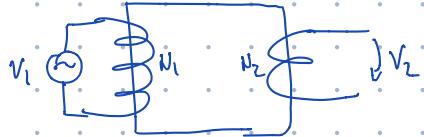
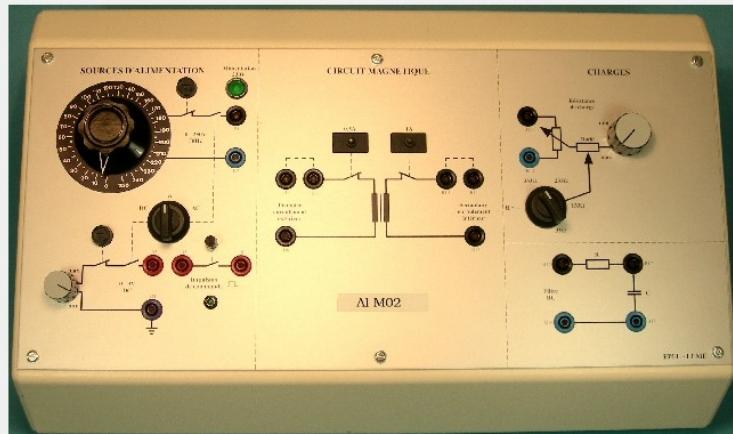


Transformer - static machine



$$\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2}$$

## Le Circuit Magnétique - Le transformateur



Le but de ce TP est de passer en revue les principales équations ainsi que les principes de base d'un circuit magnétique avec et sans entrefer (perméance, potentiel magnétique, champ d'induction, réactance, saturation, ...)

Dans un premier temps la caractéristique B-H (cycle d'hystérésis et saturation) va être étudiée.

Ensuite, trois façons de déterminer les paramètres vont être effectuées : théorique et pratique par des essais en continu et en alternatif.

Une fois le schéma équivalent établi, une prédétermination du comportement en charge sera effectuée et comparée à des mesures pratiques.

### A Savoir

Une case blanche doit être remplie par vous

Une case jaune est le résultat d'un calcul

Table N° : 13

Une case verte est la copie d'une case remplie ou calculée précédemment

Module 1-M

TPLaime - v3.16.0 (083)

Numéro du module	Nombre de spires		Tensions Nominales		Courants Nominaux	
	Primaire bobine extérieure	Secondaire bobine intérieure	Primaire U <sub>1N</sub> [V]	Secondaire U <sub>2N</sub> [V]	Primaire I <sub>1N</sub> [A]	Secondaire I <sub>2N</sub> [A]
1 - A	1500	500	200	65	0.4	0.8
1 - B	1500	500	200	65	0.4	0.8
1 - C	1500	500	200	65	0.4	0.8
1 - D	1500	500	200	65	0.4	0.8
1 - E	1600	400	200	50	0.4	0.8
1 - F	1600	400	200	50	0.4	0.8
1 - G	1500	500	200	65	0.4	0.8
1 - H	1500	500	200	65	0.4	0.8
1 - I	1500	500	200	65	0.4	0.8
1 - J	1500	500	200	65	0.4	0.8
1 - K	1500	500	200	65	0.4	0.8
1 - L	1600	400	200	50	0.4	0.8
1 - M	1350	450	200	65	0.4	0.8
1 - N	1440	360	200	50	0.4	0.8
1 - O	1200	400	200	65	0.4	0.8
1 - P	1280	320	200	50	0.4	0.8
1 - Q	1350	450	200	65	0.4	0.8
1 - R	1440	360	200	50	0.4	0.8
1 - S	1500	500	200	65	0.4	0.8
1 - T	1500	500	200	65	0.4	0.8

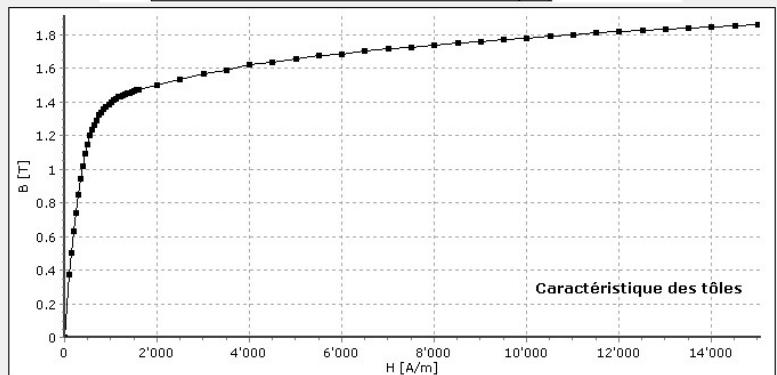
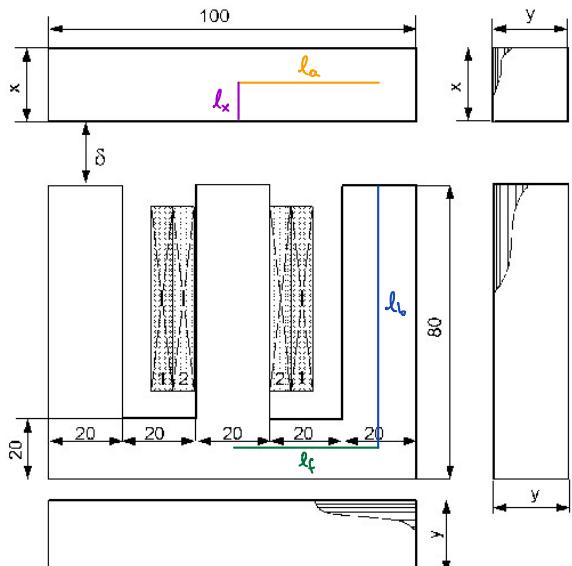


N° module	LARGEUR y [mm]	Plaque fer épaisseur x [mm]	$l_{moy1}$ [mm]	$l_{moy2}$ [mm]	$L_{\sigma 1}$ [mH]	$L_{\sigma 2}$ [mH]	$R_1$ [ $\Omega$ ]	$R_2$ [ $\Omega$ ]
1 - A	20	21	150.4	93.6	18.7	1.3	20.1	4.17
1 - B	20	21.5	150.4	93.6	18.7	1.3	20.1	4.17
1 - C	20	22	150.4	93.6	18.7	1.3	20.1	4.17
1 - D	20	22.5	150.4	93.6	18.7	1.3	20.1	4.17
1 - E	20	20	150.4	93.6	21.3	0.83	21.4	3.34
1 - F	20	20	150.4	93.6	21.3	0.83	21.4	3.34
1 - G	20	22	150.4	93.6	18.7	1.3	20.1	4.17
1 - H	20	22	150.4	93.6	18.7	1.3	20.1	4.17
1 - I	20	23	150.4	93.6	18.7	1.3	20.1	4.17
1 - J	20	23	150.4	93.6	18.7	1.3	20.1	4.17
1 - K	18	21	146.4	89.6	18.2	1.24	19.6	3.99
1 - L	18	21	146.4	89.6	20.7	0.79	20.9	3.19
1 - M	18	21	146.4	89.6	14.8	1	17.6	3.59
1 - N	18	21	146.4	89.6	16.8	0.64	18.8	2.87
1 - O	16	22	142.4	85.6	11.4	0.76	15.2	3.05
1 - P	16	22	142.4	85.6	12.9	0.49	16.2	2.44
1 - Q	16	22	142.4	85.6	14.4	0.96	17.1	3.43
1 - R	16	22	142.4	85.6	16.3	0.61	18.3	2.75
1 - S	18	22.5	146.4	89.6	18.2	1.24	19.6	3.99
1 - T	16	22.5	142.4	85.6	17.7	1.18	19	3.81

indice 1 enroulement primaire  
indice 2 enroulement secondaire

$l_{moy1}$  longueur moyenne d'une spire de l'enroulement  
 $L_{\sigma 1}$  inductance de fuite  
 $R_1$  résistance de l'enroulement

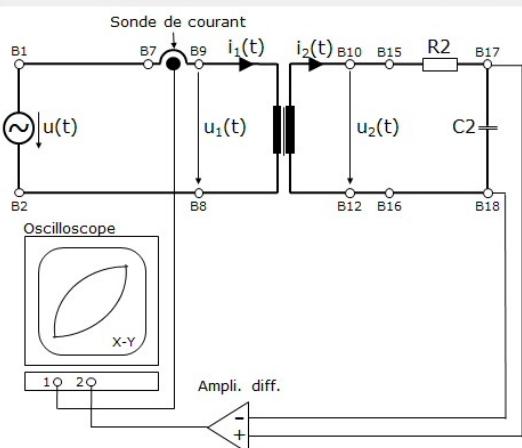
dans les calculs  
on prend  $x=20\text{mm}$   
"



Cette section a pour but d'illustrer les 3 phénomènes importants d'un circuit magnétique (ferromagnétique), à savoir :

- \* Le cycle d'hystérésis (B-H)
- \* Les pertes fer
- \* La saturation

Pour ce faire, nous allons câbler le circuit magnétique selon la figure ci-dessous.



