

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

CAPET INTERNE

GÉNIE ÉLECTRIQUE

Option : ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉNERGIE

SESSION 2001

EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE DE TRAVAUX PRATIQUES

Durée : 8 heures – Coefficient : 2

ÉLECTROTHERMIE

appliquée aux tables de cuisson

Référence du sujet : « CUI - 1 »

ORGANISATION DES DOCUMENTS :

Les documents remis au candidat sont les suivants :

- | | |
|---|------------|
|  Sujet : | (11 pages) |
|  Documents ressources : | (19 pages) |

**LE PRÉSENT SUJET ET TOUS LES DOCUMENTS RESSOURCES SERONT LAISSÉS SUR
LE POSTE DE TRAVAUX PRATIQUES EN FIN DE SÉANCE**

RAPPELS DES CONDITIONS DE L'ÉPREUVE

OBJECTIF DE L'ÉPREUVE

Cette épreuve permet d'évaluer les savoirs et savoir-faire caractéristiques des champs technologiques du Génie Électrique option Électrotechnique et Énergie, et de les exploiter à des fins d'enseignement.

DÉROULEMENT DE L'ÉPREUVE

Le sujet proposé nécessite la mise en œuvre de tout ou partie d'un système au travers d'une activité de travaux pratiques.

PREMIÈRE PARTIE : TRAVAUX PRATIQUES (4 HEURES)

Le candidat est conduit à :

- **analyser** et **mettre en œuvre** le travail pratique demandé ;
- **évaluer** la qualité des résultats obtenus.

DEUXIÈME PARTIE : EXPLOITATIONS PÉDAGOGIQUES (4 HEURES)

Le candidat est conduit, à partir du travail pratique réalisé dans la première partie, à :

- **proposer** une exploitation pédagogique se référant au programme de première et/ou de terminale du baccalauréat technologique sciences et techniques industrielles – spécialité génie électrotechnique. Cette exploitation pédagogique peut comprendre une ou plusieurs séquences d'enseignement et elle doit permettre au candidat de :
 - **définir** les objectifs de l'exploitation pédagogique qu'il propose ;
 - **situer** sa ou ses séquences d'enseignement dans la progression de l'année ;
 - **justifier** les choix pédagogiques retenus (cours, **travaux pratiques**, travaux dirigés, modes d'organisation et stratégies) pour atteindre les objectifs fixés (**la démarche inductive devra être privilégiée**) ;
 - **préciser** les documents utilisés par le professeur, ceux qui sont remis aux élèves ainsi que les matériels et les équipements utilisés ;
 - **indiquer** les modalités d'évaluation prévues.

CRITÈRES D'ÉVALUATION DE L'ÉPREUVE

L'épreuve permet d'évaluer :

- la **pertinence** de l'organisation proposée ;
- la **maîtrise** des savoirs et savoir-faire caractéristiques du champ technologique concerné ;
- le **niveau** de la réflexion pédagogique conduite par le candidat ;
- la **connaissance** des contenus d'enseignement et des finalités de la discipline et de la spécialité ;
- la **qualité** des documents techniques produits (particulièrement leur teneur) ;
- les **qualités** d'expression et de communication.

PREMIÈRE PARTIE TRAVAUX PRATIQUES

TEMPS CONSEILLE

- **analyse** du travail pratique demandé : **1 heure 30 minutes**
- **mise en œuvre** du travail pratique demandé : **2 heures**
- **évaluation** de la qualité des résultats obtenus : **0 heure 30 minutes**

BILAN THERMIQUE D'UNE TABLE DE CUISSON A INDUCTION

1) Introduction

Les procédés de chauffage à partir de l'énergie électrique sont nombreux. Parmi ces procédés le chauffage par induction est très répandu notamment dans le domaine grand public (électroménager).

On vous propose de réaliser l'essai d'une table de cuisson grand public ayant pour objectif d'établir le bilan énergétique de l'appareil.

2) Quelques rappels

2-1) Notion de chaleur massique

Un corps de masse m à une température θ présente une énergie calorifique W telle que :

$$dW = d\theta \cdot m \cdot c$$

Énergie calorifique en Joule
Température en °C
Masse en kg
Chaleur massique en J/°C.kg

C est la chaleur massique.

Par exemple, pour élever un gramme d'eau d'une température de 1°C il faut une énergie de 4,18 Joules (soit une calorie). La chaleur massique de l'eau est de 4 180 J/°C.kg.

2-2) Notion de résistance thermique

Un corps à la température θ dans un milieu ambiant à la température θ_a présente une énergie calorifique qui évolue plus ou moins rapidement suivant la résistance thermique R_{th} qui existe entre les deux milieux :

$$\frac{dW}{dt} = \frac{\theta - \theta_a}{R_{th}}$$

W
 dt
 $^{\circ}C$
 $^{\circ}C/W$

Cette variation de l'énergie calorifique correspond à une puissance D appelée **déperdition**.

$$D = \frac{dW}{dt} = \frac{\theta - \theta_a}{R_{th}}$$

A partir des équations précédentes on peut établir la relation permettant de prévoir l'évolution de la température d'un corps chauffé avec une puissance P :

$$P dt = m \cdot c \cdot d\theta + \frac{\theta - \theta_a}{R_{th}} dt$$

Ces notions de résistance thermique et de déperdition sont applicables à condition qu'il ne se produise pas de changement d'état des corps auxquels on s'intéresse (par exemple lorsqu'on maintient de l'eau à ébullition, la température n'évolue plus et c'est le changement de phase qui absorbe l'énergie apportée).

