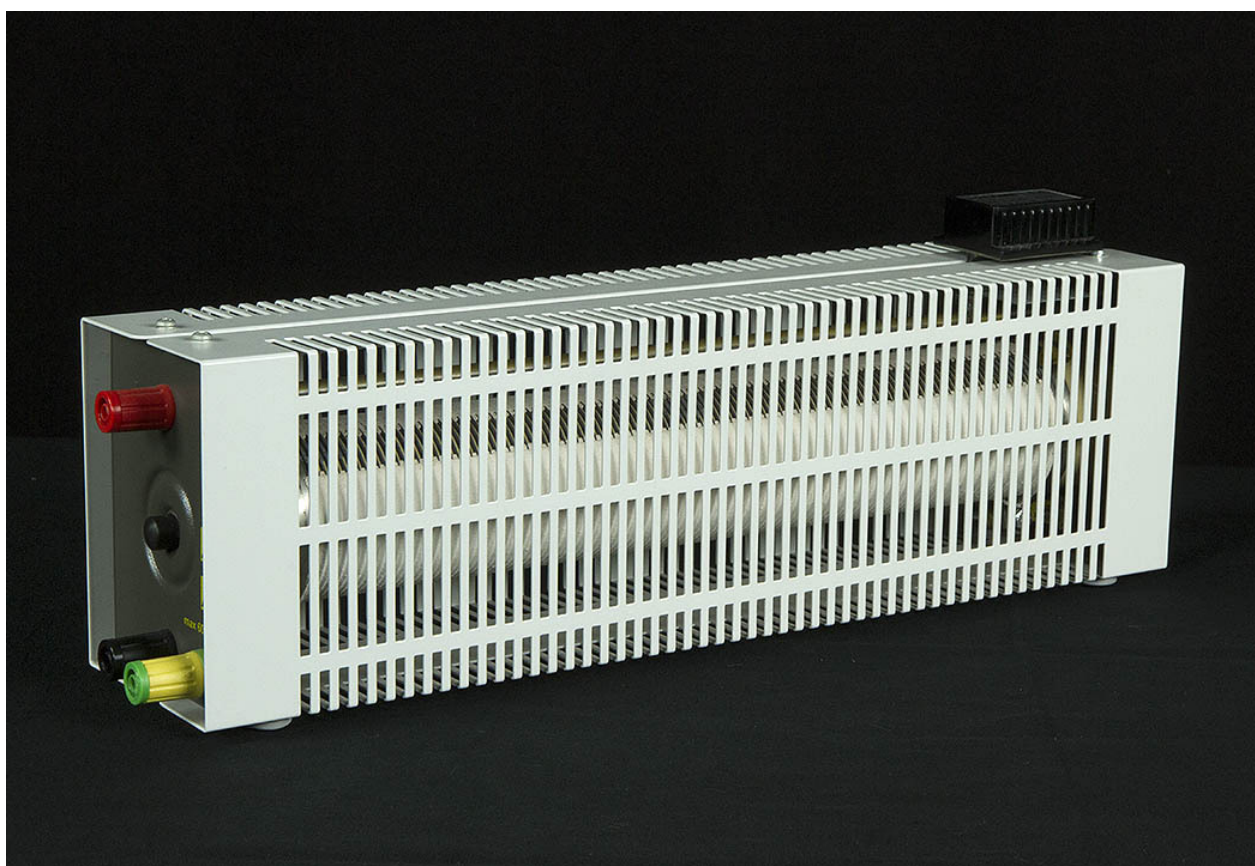
d'un multimètre

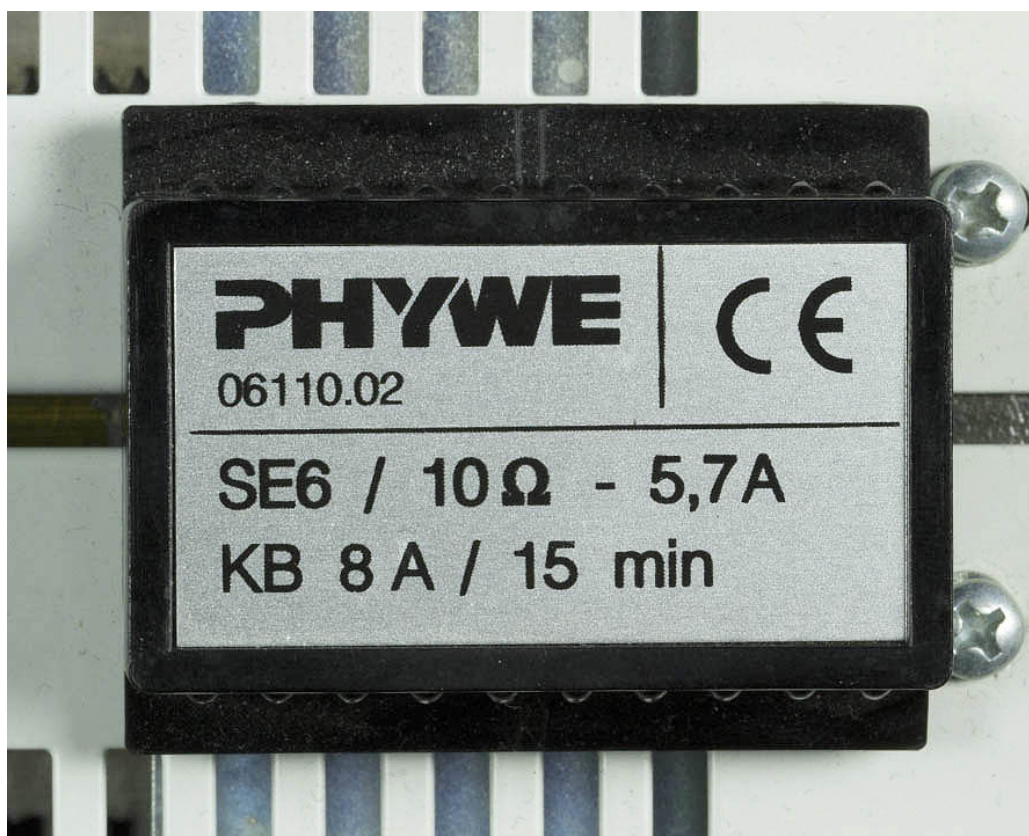
Cycle d'hystérésis

Vous disposez :