Pour que l'affichage soit dans le bon sens lors des mesures, respectez bien le X et le Y. Ils doivent respectivement être le courant et la tension mesurés. Respectez également la polarité (sens de mesure).

Mettre les offset de mesure à 0 et faire un dégauss et un auto-zéro sinon votre courbe BH ne sera pas centrée. Utilisez le mode XY (menu "Display" - XY Grid).

#### Valeurs Nominales

Avant d'aller plus loin, il est important de déterminer les valeurs nominales de votre module, afin d'être sûr que vous ne dépassiez pas les valeurs limites en courant et en tension du système.

En fonction du numéro de votre MODULE-M, que valent :

- \* La tension nominale primaire
- \* Le courant nominal primaire
- \* La tension nominale secondaire
- \* Le courant nominal secondaire

Un1 =  [V]

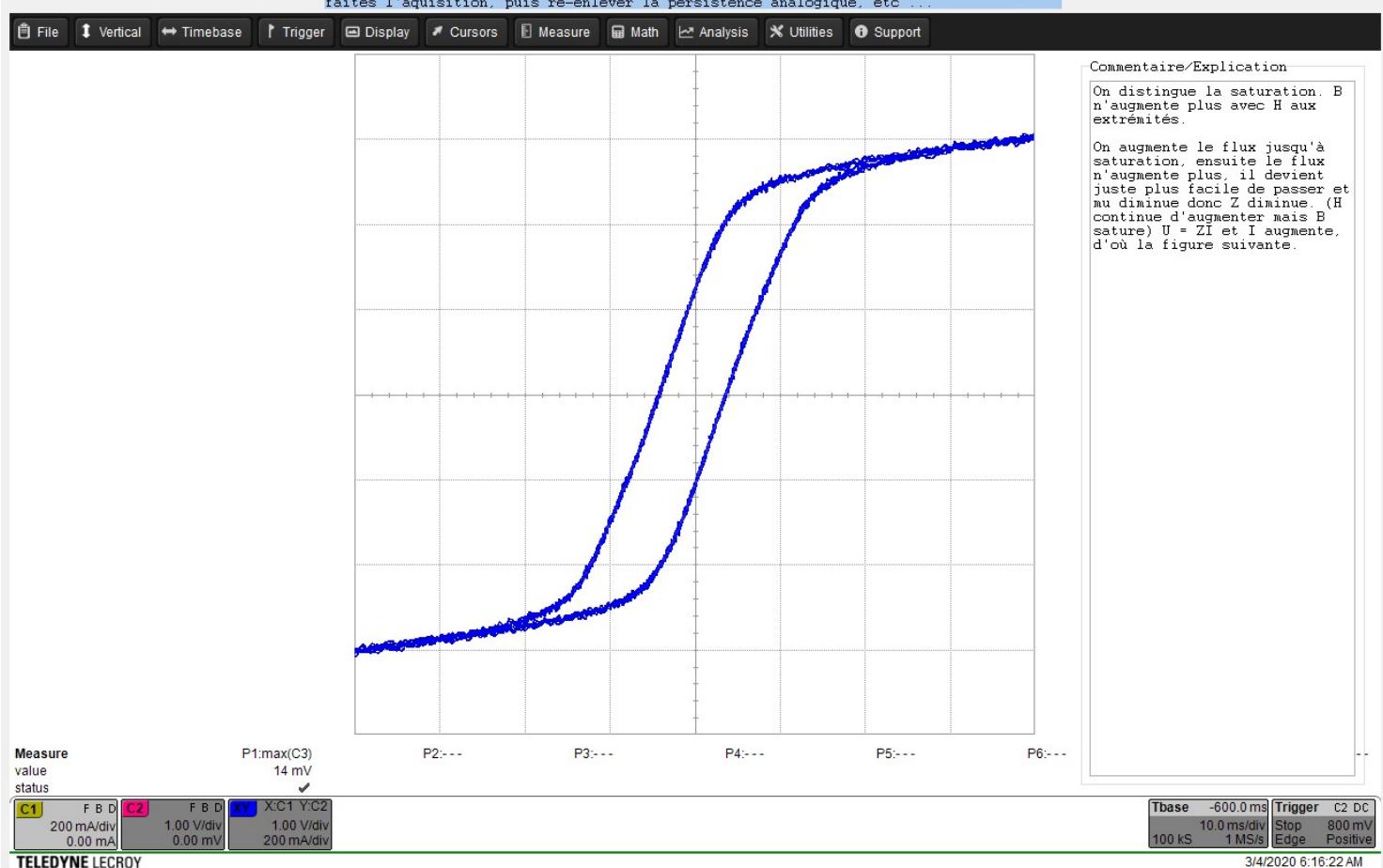
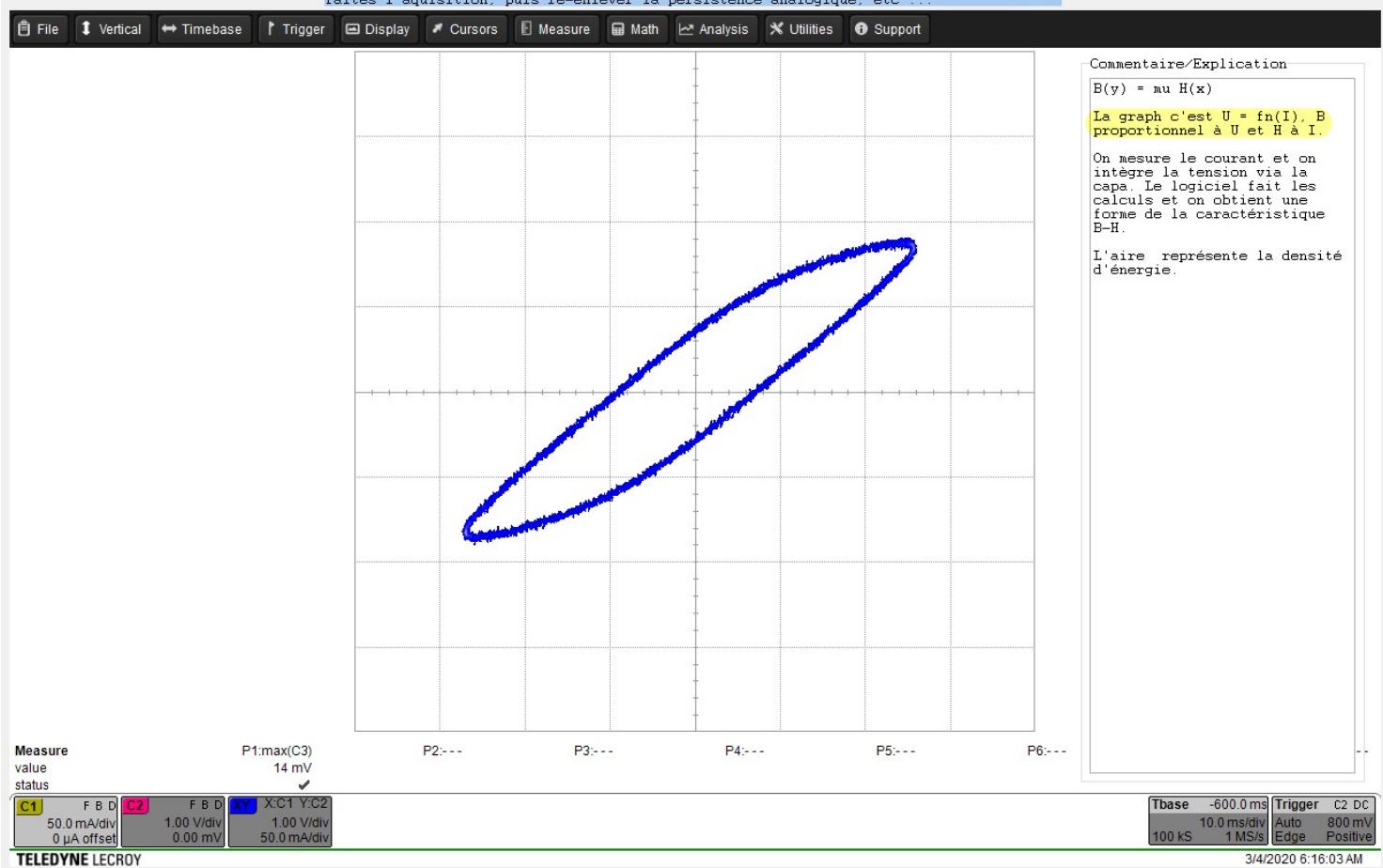
In1 =  [A]

Un2 =  [V]