3) TRAVAIL DEMANDE

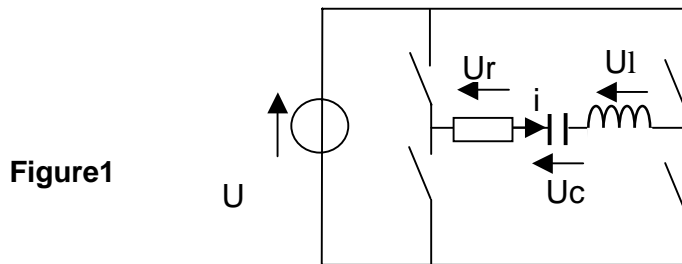
Le travail demandé comporte trois parties :

- Partie **A** : Travail préparatoire (analyse).
- Partie **B** : Travail expérimental.

Les **deux** parties doivent être traitées par le candidat.

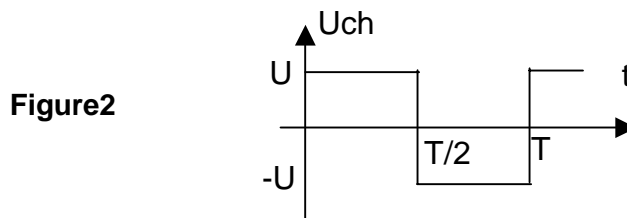
PARTIE A : Travail préparatoire

A-1) On donne le schéma de principe d'un onduleur de tension travaillant sur une charge résonnante.



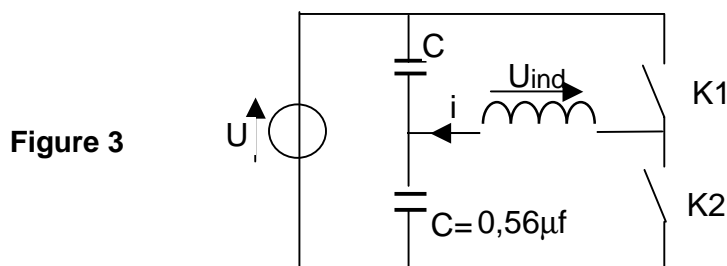
A la résonance, les tensions U_I , U_c , U_r et le courant i , sont assimilés à des allures purement sinusoïdales :

- A-1-1) Tracer le diagramme de Fresnel des tensions et du courant à la résonance.
- A-1-2) En déduire l'expression de la pulsation de résonance.
- A-1-3) Quelle sera la valeur de l'impédance constituée par la charge RLC de l'onduleur à la résonance ?
- A-1-4) La charge RLC est alimentée par une tension en créneau comme indiquée figure 2 :



- A-1-4-1) Établir le développement en série de Fourier du signal figure 2.
- A-1-4-2) Donner l'expression de la tension fondamentale efficace.
- A-1-4-3) En déduire l'expression de la puissance transmise à la résonance.

A-2) On donne le schéma simplifié de la table de cuisson figure 3 :



Les interrupteurs travaillent à la même fréquence et de façon complémentaire. Pour une période, K1 est fermé de 0 à αT et K2 est fermé de αT à T . On donne $\alpha=0,5$.

A-2-1) Comment est modifiée la pulsation de résonance par rapport au montage en pont complet de la figure 1 ?

A-2-2) Quelle sera l'expression de la puissance transmise à la résonance ?

A-3) On prend l'hypothèse de l'égalité de température de l'eau et de la casserole. La chaleur massique de l'acier est d'environ 500 Joules/°C.kg. La casserole en acier de 1 kilogramme est remplie avec 0,65 litre d'eau.

A-3-1) Établir l'équation permettant de prévoir l'évolution de la température de l'eau et de la casserole lorsqu'elle est chauffée à puissance constante P.

A-3-2) A partir de la courbe de refroidissement fournie en annexe, évaluer la résistance thermique R_{th} entre la casserole remplie et le milieu ambiant.

A-3-3) Combien de temps faudra-t-il pour porter l'eau de 30°C à 80°C si on chauffe à puissance constante de 2,56 kW ?

