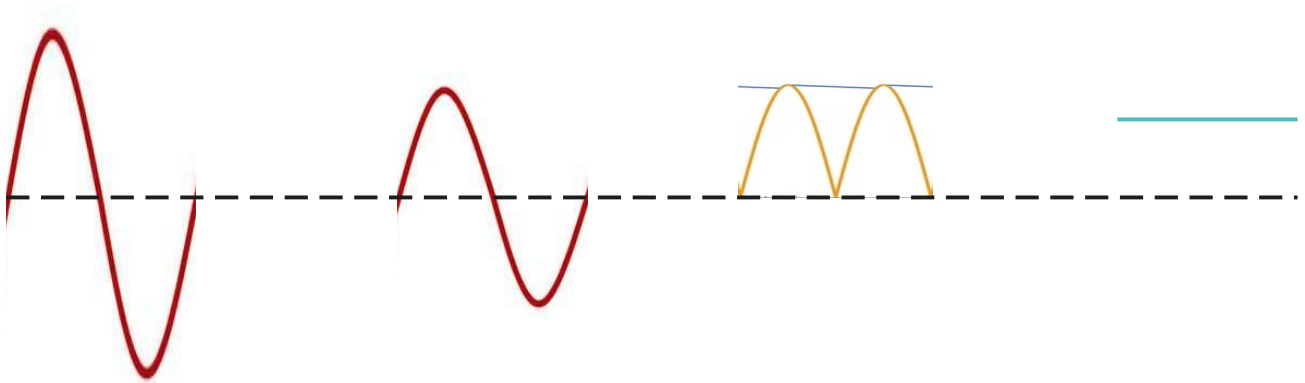
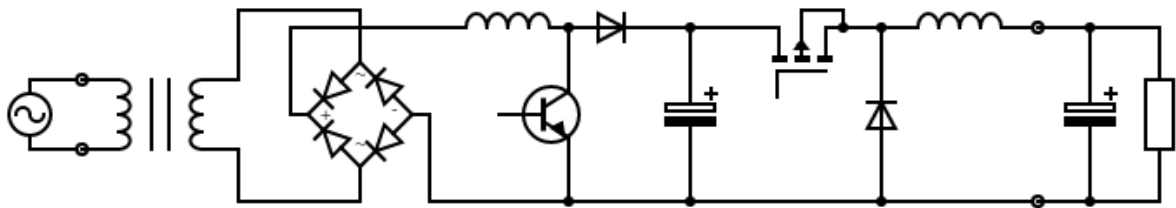


CONVERSION ET TRANSPORT DE L'ÉLECTRICITÉ

Support de Travaux Pratiques



Contacts

Dimitri Boudier – Responsable du module – CM, TP

dimitri.boudier@ensicaen.fr

Hugo Descoubes – CM

hugo.descoubes@ensicaen.fr

Matthieu Denoual – TP

matthieu.denoual@ensicaen.fr

Ressources

Toutes les ressources (supports CM, TP et outils) sont sur la page Moodle du cours :

<https://foad.ensicaen.fr/course/view.php?id=122>



Except where otherwise noted, this work is licensed under <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Consignes importantes

Du tonnerre de Zeus aux éclairs de Palpatine, en passant par Fatal Foudre de Pikachu, l'électricité a causé de nombreux dégâts. Aujourd'hui, c'est à votre tour d'être confronté aux dangers du 230 V. Voici quelques conseils pour survivre.

Arrêt d'urgence

En entrant dans la salle, **identifiez l'emplacement de tous les boutons d'arrêt d'urgence** (un sur chaque table, deux sur les murs).

Vous ferez attention, quand vous vous installerez autour des maquettes, à ne pas encombrer l'accès à ces boutons.

En cas de situation dangereuse, frappez les sans hésiter et sans retenue.



Vérification des montages

Pendant les séances, vous serez amené à réaliser et modifier des montages électriques.

Toute manipulation se fait obligatoirement hors tension.