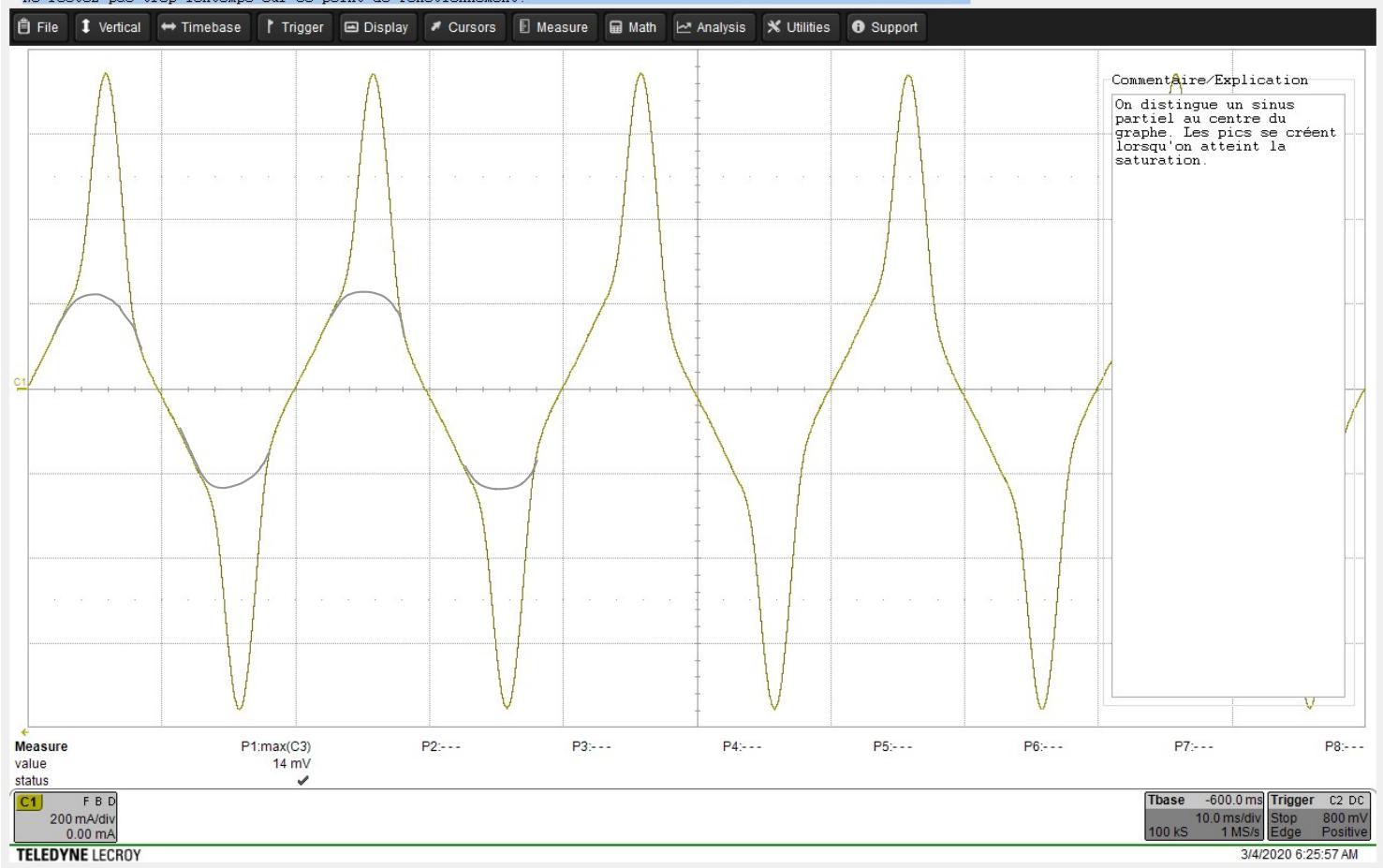
In2 =  [A]

Sauf clairement spécifié quelle que soit la mesure que vous effectuez, aucune de ces valeurs ne doit être dépassée.

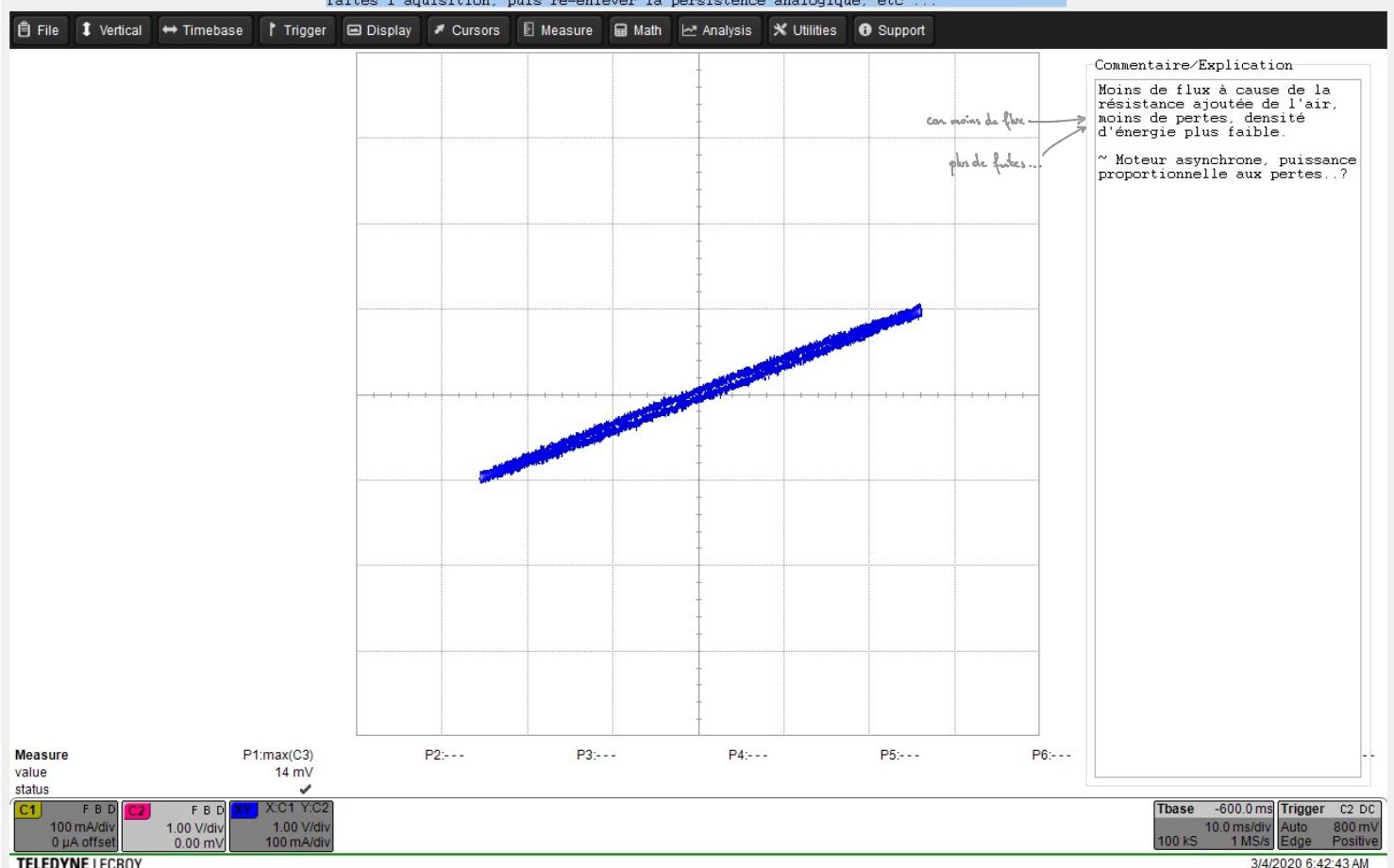
Ceci est valable pour n'importe quelle mesure en électrotechnique, aucune des valeurs nominales ne doit être dépassée sauf clairement spécifiée dans l'essai.