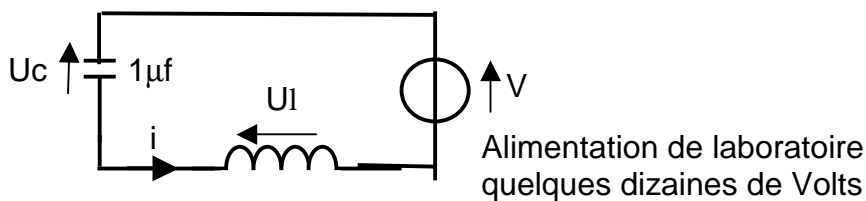
PARTIE B : TRAVAIL EXPÉRIMENTAL

B-1) Identification de la charge résonnante :

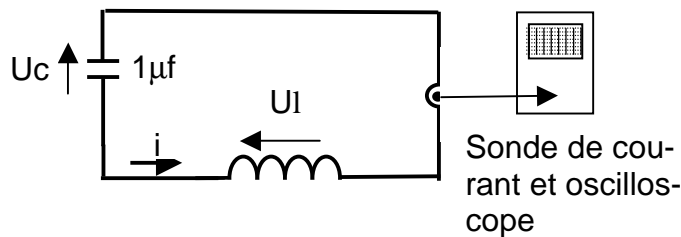
On propose d'identifier la charge résonnante à vide puis en charge par un essai indiciel. Le protocole d'essai proposé est le suivant :

On place en série avec l'inducteur séparé un condensateur de $1\mu F$.

Étape 1 : Charge du condensateur avec une alimentation de laboratoire à quelques dizaines de volts.



Étape 2 : Décharge du condensateur dans l'inducteur.



B-1-1) Justifier le protocole d'essai proposé.

B-1-2) Relever le courant instantané $i(t)$ dans l'inducteur à vide.

B-1-3) Relever le courant instantané $i(t)$ dans l'inducteur en charge. La charge est la casserole remplie avec 0,65 litre d'eau posée sur la plaque de cuisson.

B-1-4) On donne l'expression du courant instantané :

$$i_{(t)} = -\frac{C \cdot \omega_0 \cdot U_0}{\sqrt{1 - m^2}} e^{-m\omega_0 t} \sin \omega t$$

Dans cette expression :

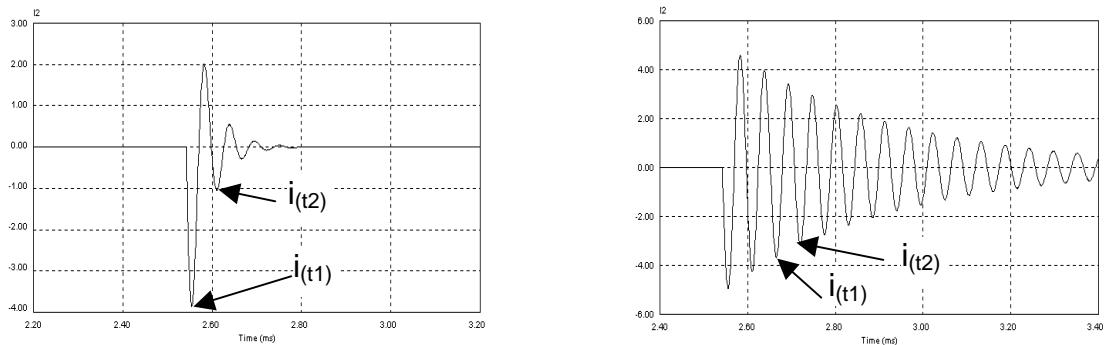
m est le coefficient d'amortissement $m = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$

ω_0 est la pulsation propre $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L.C}}$

ω est la fréquence d'oscillation telle que $\omega = \omega_0 \sqrt{1 - m^2}$

On obtient des formes d'ondes comparables à celles indiquées figure 4

Figure 4



Pour identifier les éléments R et L on fera l'approximation $\omega = \omega_0$

$i_{(t1)}$ et $i_{(t2)}$ sont deux maximum consécutifs du courant $i_{(t)}$

B-1-4-1) Montrer que dans ce cas m peut s'écrire $m = \frac{Lm \frac{i_{(t1)}}{i_{(t2)}}}{2\pi}$

B-1-4-2) Donner les valeurs de L et R inducteur à vide et inducteur en charge.

B-1-4-3) Justifier l'évolution de la résistance R entre la situation à vide et en charge.

B-1-4-4) On veut obtenir 2,5 kilowatt dans l'inducteur. Prédéterminer la valeur à donner à la tension U d'alimentation de l'onduleur.

B-2) Bilan thermique

B-2-1) A puissance maximale, réaliser un essai de montée en température des 650 grammes d'eau, en partant de la température ambiante jusqu'à l'ébullition.

- Mesurer la puissance moyenne absorbée au réseau.

Relever simultanément à l'oscilloscope :

- L'image de la puissance moyenne absorbée au réseau en fonction du temps.
- L'évolution de la température en fonction du temps.
- La fréquence et la valeur efficace du courant dans l'inducteur.

B-2-2) Mesurer et justifier à partir des éléments préparatoires le temps $T_{chauffe}$ nécessaire pour élever la température de l'eau de 50°C.

B-2-3) Calculer l'énergie absorbée au réseau pendant le temps $T_{chauffe}$.

Calculer l'énergie absorbée par la casserole et l'eau pendant le temps $T_{chauffe}$.

En déduire les pertes totales et le rendement de la table de cuisson.