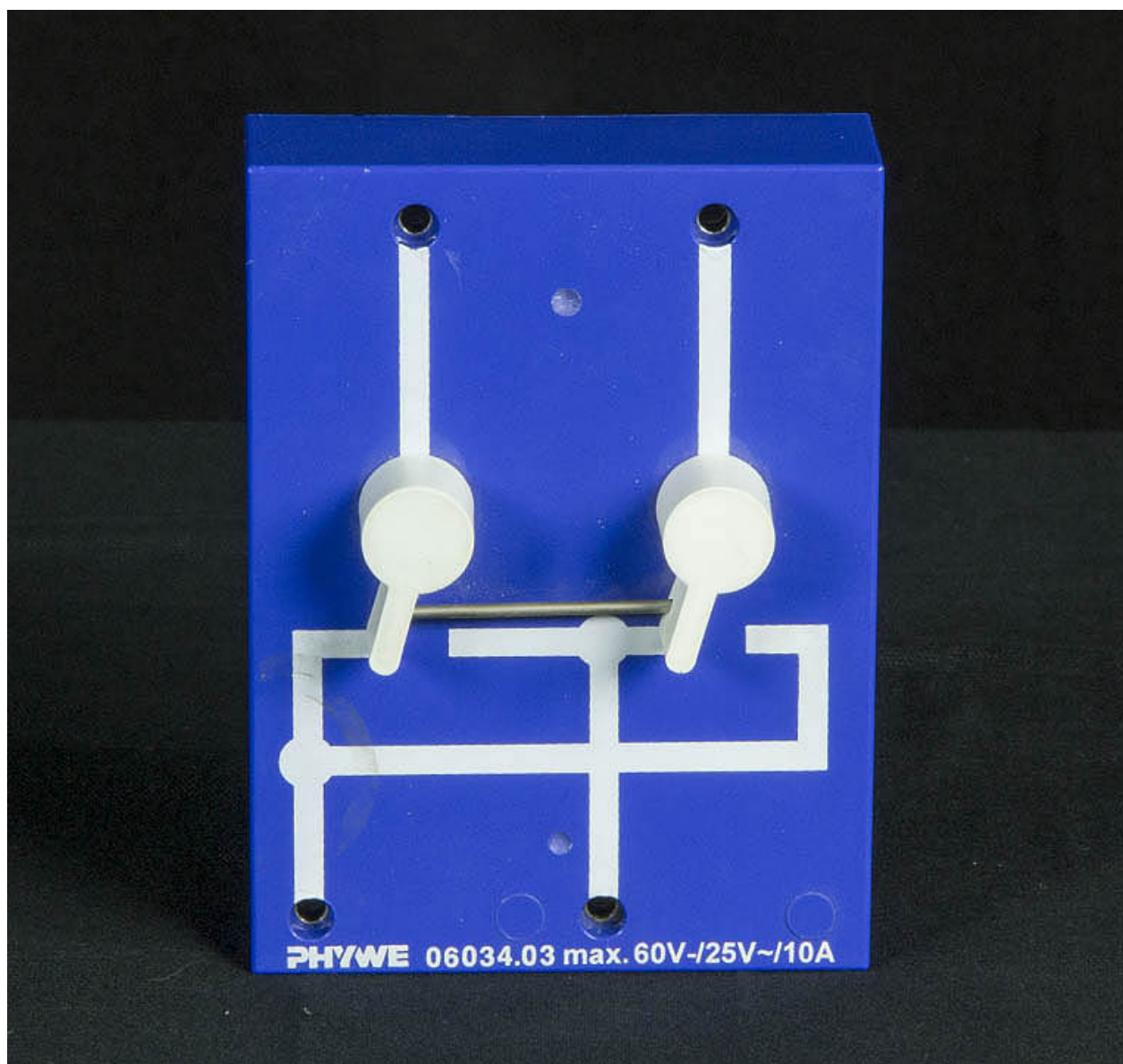


une alimentation continue 0-18V 5A