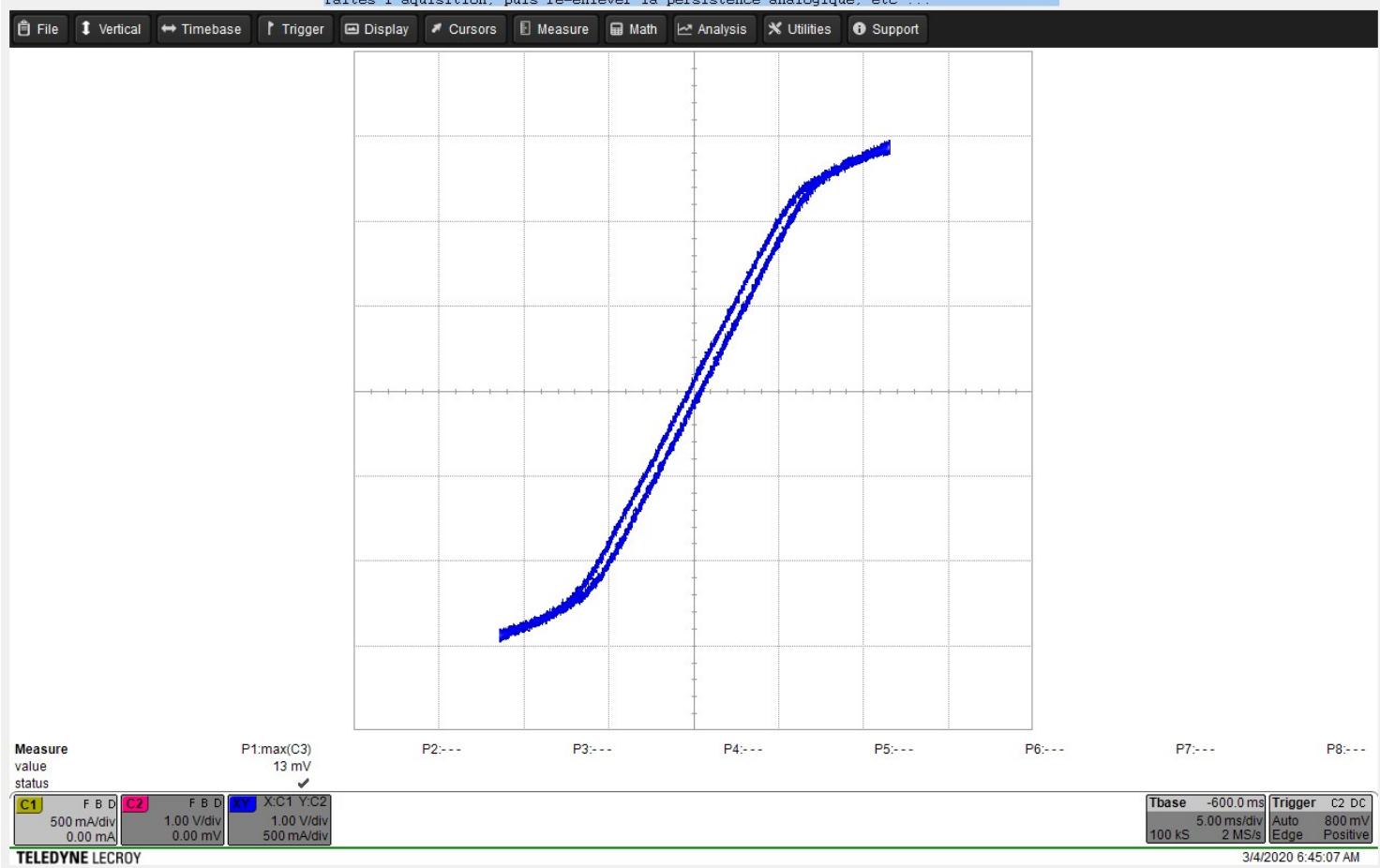


Quitter le mode X-Y, et afficher uniquement le courant.  
 Entrefer = 0 mm, monter la tension lentement jusqu'à obtenir un courant très saturé (quasiment "triangulaire").  
 Ne restez pas trop longtemps sur ce point de fonctionnement.



Pour une meilleure copie d'écran et surtout une meilleure image à l'impression, faire STOP, mettre la persistance analogique (bouton tout en haut à droite de l'oscillo), faites l'aquisition, puis re-enlever la persistance analogique, etc ...  
 Entrefer = 1 mm, régime NON saturé





## Commentaires personnels sur les résultats obtenus.

- \* À quoi correspond la surface du cycle d'hystéresis ? (Unité ?)
- \* Expliquer la déformation de la courbe d'hystéresis.
- \* En se basant sur les cycles d'hystéresis mesurés, expliquer ce qui se passe lorsque :
  - l'entrefer augmente
  - le courant augmente

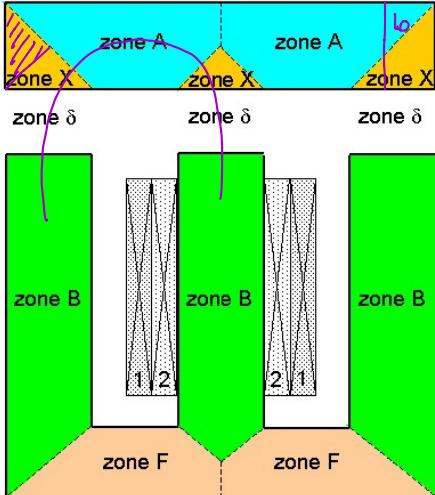
NB: Les assistants ne sont pas là pour "donner les réponses", mais pour discuter des réponses avec vous. Il faut faire le chemin de réflexion par vous-même pour arriver à une bonne compréhension.

Quand on sature on Henry moins...

- \* La densité d'énergie "stockée" [ $J/m^3$ ]
- \* cf. commentaires
- \* entrefer augmente: moins de flux utilisable, et, courant augmente: on atteint la saturation

$\hookrightarrow$  énergie  $\downarrow$        $\hookrightarrow$   $Z \downarrow, U$  satane

## Définition des zones du circuit magnétique



Hypothèse : Toutes les sections sont identiques et correspondent à celle de la structure en E

$$S = 0.00036 \text{ [m}^2\text{]}$$

Les variables possibles sont : la, lb, lx, lf, delta, S, mufer, muair

$$\text{PermA} = \mu\text{ufer} * S / \text{la}$$

$$\text{PermF} = \mu\text{ufer} * S / \text{lf}$$

$$\text{avec la} = 0.04 \text{ [m]}$$

$$\text{avec lf} = 0.04 \text{ [m]}$$

$$\text{PermB} = \mu\text{ufer} * S / \text{lb}$$

$$\text{PermDelta} = \mu\text{uair} * S / \text{delta}$$

$$\text{avec lb} = 0.07 \text{ [m]}$$

$$\text{avec muair} = 1.26E-06 = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

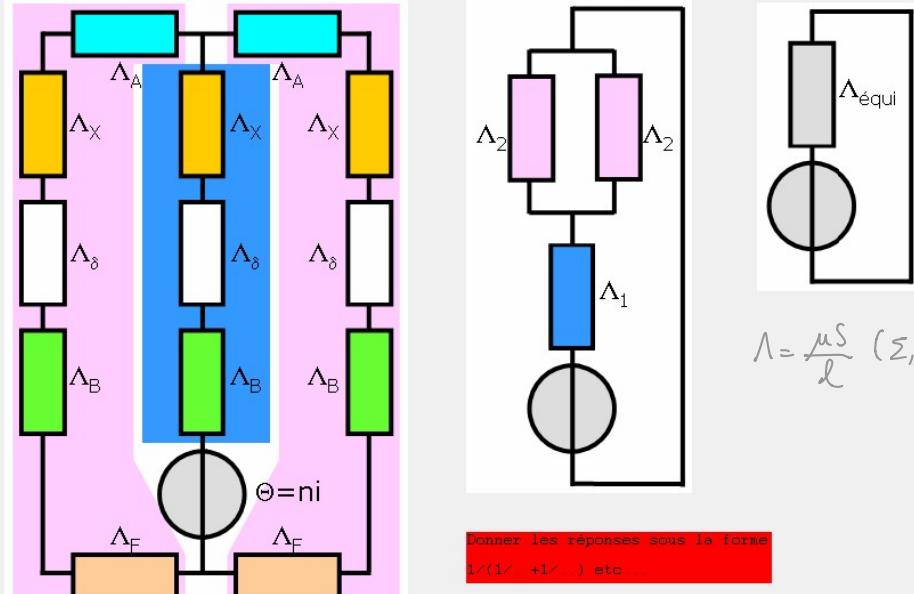
-> Pour muair, veuillez écrire la valeur arrondie à 2 décimales.

Par exemple : 2.34E-5

$$\text{PermX} = \mu\text{ufer} * S / \text{lx}$$

$$\text{avec lx} = 0.01050 \text{ [m]}$$

## Simplification du circuit jusqu'à obtention d'une seule perméance équivalente



$$\Lambda = \frac{\mu S}{l} (\Sigma_{ii})$$

Donner les réponses sous la forme  
1/(1/ + 1/ ) etc.

Perm1 en fonction de : PermA, PermB, PermX, PermF, PermDelta  
Perm1 = 1/(1/PermB+1/PermX+1/PermDelta)

Perm2 en fonction de : PermA, PermB, PermX, PermF, PermDelta  
Perm2 = 1/(1/PermA+1/PermB+1/PermX+1/PermF+1/PermDelta)

En fonction de Perm1 et Perm2

PermEqui = 1/(1/Perm1+1/(2\*Perm2))

La perméance équivalente est-elle intuitive ?  
Quelle sens physique donner à 2\*Perm2 ? Flux ?

Perméance ~ Conductivité, on a deux branches -> deux fois plus facile de passer.

La perméance équivalente déterminée dépend de la section S, de l'entrefer de muair et de mufer.

Pour la comparaison avec les mesures pratiques, nous voulons déterminer les inductances pour delta = 0, et hors saturation.