B-2-4). On admettra en première approximation que la résistance de l'inducteur seul évolue peu en fonction de la fréquence :

Comment doit être réalisé l'inducteur pour obtenir l'indépendance de sa résistance vis à vis de la fréquence?

Evaluer les pertes dans l'inducteur .

Quelles sont les pertes non évaluées

Déduire de l'ensemble des résultats précédents l'énergie perdue en déperdition en précisant vos hypothèses.

Essai de refroidissement.

ANNEXE

masse d'eau

$$m_w = 650 \text{ g}$$

masse de la casserole

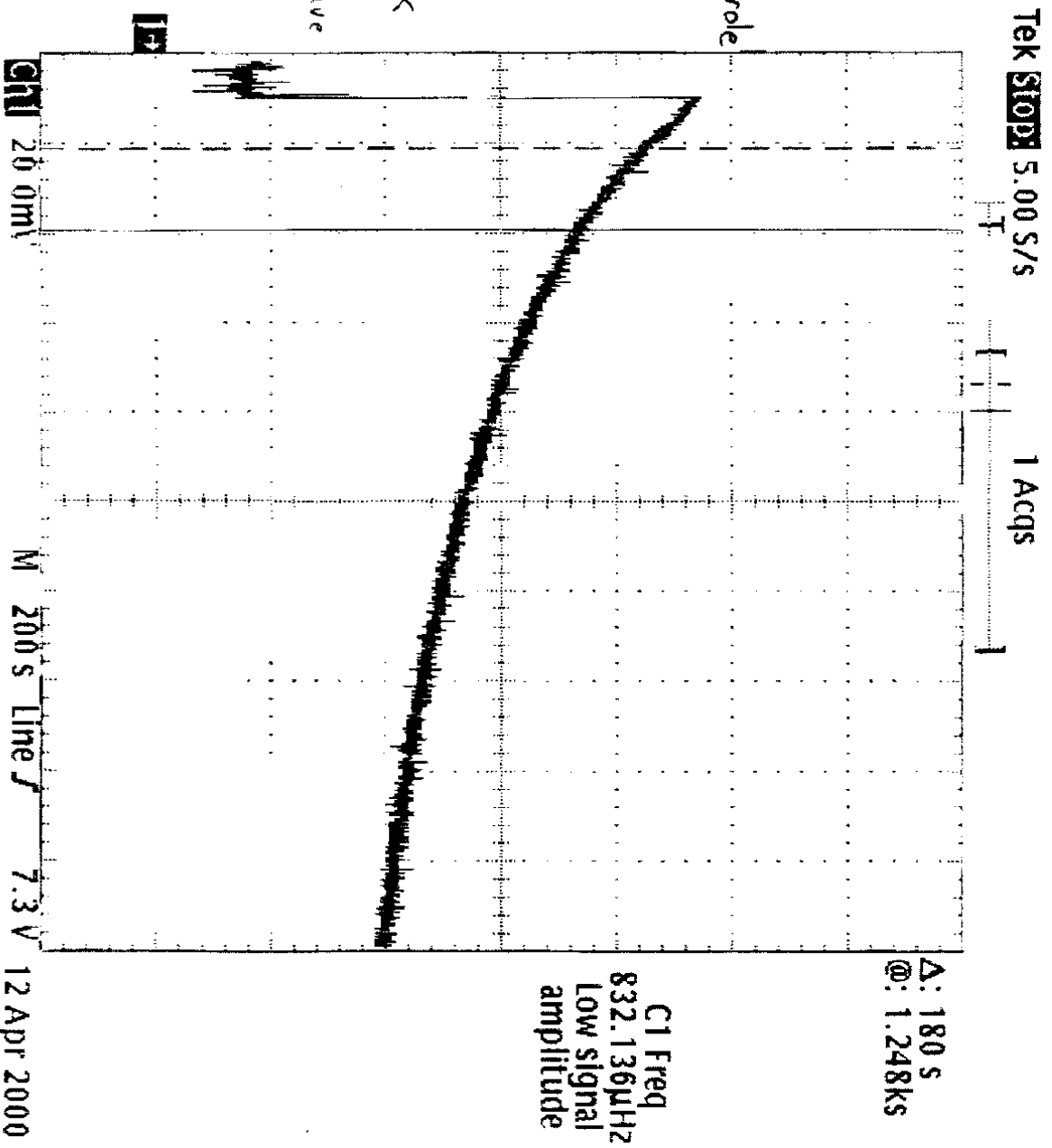
$$m_c = 1 \text{ kg}$$

Chaleur massique
de la casserole

$$C_c = 500 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

Echelle Temperature

$$1 \text{ mV} \rightarrow 1^\circ\text{C}$$



DEUXIÈME PARTIE

EXPLOITATIONS PÉDAGOGIQUES

TEMPS CONSEILLE

- **Conception** de l'exploitation pédagogique : **2 heures**
 - **Mise en forme** de l'exploitation pédagogique : **1 heure**
 - **Présentation** de l'exploitation pédagogique au jury : **1 heure** (temps imposé)
- La présentation de l'exploitation pédagogique au jury (durée 1 heure) sera articulée de la façon suivante :
- ◆ **Exposé du candidat** : 20 minutes.
 - ◆ **Entretien avec le jury sur les choix pédagogiques retenus, et technologiques** : 40 minutes.