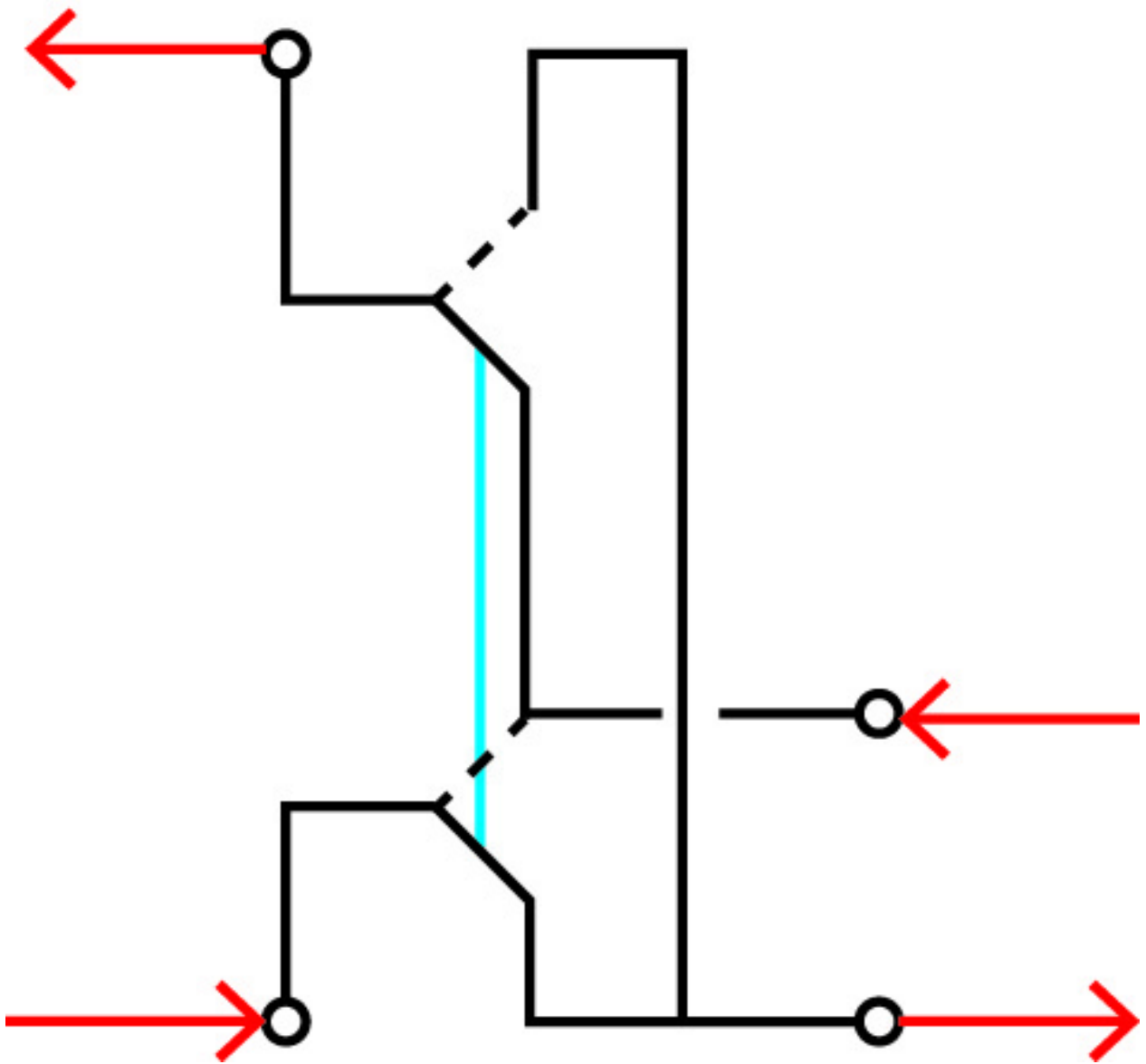


un réostat 0-10 Ohms réglé sur 10 Ohms