Tout est connu, sauf mufer. Quelle valeur de courant utiliser pour garantir d'être hors saturation ?

H doit donc être déterminé en fonction du courant i et des paramètres connus du circuit magnétique, de là, par la caractéristique des tôles il sera possible de choisir une valeur de courant "hors saturation".

Variables possibles : Total, PermEqui, Phi (flux), lequi (long. équivalente), la, lb, lx, lf, Nb1, Nb2, I1

$$\text{Spires primaire} \quad \text{Spires secondaire}$$

$$\text{Nb1} = 1350 \quad [-] \quad \text{Nb2} = 450 \quad [-]$$

potentiel mag. : Nb1\*I1

cf. PermEqui avec S=0

$$\text{lequi} = \text{lb} + \text{lx} + (\text{la} + \text{lb} + \text{lx} + \text{lf}) / 2$$

$$H = \text{Total} / \text{lequi} \Rightarrow H = 504 \text{ [A/m]}$$

Maintenant que H peut être calculé, il faut itérativement modifier I1 jusqu'à obtenir un mufer linéaire et donc un B hors du coude de saturation afin de permettre une comparaison correcte avec la pratique.

Commencez avec I1 = 0.5 A

$$I1 = 0.06 \text{ [A]}$$

$$\Rightarrow B = 1.15 \text{ [T]}$$

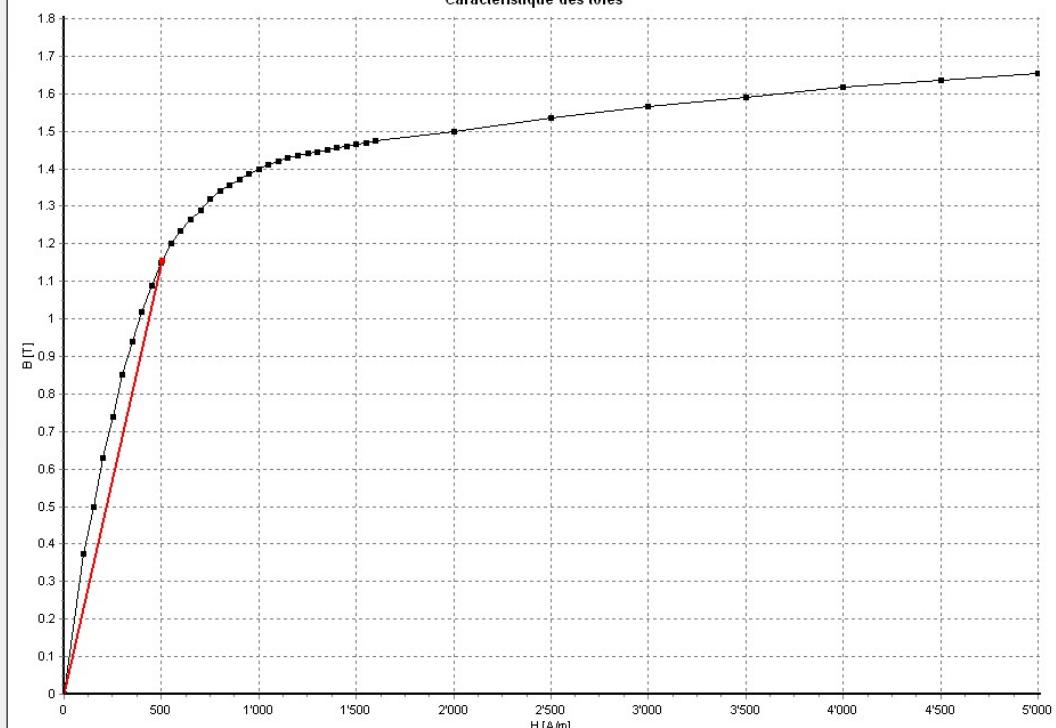
$$\mu\text{ufer} = 0.002282 = B/H$$

Attention c'est bien la valeur de mufer qu'on vous demande, et pas le mu relatif du fer

(pour delta = 0)

$$\text{Perm. équi.} = 0.000005110544$$

Caractéristique des tôles



Les variables possibles sont :

Nb1, Nb2, Lh1, Lh2, Ls1, Ls2  
 Permh = perméance équivalente du circuit, avec delta, sans les fuites.

Inductance de champ principal 1  
 $Lh1 = Nb1 * Nb1 * Permh = Lm \frac{Nb1}{N2}$   
 Inductance mutuelle sur le primaire  
 Inductance de champ principal 2  
 $Lh2 = Nb2 * Nb2 * Permh$

Inductance Mutuelle 1-2  
 $L12 = Nb1 * Nb2 * Permh$

Inductance Mutuelle 2-1  
 $L21 = Nb2 * Nb1 * Permh$

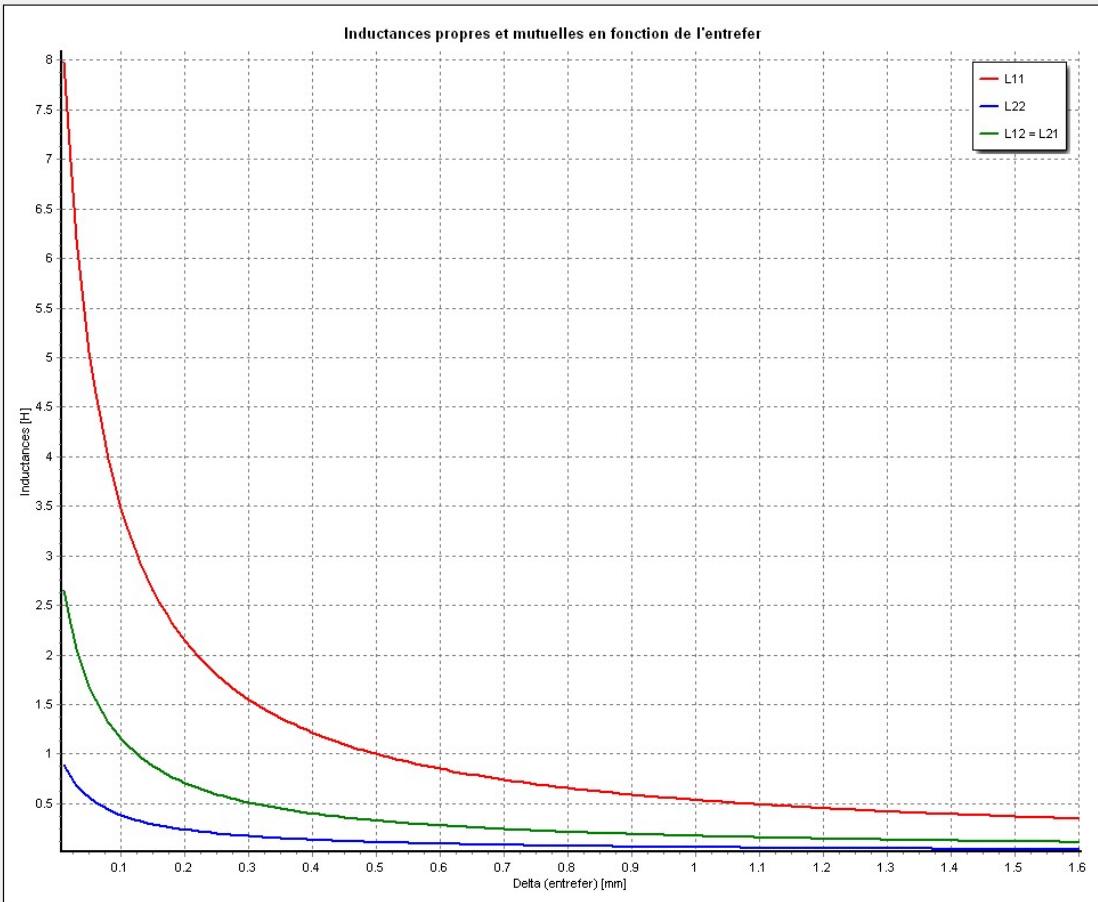
Inductance de fuite au primaire (datasheet)  
 $Ls1 = 0.0148$  [H]

Inductance de fuite au secondaire (datasheet)  
 $Ls2 = 0.00100$  [H]

Inductance propre 1  
 $L11 = Lh1 + Ls1$

Inductance propre 2  
 $L22 = Lh2 + Ls2$

Les inductances calculées ici dépendent de la perméance équivalente du circuit, calculée précédemment (Perm). Comme cette perméance dépend elle-même de l'entrefer, nous pouvons dessiner la valeur (variation) des inductances en fonction de l'entrefer.



Commentaires personnels sur la démarche suivie et les résultats obtenus.