QUESTIONS

A PARTIR DU TRAVAIL PRATIQUE RÉALISÉ DANS LA PREMIÈRE PARTIE DE L'ÉPREUVE :

- **Proposer** une exploitation pédagogique se référant au programme de première et/ou de terminale du baccalauréat technologique sciences et techniques industrielles – spécialité génie électrotechnique. Cette exploitation pédagogique peut comprendre une ou plusieurs séquences d'enseignement et elle doit permettre au candidat de :
 - **Définir** les objectifs de l'exploitation pédagogique qu'il propose ;
 - **Situer** sa ou ses séquences d'enseignement dans la progression de l'année ;
 - **Justifier** les choix pédagogiques retenus (cours, **travaux pratiques**, travaux dirigés, modes d'organisation et stratégies) pour atteindre les objectifs fixés (**la démarche inductive devra être privilégiée**) ;
- **Préciser** les documents utilisés par le professeur, ceux qui sont remis aux élèves ainsi que les matériels et les équipements utilisés ;
- **Indiquer** les modalités d'évaluation prévues.

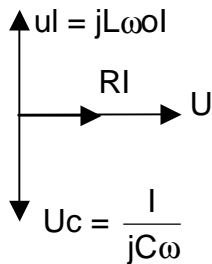
ÉLECTROTHERMIE

appliquée aux tables de cuisson

Référence du sujet : « CUI - 1 »

ÉLÉMENTS DE CORRIGÉ

A-1-1) A la résonance le diagramme de Fresnel est le suivant :



Les vecteurs u_l et u_c sont égaux en module. Ils sont en opposition de phase.

A-1-2) Les modules $u_l = jL\omega_0 I$ et $u_c = \frac{I}{jC\omega_0}$ sont égaux.

On en déduit la pulsation de résonance $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

A-1-3) L'impédance complexe est :

$$Z_{ch} = R + j \left(\frac{LC\omega^2 - 1}{C\omega} \right)$$

A la résonance, $\omega = \omega_0$ ce qui conduit à $Z_{ch} = R$

A-1-4-1) Le développement en série de Fourier de la tension $U(t)$ est :

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4U}{\pi n} \sin n\omega t$$

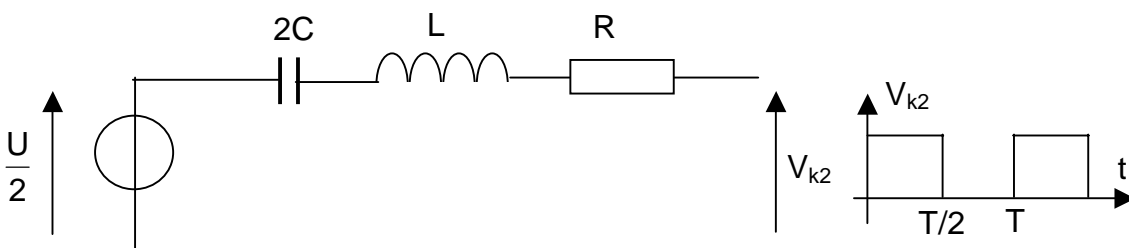
La valeur efficace du fondamental est alors :

$$U_{1eff} = \frac{2\sqrt{2}U}{\pi}$$

A-1-4-2) La puissance transmise est :

$$P = \frac{U_{1eff}^2}{R} = \frac{8 U^2}{R\pi^2}$$

A-2) Le générateur de Thévenin équivalent calculé entre les points a et b permet d'obtenir :



A-2-1) La pulsation de résonance devient :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{2LC}}$$

A-2-2) Il faut remplacer U par $\frac{U}{2}$ dans l'expression de la puissance exprimée précédemment. On obtient :

$$P = \frac{2U_2}{R\pi_2}$$

A-3)

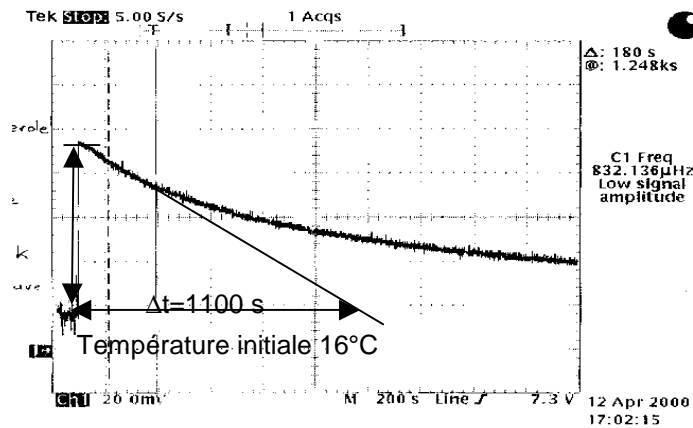
A-3-1) Il faut résoudre l'équation :

$$Pdt = m.c.d\theta + \frac{\theta - \theta_a}{R_{th}} dt$$

On obtient :

$$\theta = \theta_a + R_{th} P \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{th}\Sigma mc}} \right)$$

A-3-2) L'équation de la dérivée à $t = 0$ donne la pente à l'origine.