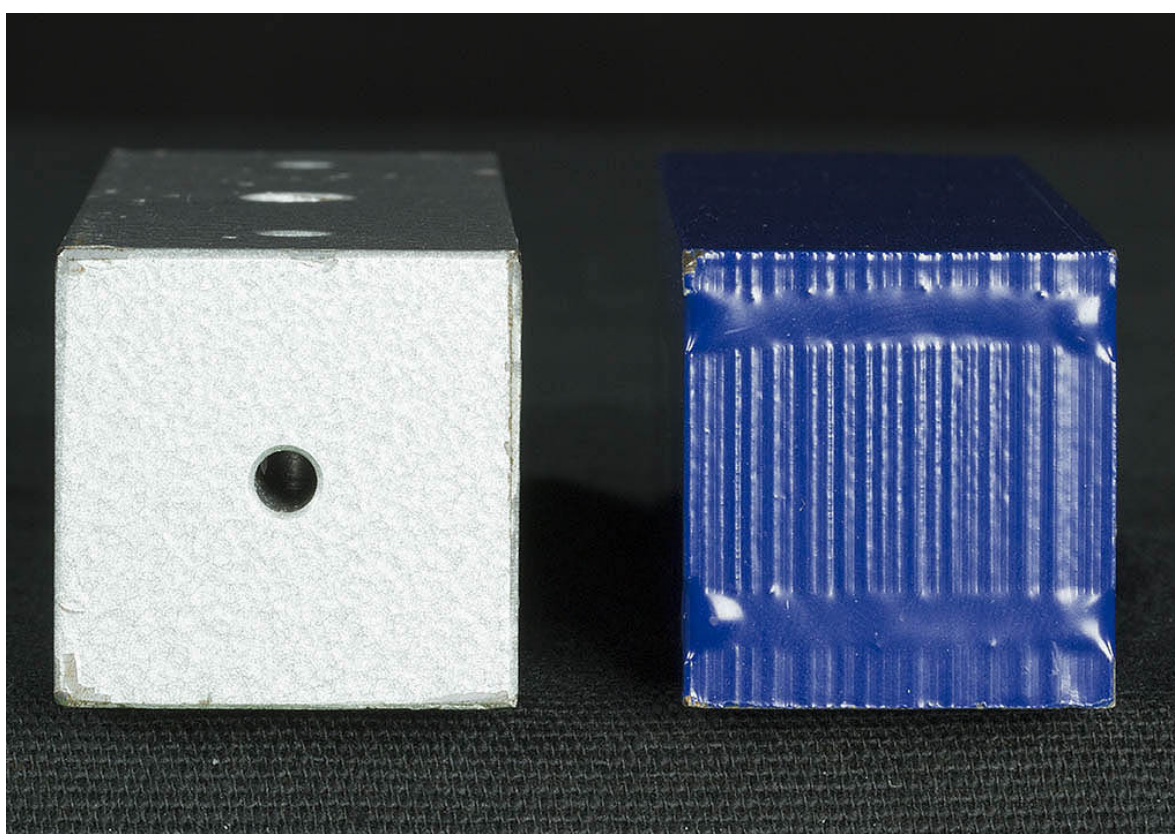
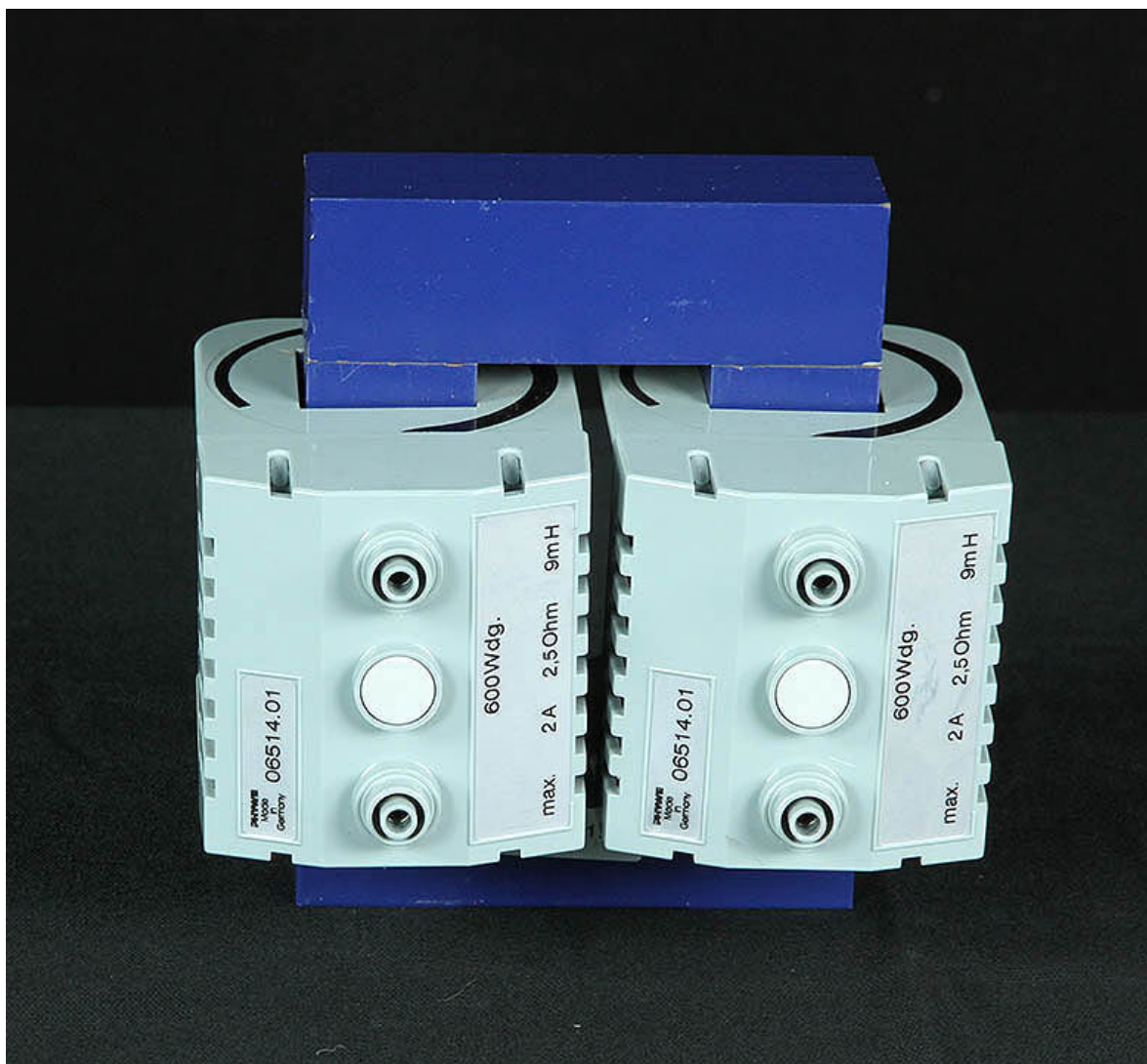