Idées de réflexions :

- \* Avez-vous compris la démarche théorique appliquée ici ?
- \* Avez-vous compris l'influence de la saturation sur la perméance équivalente ? *saturation => muFer => Nb*
- \* Avez-vous compris la démarche pour calculer muFer ?
- \* Avez-vous compris la différence entre les inductances ?
  - propres
  - mutuelles (1-2 et 2-1 : différence ?)
  - de champ principal
  - de fuite *fuites*
- \* Le point précédent étant très important, posez-vous la question, quelle différence entre Lh1 Lh2 et L12-L21
- \* Avez-vous compris l'évolution des inductances en fonction de delta ? *un rapport de transformation + fuites*
- \* ...

NB: Les assistants ne sont pas là pour "donner les réponses", mais pour discuter des réponses avec vous.  
 Il faut faire le chemin de réflexion par vous-même pour arriver à une bonne compréhension.

\*
 \*
 \*
 \*
 \*
 \*
 \* si delta augmente, les inductances diminuent

Le but ici est d'utiliser le même procédé que celui vu lors du TP "technique de mesure" (BlueBox), à savoir appliquer un saut de tension pour déterminer la résistance et les inductances au primaire et au secondaire.

Dans un premier temps, nous allons écrire les équations générales de 2 bobinages couplés, puis écrire ces mêmes équations pour le cas particulier "à vide". De ces dernières équations nous pourront tirer la résistances et les inductances propres et mutuelles du circuit étudié.

## Préparation à la mesure :

La mesure est effectuée à entrefer nul ( $\Delta = 0 \text{ mm}$ )

Pour rappel, le but étant de comparer théorie et pratique, nous allons nous placer dans le cas d'une mesure faisant intervenir le même courant que celui déterminé/choisi théoriquement.

Dans votre cas :  $I_1 = 0.06 \text{ [A]}$

Régler la tension  $U_1$  de façon à obtenir environ ce courant. Afin d'affiner les résultats, sachant qu'en pratique le courant réglé ne sera pas exactement celui de la théorie, que valent  $U_1$  et  $I_1$ .

$U_1 = 1.35 \text{ [V]} \quad I_1 = 0.06 \text{ [A]}$

et donc en régime établi  $R_1 = 22.5 \text{ [Ohm]}$

secondaire à vide:  $I_2 = 0$

Nous rappelons ici les 2 équations de tension pour 2 bobinages couplés qui sont écrites dans la section suivante (essai à vide).

Équations générales de 2 bobinages couplés (temporel)

$$u_1 = R_1 * i_1 + L_{11} * d i_1 / dt + L_m * d i_2 / dt$$

$$u_2 = R_2 * i_2 + L_{22} * d i_2 / dt + L_m * d i_1 / dt$$

## Primaire alimenté - secondaire à vide

Les variables possibles sont :

$U_1, U_2, i_1, i_2, d i_1 / dt, d i_2 / dt, R_1, R_2, L_{11}, L_{22}, L_m, dt, t$  (le temps)

Tau1 (la constante de temps)

Les fonctions possibles sont :  $\exp()$

$$u_1(t) = R_1 * i_1 + L_{11} * d i_1 / dt$$

$$u_2(t) = L_m * d i_1 / dt$$

Solutions littérales de ces équations :

$$\text{Tau1} = L_{11} / R_1$$

$$i_1(t) = (U_1 / R_1) * (1 - \exp(-t / \text{Tau1}))$$

Connaissant la solution de  $i_1(t)$  et le lien entre  $u_2(t)$  et  $i_1(t)$  il est facile de trouver la solution de  $u_2(t)$

$$u_2(t) = L_m * (U_1 / L_{11}) * \exp(-t / \text{Tau1})$$

écrivons les 2 cas limites pour  $t = \infty$  et  $t = 0$

$$u_2(t=\infty) = 0$$

$$u_2(t=0) = L_m * (U_1 / L_{11})$$

De là, en  $t=0$  nous pouvons écrire

$$L_m = (L_{11} * U_2) / U_1$$

Les résultats de la mesure effectuée dans l'onglet suivant doivent être reportés ci-dessous.

## Résultats de mesure

$\text{Tau1} = 0.08 \text{ [s]}$

$R_1 = 22.5 \text{ [Ohm]}$

$L_{11} = 1.8 \text{ [H]}$

$U_1 = 1.35 \text{ [V]}$

$t=0$

$U_2 = 0.4 \text{ [V]}$

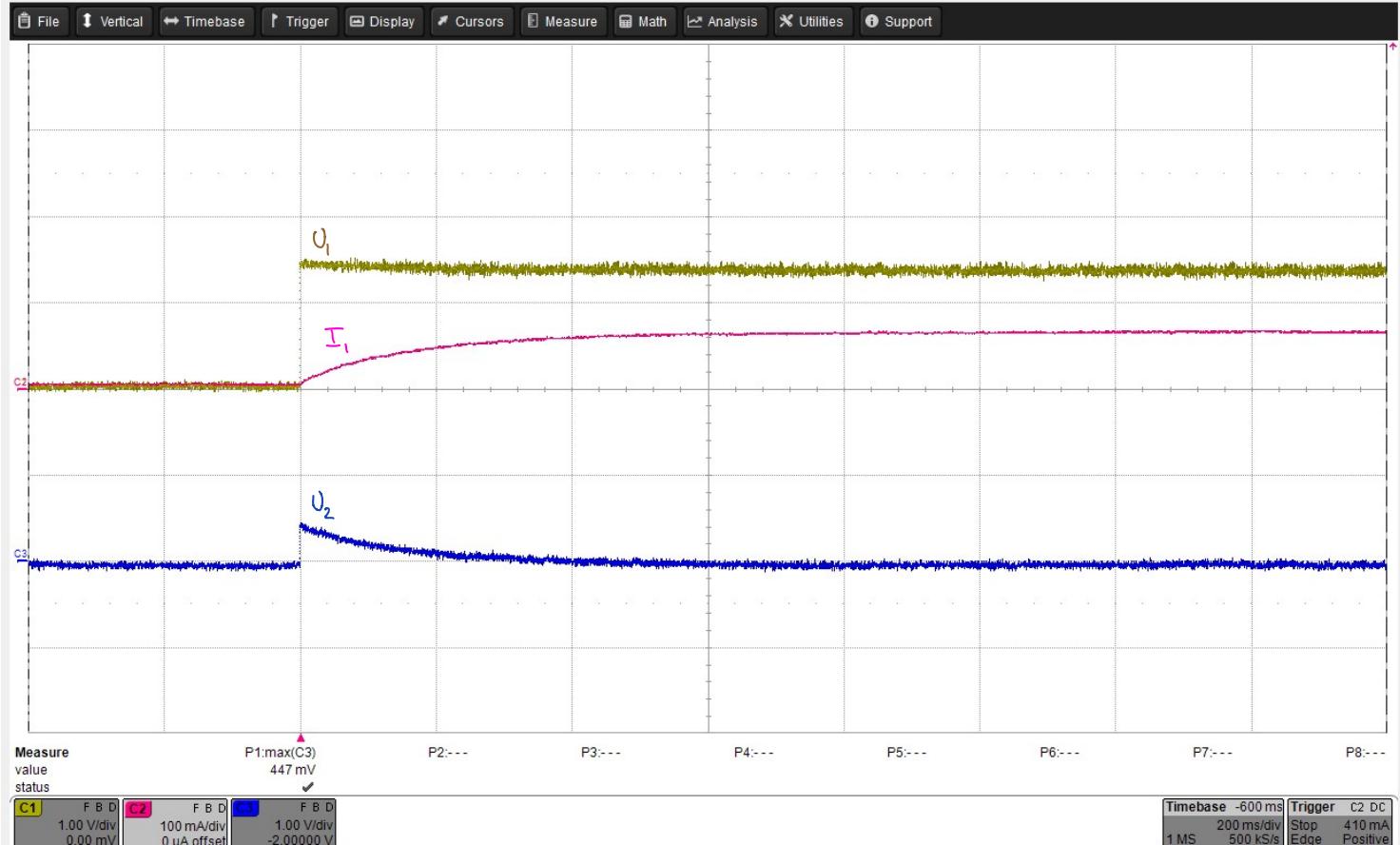
$L_m = 0.53 \text{ [H]}$

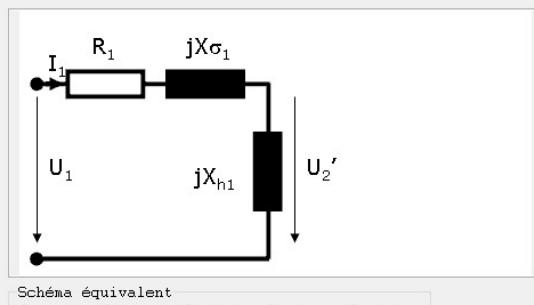
Pour gagner du temps, nous avons créé un Panel vous permettant de charger une configuration permettant d'effectuer rapidement la mesure.

Pour cela vous devez câbler dans l'ordre  $U_1$ ,  $I_1$  et  $U_2$ .

Avant de faire la mesure n'oubliez pas le dégauss de la sonde de courant et l'auto-zéro

Utilisez le 10 spires pour affiner la mesure du courant et enlevez le voltmètre et l'ampermètre utilisé dans l'onglet précédent car leur auto-adjustement d'échelle peut gêner la mesure lors du saut de tension.