On obtient une constante de temps de 1 100 s

$$\Sigma mc = 500 + 0,65 \times 4 180 = 3 217 \text{ J/}^\circ\text{C}$$

La résistance thermique est de 0,34°C/W

A-3-3) Le temps de chauffage est :

$$t = -\left[\ln\left(1 - \frac{\theta - \theta_a}{R_{th}P}\right) \right] R_{th}\Sigma mc$$

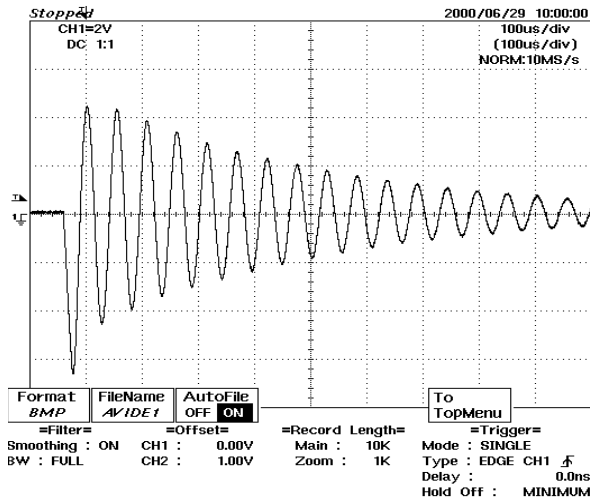
Avec les valeurs numériques :

$$t = -\left[\ln\left(1 - \frac{80 - 30}{0,34 \times 2560}\right) \right] 0,34 \times 3217 = 65 \text{ secondes}$$

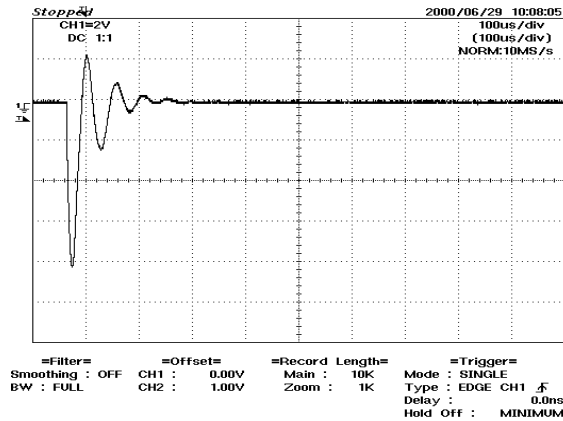
On prédétermine un temps de 65 secondes pour élever de 50°C la casserole contenant 0,65 litre d'eau.

B-1-1) Cette méthode permet de s'affranchir des éléments capacitifs, inductifs ou résistifs de la source d'alimentation qui charge le condensateur.

B-1-2) L'essai avec l'inducteur à vide donne :



B-1-3) L'essai avec l'inducteur en charge (casserole 1 kg et 0,65 litre d'eau) donne :



B-1-4)

B-1-4-1) L'expression du courant est :

$$i(t) = \frac{C \cdot \omega_0 \cdot U_0}{\sqrt{1-m^2}} e^{-m\omega_0 t} \sin \omega t$$

m étant le coefficient d'amortissement

$$m = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1-m^2}$$

Pour identifier les éléments R et L on fera l'approximation $\omega = \omega_0$

$i_{(t_1)}$ et $i_{(t_2)}$ sont deux maximums consécutifs du courant $i_{(t)}$ pour lesquels on peut écrire :

$$\sin \omega t_1 = \sin \omega t_2 = 1$$

$$i_{(t_1)} = K e^{-m\omega_0 t_1}$$

$$i_{(t_2)} = K e^{-m\omega_0 t_2} = K e^{-m\omega_0 (t_1 + T)}$$

le rapport entre les courants donne $\frac{i(t1)}{i(t2)} = e^{m\omega T} = e^{m2\pi}$

la valeur de m est :

$$\frac{\ln \frac{i(t1)}{i(t2)}}{2\pi}$$

B-1-4-2)

Inducteur à vide : $R_{vide} = 0,28 \Omega$ $L = 70 \mu H$

Cette valeur de R est probablement majorée par la résistance des connexions et du condensateur.

Inducteur en charge : $R = 3,4 \Omega$ $L = 68 \mu H$

B-1-4-3)

A vide, l'inducteur se comporte comme une inductance. La résistance est celle de l'inducteur seul : R_{vide} .

En charge l'ensemble casserole inducteur se comporte comme un transformateur très abaisseur en tension. L'inducteur compte 23 spires et la casserole 1spire.