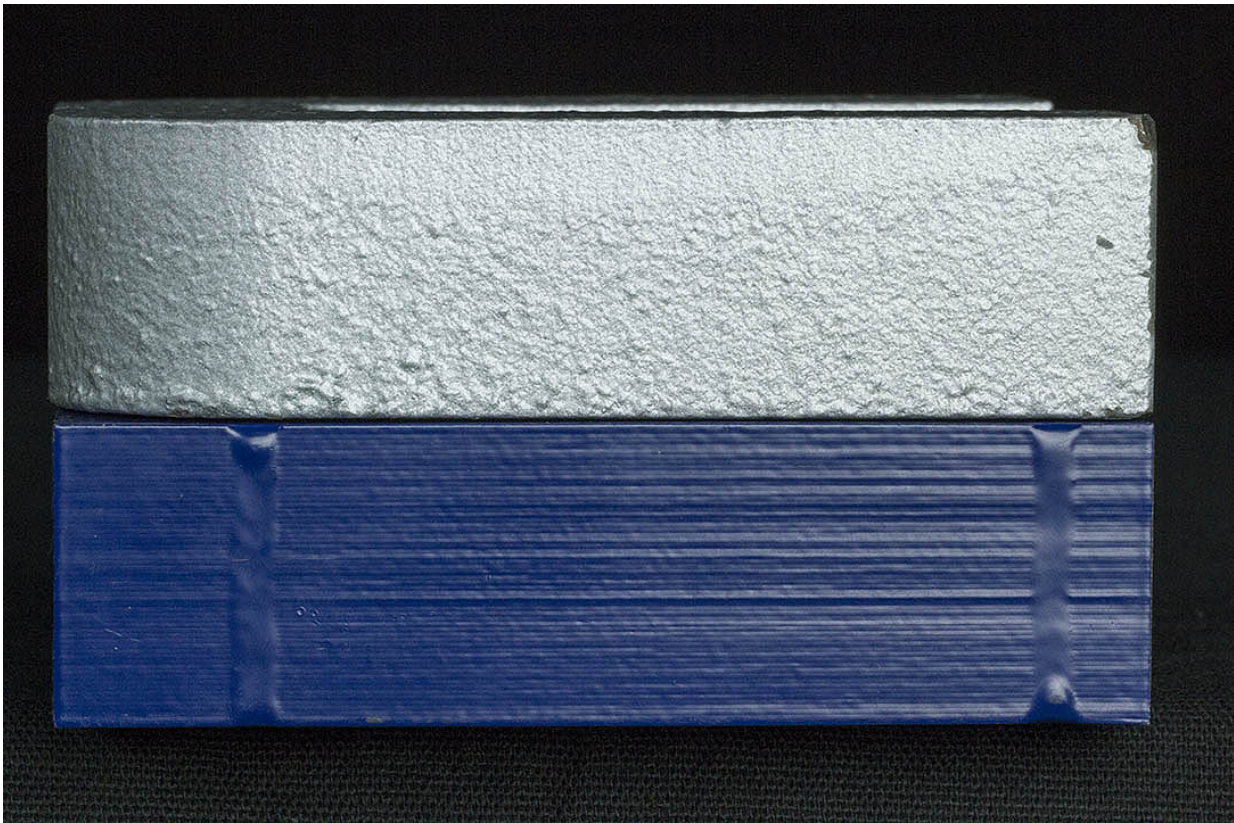
un inverseur qui permet de changer le sens du courant suivant le schéma suivant :