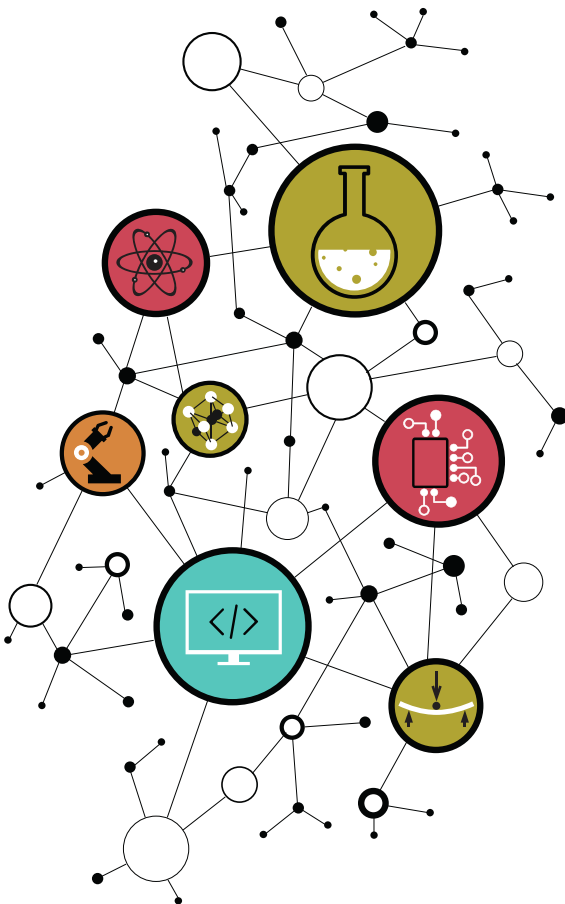
Toute installation doit faire l'objet de l'approbation de l'enseignant avant d'alimenter le montage.



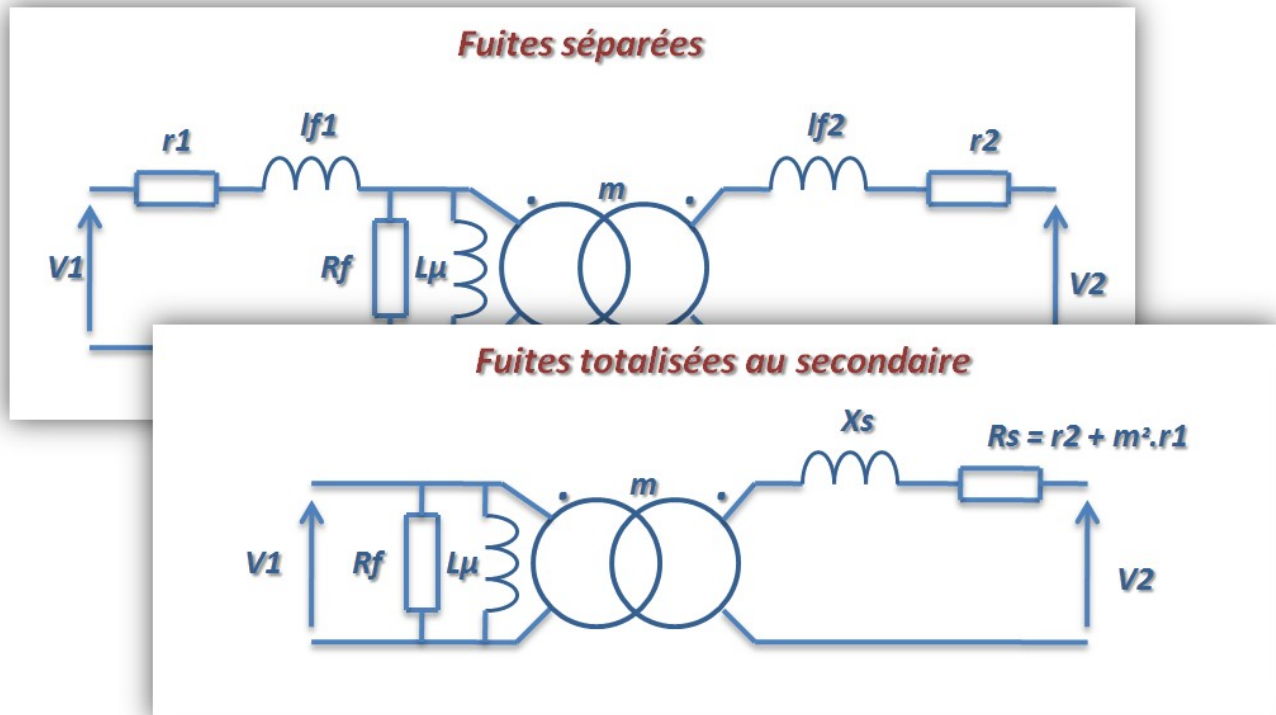
Les points du TP nécessitant une attention particulière sont signalés dans le sujet avec cet encart et ce logo.