## Equations de tension de l'essai à vide

Les variables possibles sont : R1, R2, I1, I2, L11, L22, Lm, omega, j

U1 = R1\*I1+j\*omega\*L11\*I1

U2 = j\*omega\*Lm\*I1

Impédance primaire complexe

Zb1 = R1+j\*omega\*L11

A l'aide du wattmètre et d'un multimètre, mesurer les grandeurs nécessaires à l'essai à vide.

Les mesures sont effectuées à entrefer nul ( $\delta = 0 \text{ mm}$ ) et sans saturation (au même courant que celui déterminé dans la théorie)

## Equations générales de tensions

## Equations générales de 2 bobinages couplés (temporel)

Variables possibles :

R1, R2, i1, i2, di1, di2, dt, L11, L22, Lm

u1 = R1\*i1+L11\*di1/dt+Lm\*di2/dt

u2 = R2\*i2+L22\*di2/dt+Lm\*di1/dt

## Equations en régime sinusoïdal (phaseur)

Les variables possibles sont :

R1, R2, I1, I2, L11, L22, Lm, omega, j

U1 = R1\*I1+j\*omega\*L11\*I1+j\*omega\*Lm\*I2

U2 = R2\*I2+j\*omega\*L22\*I2+j\*omega\*Lm\*I1

Dans ces équations nous pourrions remplacer les inductances par des réactances grâce aux formules :

Les variables possibles sont : pi, f, omega, L

Pulsation électrique

omega = 2\*pi\*f

Valeur de la fréquence du réseau

f = 50 [Hz]

La Réactance

X = omega\*L

En pratique nous ne pouvons mesurer que : U1, U2, I1 et P1 (puissance active au primaire) mais de là nous pouvons déduire les grandeurs suivantes.

Les fonctions possibles sont : sin(), cos(), tg(), arccos(), arctg()

Les variables possibles sont : U1, U2, I1, P1, Nb1, Nb2, omega et toutes celles que vous définissez ci-dessous

La variable Zb1 représente la norme de Zb1 complexe

Norme de l'impédance primaire

|Zb1| = U1/I1 1283 [Ohm]

Cos\_phi au primaire

cos\_phi1 = P1/(U1\*I1) P/S 0.403 [-]

Résistance au primaire

R1 = Zb1\*cos\_phi1 516.7 [Ohm]

Sin\_phi au primaire

sin\_phi1 = sin(arccos(cos\_phi1)) 0.915 [-]

Réactance primaire

X11 = Zb1\*sin\_phi1 1174.7 [Ohm]

Inductance propre primaire

L11 = X11/omega 3.74 [H]

trouvée grâce à U2

● Im = U2/(I1\*omega) 1.33 [H]

Inductance de champ principal

Lh1 = (Nb1/Nb2)\*Lm 3.98 [H]

Inductance de fuite au primaire

Ls1 = L11-Lh1 -0.2396 [H]

## Commentaires personnels :

Wattmètre mesure vrmt P; S à calculer par U\*I, lui ne peut pas calculer les cos\_phi et faire le calcul.

R1 [Ohm]	L11 [H]	Lm [H]	Lh1 [H]
Théorie (L11, Im) et datasheet (R1) = 17.6	9.329	3.105	3.98
Saut de tension = 22.5	1.8	0.53	0.68
En alternatif = 516.7	3.74	1.33	1.7

Valeurs correctes tirées des mesures = 21 4.3352 3.39 4.3342

Faute de temps, nous n'avons fait la comparaison qu'au primaire, mais nous aurions pu "inverser" toutes les équations, faire les mesures au secondaire et tirer R2, L22 et La dans les 3 cas (théorie, à vide, sauts). Les conclusions auraient été les mêmes.

U1 [V] Pourquoi une telle différence entre la tension du saut DC et celle de l'essai à vide, alors que le courant est le même dans ces 2 essais ?

Saut de tension = 1.35

Différences pour R1 (théorie, saut, à vide)?

En alternatif = 77

Différence entre L11 et Lh1 (théorie, saut, à vide)?

Origine de l'erreur ? Comment la corriger sur la base de l'essai à vide ? Trouvez un moyen de calculer/corriger les résultats.

Une fois les valeurs correctes déterminées, pourquoi subsiste-t-il une erreur avec la théorie ?

R1: datasheet vs mesure due aux fusibles thermiques en série.

Saut de tension U1: Impédance équivalente en alternatif &gt;&gt; continu à cause de vL qui est court-circuit en DC.

Saut de tension R1: En alternatif Rfer intervient et on la mesure avec dans la valeur de R1, en DC s'en fiche de Rfer car court-circuité duquel il aurait fallut tenir compte dans le schéma équivalent.

L : le montage de l'entrefer est imparfait, il y a qq microns inévitables, d'où la différence

Après correction: tout est +/- bon

NB: On utilise l'alternatif pour limiter les pertes RI^2.

NB: L11 = l1 + lsl et Lh1 = Lm\*Nb1/Nb2

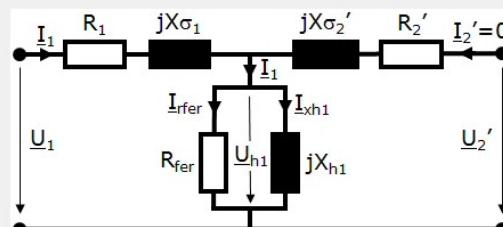
$$\frac{U_L}{U_L} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{U_1}{U_2} \quad \frac{Z_L}{Z_L} = \frac{U_L^2}{U_2^2}$$

Valeurs mesurées dans l'essai à vide  
 U1 = 77 [V] P1 = 1.86 [W]  
 I1 = 0.06 [A] U2 = 25 [V]

Nombre de spires  
 Nb1 = 1350 [-]  
 Nb2 = 450 [-]  
 R1 mesuré (ohmmètre)  
 R1 = 21 [Ohm]

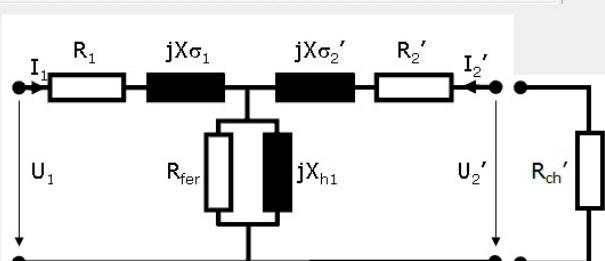
Le développement suivant nous permet de déterminer Rfer et le vrai I1h1  
 Les fonctions possibles sont : sqrt()  
 Les variables possibles sont : U1, I1, P1, U2, Nb1, Nb2, omega, R1 et toutes celles que vous définissez

Pj = R1*I1^2	0.0756 [W]
Pfer = P1-Pj	1.7844 [W]
Uh1 = U2*Nb1/Nb2	75.00 [V]
Rfer = Uh1^2/Pfer	3152.3 [Ohm]
Irf1 = Uh1/Rfer	0.0238 [A]
Ixh1 = sqrt(I1^2-Irf1^2)	0.0551 [A]
Xh1 = Uh1/Ixh1	1361.6 [Ohm]
Ih1 = Xh1/omega	4.3342 [H]



Commentaires personnels :

P: puissance active - éléments réels (cos\_phi)



$$Z = R+jX = R+jwL$$

Schéma équivalent

Sch.1  Sch.2  Sch.3  Sch.4  Sch.5

Nous pouvons maintenant finir de déterminer tous les paramètres du schéma équivalent, à savoir

R1 = Résistance du primaire  
 Xs1 = Réactance de fuite primaire  
 Rfer = Résistance fer  
 Xh = Réactance de champ principal  
 R2' = Résistance du secondaire rapportée au primaire  
 Xs2' = Réactance de fuite secondaire rapportée au primaire  
 R1 a déjà été mesurée. Pour Rfer et Xh ils ont été déterminés dans la section précédente (comparaison->Rfer).  
 Il nous reste donc à déterminer Xs1, R2' et Xs2' :

Paramètres du schéma équivalent

R1 = 21 [Ohm]	Mesurée au Ohmmètre
I1s1 = 0.0148 [H]	R2 = 6 [Ohm]
I1s2 = 0.00100 [H]	Précision: 1 décimale
Xh1 = 1361.6 [Ohm]	R2' = 54 [Ohm]
Rfer = 3152.3 [Ohm]	Précision: 4 décimales
Nb1 = 1350 [-]	I1s2' = 0.009 [H]
Nb2 = 450 [-]	Précision: 2 décimales
	Xs2' = 2.83 [Ohm]

Maintenant que tous les éléments du schéma équivalent sont définis, nous pouvons préécrire le comportement en charge du transformateur (rendement).