inverseur

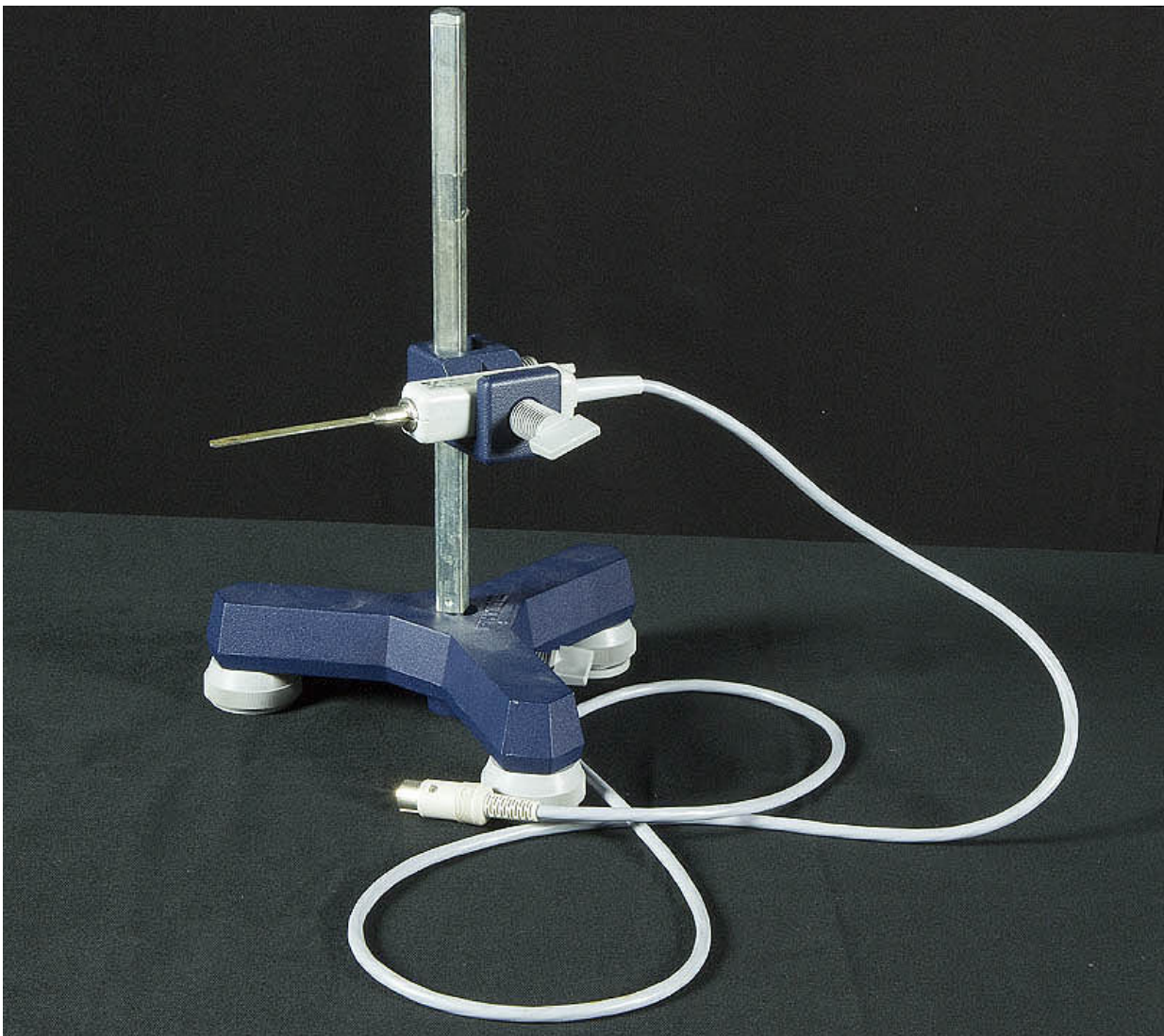


2 bobines de 600 spires 2,5 Ohm 9 mH traversées par un circuit magnétique que l'on peut fermer à l'aide d'un barreau :

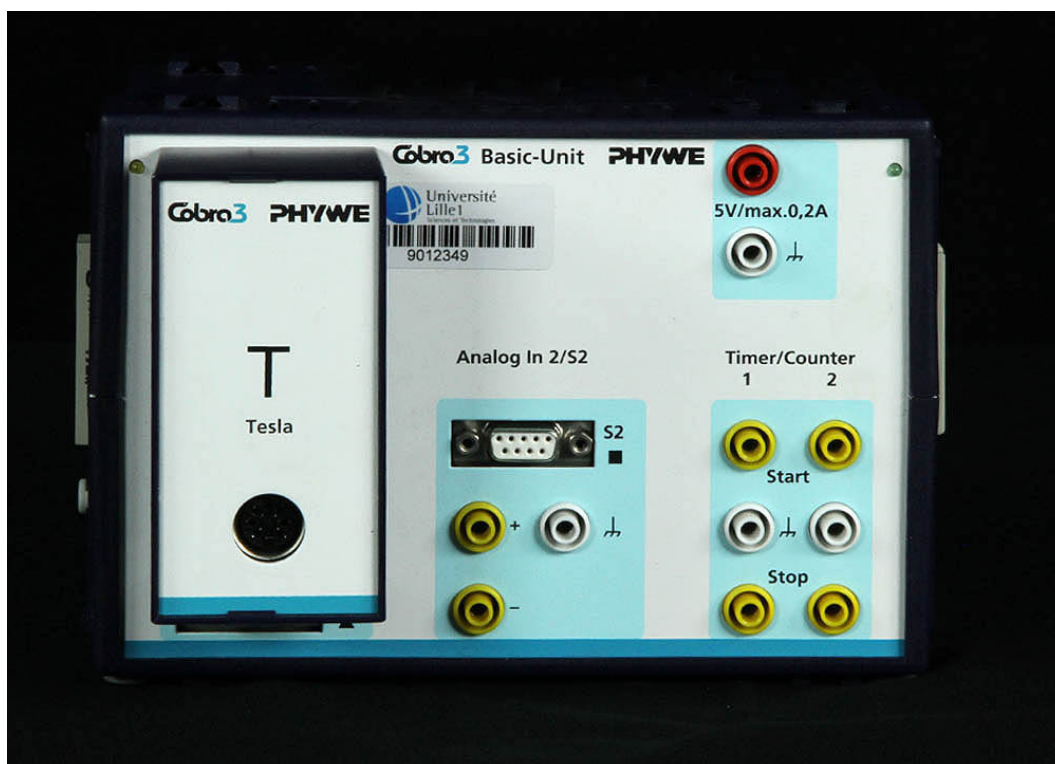




Les deux circuits magnétiques se différencient par le fait que l'un est en fer doux plein tandis que l'autre (de couleur bleu) est lamellé.



une sonde de tesla reliée à une interface :



elle-même relié par les ports USB à un ordinateur.