En utilisant le modèle du transformateur la résistance mesurée en charge est vue du primaire :

$$R_{charge} = R_{vide} + 23^2 \times R_{casserole} \text{ d'où } R_{charge} \gg R_{vide}$$

B-1-4-4)

Pour déterminer la tension permettant d'installer 2,5 kW dans l'inducteur on utilise la relation établie lors de la question A-2-2.

$$P = \frac{2 U^2}{R\pi^2} \text{ soit : } U = \pi \sqrt{\frac{P \times R}{2}} = 3,14 \sqrt{\frac{2500 \times 3,4}{2}} = 205 \text{ V}$$

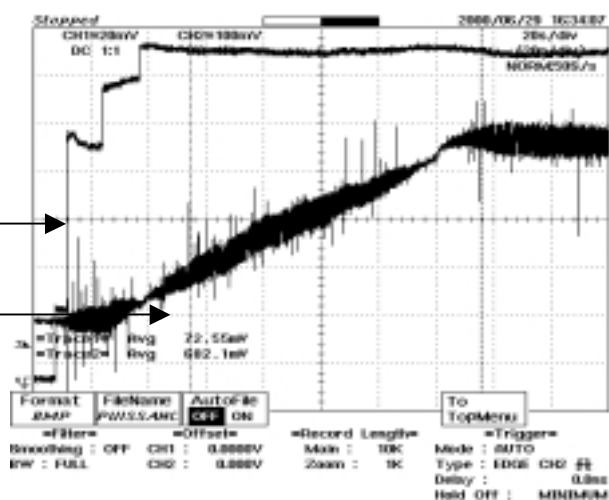
B-2-1) L'essai de montée en température montre une progression par paliers de la puissance appelée :

1 ^{er} palier	2 ^{ème} palier	3 ^{ème} palier	4 ^{ème} palier
600 W	1 900 W	2 400 W	2 600 W
5 secondes	12 secondes	14 secondes	permanent

Base de temps 20 s/division.

Puissance moyenne
380 W/div

Montée en température
20°C/div

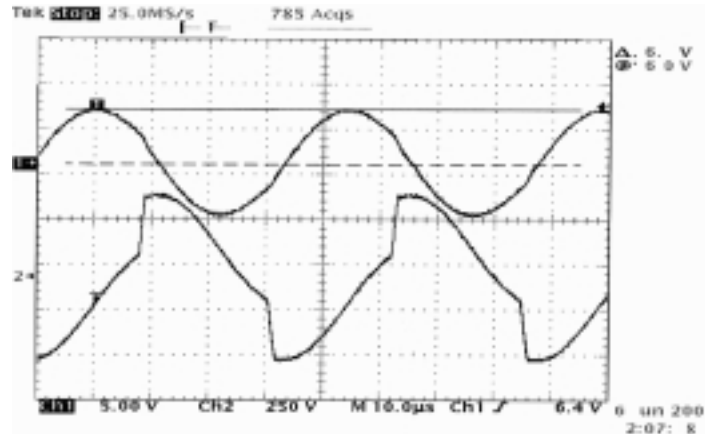


Le courant appelé dans l'inducteur est relevé avec deux bases de temps :

Base de temps 10 µs/division.

Relevé de la partie haute fréquence du courant dans l'inducteur.

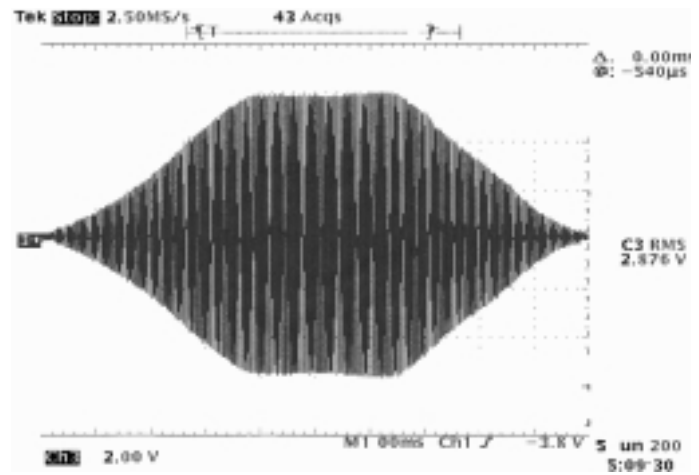
On observe une allure quasi-sinusoïdale du courant dans l'inducteur à une fréquence de 22 kHz proche de la fréquence de résonance. L'amplitude est de 61 Ampère



Base de temps 1 ms/division.

Relevé de la partie basse fréquence du courant dans l'inducteur.

On observe une allure de l'enveloppe identique à celle de la tension réseau à une fréquence basse de 100 Hz .



B-2-2) Sur le relevé de montée en température on mesure pour $\Delta\theta = 50^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 85 \text{ s}$

Cette mesure est supérieure aux 65 secondes précédemment calculées. La puissance mesurée n'est pas celle reçue par la casserole. Il y a les pertes dans le convertisseur et dans l'inducteur. De plus, le bruit sur la mesure de température rend la mesure imprécise.