Pour cela il faut d'abord écrire l'impédance équivalente ( $Z_{eq}$ ) en fonction de la charge  $R_{ch}$ . Pour cela nous utilisons le calcul complexe et définissons 3 impédances ( $Z_1, Z_{2p}, Z_{h1}$ ). De là il est aisément d'écrire  $Z_{eq}$ .

Pour une tension donnée, en l'occurrence celle de l'essai à vide, nous pouvons déterminer  $I_1$  puis  $U_{h1}$  et donc  $I_2'$  puis  $I_2$  puis la puissance dissipée dans la charge ( $P_{ch}$ ), la puissance totale à l'entrée et enfin le rendement.

Les variables possibles sont celles du schéma équivalent:  
 $U_1, N_{b1}, N_{b2}, R_1, R_{2p}, X_{s1}, X_{s2p}, R_{fer}, X_{h1}, R_{ch}$   
 $j$  (partie imaginaire complexe) et les variables que vous définissez.

$$Z_1 = R_1 + jX_{s1}$$

$$Z_{h1} = (j * R_{fer} * X_{h1}) / (R_{fer} + j * X_{h1})$$

$$R_{ch}' = R_{ch} * (N_{b1} / N_{b2})^2$$

$$Z_{2p} = (R_{2p} + R_{ch}) + j * X_{s2p}$$

$$Z_{eq} = Z_1 + (Z_{h1} * Z_{2p}) / (Z_1 + Z_{2p})$$

De  $Z_{eq}$  nous pouvons tirer le  $\cos\phi$ .  $\phi$  étant l'argument de  $Z_{eq}$  complexe.  $\cos\phi$  peut maintenant être utilisé comme une variable.

Attention pour des questions de programmation, les variables ne sont pas écrites en complexe (souligné), mais tous les calculs sont complexes, excepté pour  $P_{ch}, P_{tot}$  et  $Rend$  où l'on repasse en normes.

Egalement pour des questions de programmation, les primés ' sont notés "p" dans les équations.

$$I_1 = U_1 / Z_{eq}$$

$$U_{h1} = U_1 - (Z_1 * I_1)$$

$$I_2' = U_{h1} / Z_{2p}$$

$$I_2 = I_2' * (N_{b1} / N_{b2})$$

Attention maintenant c'est des normes !

$$P_{ch} = R_{ch} * I_2^2$$

Attention maintenant c'est des normes !

$$P_{tot} = U_1 * I_1 * \cos\phi$$

$$Rend = 100 * (P_{ch} / P_{tot}) [\%]$$

Le dessin de la caractéristique théorique déterminée se trouve 2 onglets plus loin.

Dans l'onglet précédent nous avons déterminé le comportement en charge théorique (voir graphes de l'onglet suivant).

Ici nous allons effectuer des mesures sous la même tension :  $U_1 = 77$  [V]

Sachant que nous allons mesurer,  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $P_{tot}$  (appelé  $P_{tot}$ ),  $U_2$  et  $I_2$ , comment calcule-t-on :

Les mesures sont évidemment effectuées à entrefer nul et fonction du courant nominal :

Utiliser le wattmètre pour tout mesurer

- \*  $U_1$ ,  $I_1$  et  $P_{tot}$  sur le canal 1

- \*  $U_2$  et  $I_2$  sur le canal 2

Les mesures sont effectuées à entrefer nul ( $\Delta = 0$  mm) !!!

$$\cos_\phi = P_{tot} / (U_1 \cdot I_1)$$

$$P_{ch} = U_2 \cdot I_2$$

$$I_n = 0.4$$
 [A]

!!! IMPORTANT !!!  
FAIRE VÉRIFIER LE MONTAGE  
PAR UN ASSISTANT

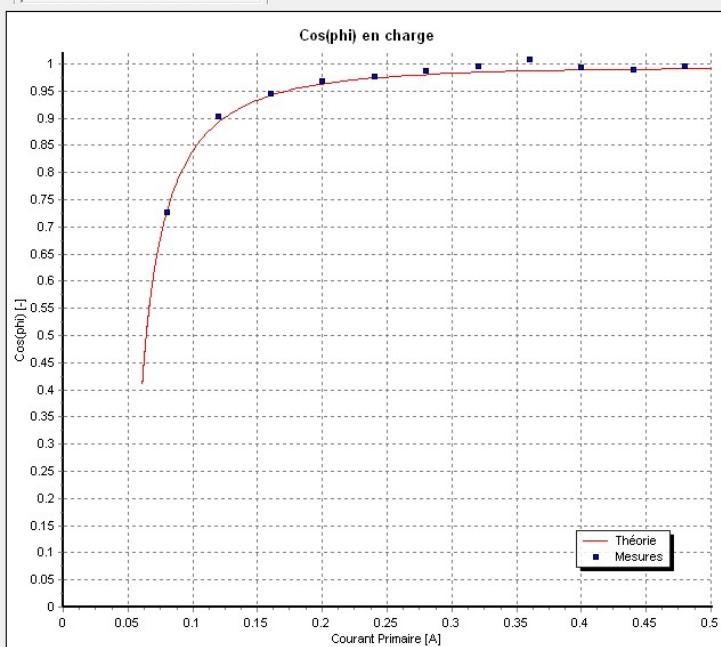
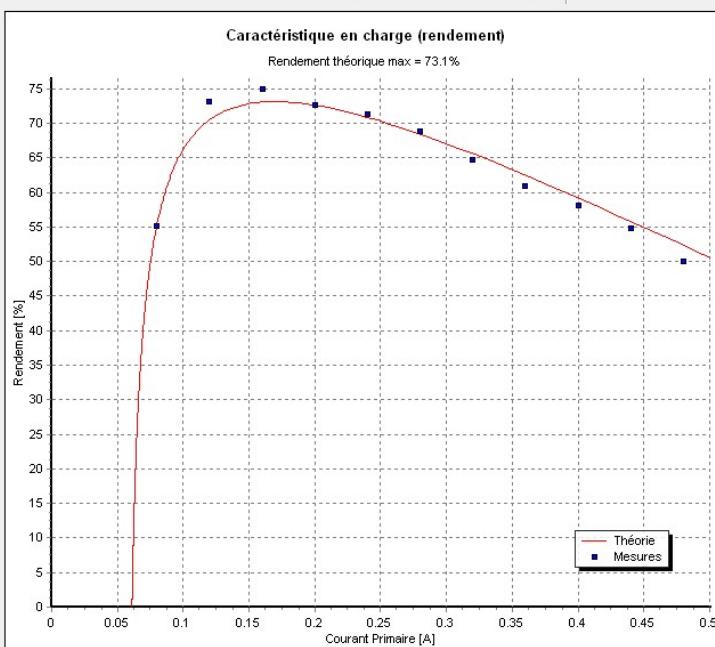
$U_1$ [V]	$I_1$ [A]	$P_{tot}$ [W]	$U_2$ [V]	$I_2$ [A]	$\cos_\phi$ [-]	$P_{ch}$ [W]	Rend [%]	
~1.2 In	71.7	0.48	34.27	12.6	1.36	0.996	17.14	50.0
~1.1 In	72.4	0.44	31.5	13.8	1.25	0.989	17.25	54.8
~1.0 In	72.9	0.4	29	14.9	1.13	0.995	16.84	58.1
~0.9 In	73.3	0.36	26.6	15.9	1.02	1.008	16.22	61.0
~0.8 In	74	0.32	23.6	17.14	0.89	0.997	15.25	64.6
~0.7 In	74.5	0.28	20.6	18.4	0.77	0.988	14.17	68.8
~0.6 In	75	0.24	17.6	19.6	0.64	0.978	12.54	71.3
~0.5 In	75.6	0.20	14.65	20.86	0.51	0.969	10.64	72.6
~0.4 In	76	0.16	11.5	22.1	0.39	0.946	8.62	74.9
~0.3 In	76.6	0.12	8.3	23.37	0.26	0.903	6.08	73.2
~0.2 In	77.4	0.08	4.5	24.8	0.10	0.727	2.48	55.1
~0.1 In								

Commentaires personnels :

- \* Pourquoi la tension utilisée est-elle celle de l'essai à vide ?
- \* ...

In: courant à ne pas dépasser (datasheet)

On utilise la tension à vide pour éviter la saturation. Avec la charge on craint moins la saturation (du circuit magnétique) qu'à vide car une partie du courant est délivrée à la charge.



Commentaires personnels :

- \* Courant nominal <=> rendement max ? dimensionnement du circuit magnétique ?
- \* Allure de la courbe de rendement, allure de la courbe de  $\cos(\phi)$
- \* Courant minimum (à vide) ...

Séparation en deux grandes phases:

- Rendement: d'abord quand la charge est trop grande et le courant  $I_2$  est nul, donc le rendement nul. Avec l'augmentation de la charge le courant augmente très vite jusqu'à atteindre un maximum. Ensuite il diminue à cause des pertes qui augmentent dans les résistances.

- cosphi: au début le circuit est inductif "on passe à gauche" et puis de plus en plus résistant