Manipulations



1. 2.1 Mesures préliminaires



ATTENTION :



Compte tenu des courants mis en jeu lors de ce TP, Vous devez **ABSOLUMENT appeler l'enseignant** avant toute mise sous tension du montage pour vérification.

Avant tout branchement, mesurer à l'ohmmètre les résistances R_p et R_s des bobinages primaires et secondaires.

Résistances	Valeurs (Ω)
R_p	
R_s	

[cf. objectifs du transformateur à vide]

2. 2.2 Transformateur à vide ($I_2 = 0$)

L'objectif est de déterminer :

- le rapport de transformation m
- l'évolution de l'intensité du courant électrique I_{10} en fonction de U_1
- d'estimer les pertes fer P_{fer} , et donc les valeurs de R_μ et L_μ grâce aux relations suivantes :

$$P_{fer} = \frac{U_1^2}{R_\mu}$$

$$L_\mu = \frac{U_{10}^2}{P_{fer} \cdot \tan\phi_{10}}$$

[cf. manipulation concernant le transformateur à vide]

Protocole expérimental :

1. Connecter le primaire du transformateur avec le variac de tension réglable entre 0 V et 220 V efficaces. Mettre un voltmètre aux bornes du primaire et du secondaire. Ajouter un ampèremètre dans le primaire.
2. Pour 20 valeurs de la tension U_1 comprise entre 0 V et 220 V, mesurer U_{20} et I_{10} . Remplir le tableau.

$U_1(V)$	$U_{20}(V)$	$I_{10}(mA)$	$U_1(V)$	$U_{20}(V)$	$I_{10}(mA)$
10			110		
20			120		
30			130		
40			140		
50			150		
60			160		
70			170		
80			180		
90			190		
100			200		

- Tracer la courbe $U_{20} = f(U_1)$.
- Mesurer la pente de la droite.
- En déduire le rapport de transformation m .

Pente	Rapport m

- Tracer la courbe $I_{10} = f(U_1)$
- Commenter cette courbe.
- Ajouter un Wattmètre dans le circuit primaire. Mesurer pour la tension U_1 réglée à 150 V les pertes fer P_{fer} . En déduire le terme $\cos\phi_{10}$.

P_{fer} (W) à 150V	$\cos\phi_{10}$ à 150 V

- Déterminer les valeurs de R_μ et L_μ . Comparer R_μ à R_p . Conclusions?

R_μ à 150 V	L_μ à 150 V

- Mettre la tension du variac à 20 V, et l'éteindre.

[cf. mesure concernant le transformateur à vide avec wattmètre]

3. 2.3 Transformateur en charge

L'objectif est de déterminer pour une **tension primaire fixée à 150 V** :

- la valeur de la résistance R_2 du circuit équivalent dans l'approximation de Kapp (figure ci-dessous),
- la valeur de l'inductance L_2 .

La puissance dissipée en court-circuit dans le transformateur est maintenant :

$$P_{cc} = R_2 \cdot I_2^2 + P_{fer}$$

[cf. objectifs du transformateur en charge]

[cf. manipulation concernant le transformateur en charge]

Protocole expérimental :

1. Le circuit primaire est identique au montage précédent. Changer les calibres de l' ampèremètre pour qu'il puisse mesurer des ampères.

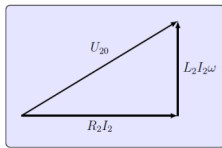
Connecter au secondaire l'interrupteur K ainsi qu'un second ampèremètre.

Retirer le voltmètre.

2. Mettre en marche le variac et le régler sur 150 V.
3. Fermer l'interrupteur K ($I_2 \neq 0$) pendant un bref instant et mesurer les grandeurs I_1, I_2, P_{cc} (puissance dissipée dans le transformateur).
4. Ouvrir l'interrupteur K et abaisser la tension du variac à 20 V, puis éteignez le.

Grandeurs	Valeurs à 150 V
I_1	
I_2	
P_{cc}	

5. En déduire la valeur de la résistance R_2 .
6. Grâce au diagramme de Fresnel à représenter à l'échelle, calculer L_2 .



7. La relation entre I_1 et I_2 est-elle vérifiée ?
8. Calculer théoriquement R_2 . Le comparer à la valeur expérimentale.

Grandeurs	Valeurs à 150 V
R_2 expérimental	
L_2 expérimental	
R_2 Théorique	

4. 2.4 Mesure du cycle d'hystérésis

Cette partie est consacrée à l'étude du cycle d'hystérésis dans le cas d'un noyau de fer doux, puis dans le cas d'un noyau de fer à lamelles.

Le montage expérimental est composé d'un transformateur dont le noyau peut être changé.

Une alimentation continue délivre une tension variable aux bornes des deux bobines reliées en série.