B-2-3) L'énergie absorbée au réseau pour élever l'eau de 50°C est :

$$W_{\text{réseau}} = P \times T_{\text{chauffe}} = 2\,600 \times 85 = 221\,000 \text{ joules}$$

L'énergie absorbée par le corps de la casserole et l'eau est :

$$W_{\text{casserole+eau}} = \Delta\theta \times \Sigma mc = 50 \times (500 + 0,65 \times 4\,180) = 160\,850 \text{ joules}$$

On en déduit la somme des pertes :

$$W_{\text{perdue}} = W_{\text{réseau}} - W_{\text{casserole+eau}} = 221\,000 - 160\,850 = 60\,150 \text{ joules}$$

Ce qui correspond à une puissance perdue :

$$\text{Pertes} = \frac{W_{\text{perdue}}}{T_{\text{chauffe}}} = \frac{60150}{85} = 710 \text{ W}$$

Le rendement de la table est :

$$\eta = \frac{W_{\text{casserole+eau}}}{W_{\text{réseau}}} = \frac{160850}{221000} = 73 \%$$

B-2-4) L'inducteur doit être réalisé en fil de Litz pour s'affranchir de l'effet de peau.

Les pertes dans l'inducteur sont les pertes joules et les pertes fer dans les ferrites placées sous l'inducteur. Elles sont traduites par le produit de la résistance à vide et du carré de la valeur efficace du courant qui la traverse.

$$P_{\text{joule}} = R_{\text{vide}} \times I_{\text{eff}}^2 = 0,28 \times 28,7^2 = 230 \text{ W}$$

Cette valeur semble trop élevée. Il faudrait affiner la mesure de la résistance à vide en prenant en compte la résistance des connexions et du condensateur servant à l'identification.

Les pertes non évaluées sont les pertes dans le convertisseur qui sont les pertes dans les condensateurs et les semi-conducteurs.

En négligeant les pertes convertisseur on peut évaluer les déperditions :

$$W_{\text{réseau}} = W_{\text{casserole+eau}} + W_{\text{perdue}}$$

$$W_{\text{réseau}} = W_{\text{casserole+eau}} + W_{\text{pertes Joule}} + W_{\text{déperdition}}$$

On obtient pour les déperditions :

$$W_{\text{déperdition}} = W_{\text{réseau}} - (W_{\text{casserole+eau}} + W_{\text{pertes Joule}})$$

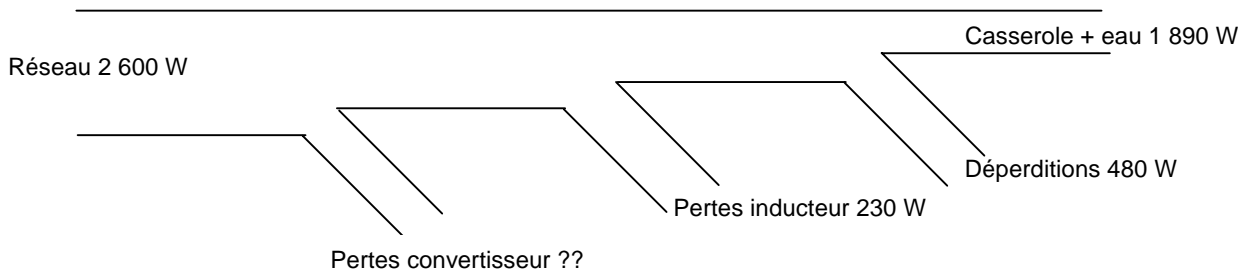
$$W_{\text{déperdition}} = 221\ 000 - 160\ 850 - 230 \times 85$$

$$W_{\text{déperdition}} = 40\ 600 \text{ J}$$

Ce qui correspond à une puissance perdue D :

$$D = \frac{40600}{85} = 480 \text{ W}$$

On peut conclure par « l'arbre » des puissances suivant :



Éléments de correction pour la partie pédagogique

Une qualité très importante des foyers de cuisson est la progressivité du réglage.

Cette qualité, désignée par « la souplesse » auprès des utilisateurs grand public, est un argument commercial pour promouvoir les plaques de technologie récente.

Pour répondre à cette contrainte de réglage, les constructeurs utilisent des solutions partiellement décrites dans les documents ressources à dispositions du candidat.

Différentes techniques sont utilisées suivant la nature technologique du foyer: radiant, halogène ou induction.

Le candidat dispose des trois types de plaque de cuisson et des documents nécessaires associés.

Le candidat pourra rédiger une séance de travaux pratiques dont l'objectif est d'analyser les solutions mises en œuvre pour le réglage de la puissance des foyers selon leur technologie.

Pour une classe de terminale STI option électrotechnique :

Réglage de la puissance par association de résistances pour les foyers radiants fonte.

Réglage de la puissance par régulation tout ou rien pour les foyers l'halogènes.

Réglage des foyers à induction par variation de fréquence puis par train d'ondes.

Le candidat :

- *Propose une fiche de travaux pratiques.*
- *Etablit ou énumère les documents ressources distribués aux élèves.*
- *Procède tout ou partiellement aux mesurages proposés aux élèves dans la fiche établie à leur intention.*
- *Rédige un compte rendu succinct mettant en évidence le niveau d'exigence souhaité, les compétences attendues et les modes d'évaluation.*