Ces deux bobines créent un champ magnétique \vec{H} proportionnel au courant I qui les traverse, et induit une magnétisation dans le noyau métallique.

Le champ magnétique résultant \vec{B} est mesuré à l'aide d'une sonde à effet Hall.

Les mesures sont enregistrées sur un PC.

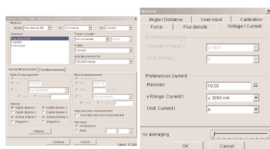
Un interrupteur permet d'inverser le sens du courant, et par conséquent le sens de \vec{H} afin de décrire la courbe d'hystérésis dans sa totalité

[cf. Manipulation sur le cycle d'hystérésis pour un noyau de fer doux et pour un noyau à lamelles]

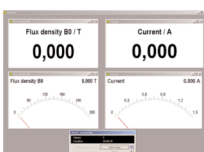
[cf. Positionnement de la sonde de tesla par rapport au circuit magnétique]

Protocole expérimental :

1. Lancer le logiciel "Measure", cliquer sur "Starts a new measurement" et vérifier que la fenêtre apparaît telle que sur la figure suivante et cliquer sur continuer:



2. Les indicateurs apparaissent comme sur la copie d'écran:



3. Mettre le noyau de fer. Limiter le courant à 5 A sur la source de tension.
4. A chaque changement de tension, enregistrer les valeurs en appuyant sur la barre d'espace (ou "Save value").
5. Une fois la flux magnétique arrivé à sa valeur maximale (il ne doit pas dépasser 1000 mT), diminuer progressivement la tension et continuer à enregistrer les points.
6. Quand la source est à 0 V, utiliser l'interrupteur pour changer la polarité et recommencer les étapes précédentes.
7. Refaire la même expérience, mais en utilisant le noyau lamellisé.
8. Tracer les courbes d'hystérésis comme indiqué sur la feuille affichée en TP.
9. Conclusions.

Manipulations virtuelles



Grâce aux animations qui suivent, qui ne sont qu'une mise en musique de photos prises à partir de la vraie manipulation, vous aurez la possibilité de faire les mesures comme si vous étiez en train de les relever sur la vraie manipulation.

1. Etude du transformateur à vide

1.1. Etude de la tension au secondaire en fonction de la tension primaire

[cf. Transformateur à vide]

1.2. Perte fer pour une tension d'entrée égale à 150V

[cf. transformateur à vide avec wattmètre]

2. Etude du transformateur en charge

Etude du transformateur en charge

Etude du transformateur en charge

[cf.]

3. Mesure du cycle d'hystérésis

Consignes importantes à respecter pour jouer les 2 animations suivantes et relever les valeurs expérimentales :

Pour faire les mesures :

1. afficher les zones actives
afficher dans Environnement la variable cycle
2. choisir le cycle 0 (par défaut)
tourner le bouton tension dans le sens horaire jusqu'à 18 V (ne pas revenir en arrière) et relever les valeurs
3. choisir le cycle 1
tourner le bouton tension dans le sens anti-horaire jusqu'à 0V (ne pas revenir en arrière) et relever les valeurs
4. choisir le cycle 2
tourner le bouton tension dans le sens horaire jusqu'à 18 V (ne pas revenir en arrière) et relever les valeurs
5. choisir le cycle 3
tourner le bouton tension dans le sens anti-horaire jusqu'à 0V (ne pas revenir en arrière) et relever les valeurs

6. choisir le cycle 4

tourner le bouton tension dans le sens horaire jusqu'à 18 V (ne pas revenir en arrière) et relever les valeurs

7. à la fin des 5 cycles apparaîtra la courbe d'hystérésis tracée automatiquement par le logiciel "Mesures"

3.1. Cas du circuit magnétique en fer doux plein

[cf. Hystérésis circuit magnétique à noyau plein]

3.2. Cas du circuit magnétique en fer doux lamellé

[cf. Hystérésis circuit magnétique à noyau lamellé]

Bibliographie



Préparer et rédiger un TP

- *comment préparer un TP [cf. Comment preparer un TP.pdf]*
- *rédiger un compte-rendu de TP [cf. Comment rédiger un CR.pdf]*

Ressources concernant EXCEL: "Utilisation d'EXCEL pour les scientifiques par Alain Perche (Maître de conférences à l'Université de Lille1

1 ère partie [cf. ANNEXCEL2005.pdf]

2 ème partie [cf. ANNEXCEL2005_ch2.pdf]

Références

[1] http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Transformateur_monophas.svg

[2] F. Leplus, Bobine à noyau de fer en régime variable, Techniques de l'Ingénieur, D 3010

Crédits



Auteurs :

Yves Quiquempois professeur à l'IUT Université Lille1

mel : yves.quiquempois@univ-lille1.fr

Conception technique :

Eric Lutun

mel :Eric.Lutun@univ-lille1.fr

Réalisation :

Bernard Mikolajczyk (SEMM Université de Lille1), réalisation des vidéos

mel : bernard.mikolajczyk@univ-lille1.fr

Jean-Marie Blondeau (SEMM Université de Lille1), réalisation du site

mel : jean-marie.blondeau@univ-lille1.fr

Moyens techniques :

Service Enseignement et Multi Media (SEMM¹) Université de Lille1



¹semm.univ-lille1.fr