CHAPITRE I

TRANSFORMATEUR MONOPHASÉ



Durant cet exercice, nous allons découvrir le transformateur monophasé et identifier son modèle. Le modèle étudié en cours est dit à fuites séparées : il est représentatif des phénomènes et défauts physiques présents dans le transformateur, mais n'est en revanche pas mesurable. Nous travaillerons donc avec un modèle mathématique équivalent purement théorique mais identifiable : **le modèle à fuites et pertes Joule totalisées au secondaire**.



Notre travail consistera donc à identifier les différents paramètres de ce modèle :

- $m = N2 / N1$: rapport de transformation
- R_s : résistance totale du transformateur ramenée au secondaire (pertes Joule)
- X_s : réactance totale du transformateur ramenée au secondaire (fuites)
- R_f : résistance modélisant les pertes fer (courants de Foucault et hystérésis)
- $L_\mu \cdot \omega = X_\mu$: réactance magnétisante (énergie stockée dans le circuit magnétique)

Voici les informations présentes sur la plaque signalétique du transformateur :

- Tension nominale primaire = 230 V (V1n)
- Tension nominale secondaire = 115 V (V2n)
- Courant nominal primaire = 4 A (I1n)
- Courant nominal secondaire = 8 A (I2n)
- Puissance apparente nominale = 1000 VA (Sn)



Certaines des mesures et tests qui suivent peuvent être destructeurs pour les appareillages de TP. Gardez donc toujours sous les yeux une mesure des courants au primaire et au secondaire.

Faire valider votre montage par l'enseignant encadrant avant chaque test !

I.1. Pertes par effet Joule

Les résistances des bobinages du transformateur se mesurent en continu. Pour cela on applique dans la bobine un courant continu proche de la valeur nominale, amenant celle-ci dans des conditions d'échauffement proches du matériel en service. En mesurant la tension aux bornes de la bobine, on en déduit sa résistance.



Soyez très prudent, les résistances font quelques fractions d'Ohms. Cela signifie que quelques Volt suffiront à appeler le courant nominal !

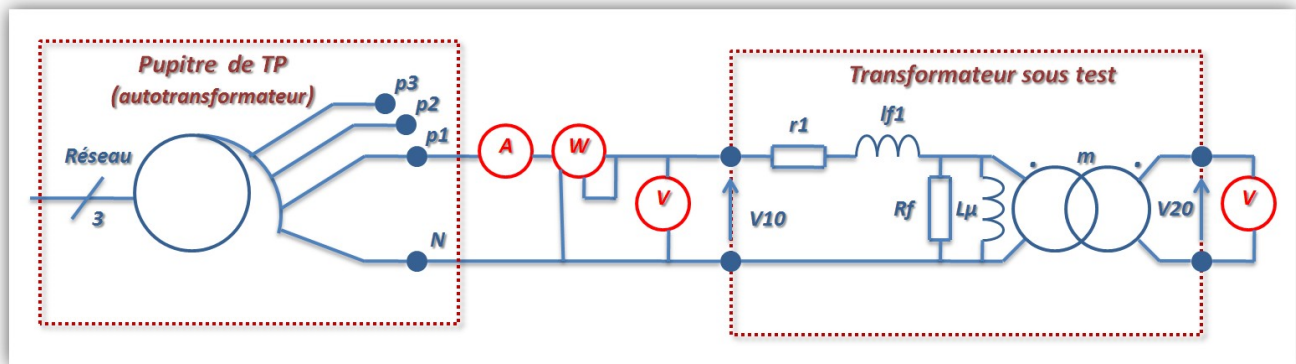
- Mesurez la résistance de l'enroulement primaire (entrée - rouge) :

- Mesurez la résistance de l'enroulement secondaire (sortie - bleu) :

- Pourquoi la résistance de la bobine au secondaire est-elle plus faible que celle côté primaire ?

I.2. Essai à vide

Lors d'un essai à vide, le transformateur n'est pas chargé : le courant circulant dans le secondaire est donc supposé nul. Vous pouvez d'ailleurs constater qu'à vide, le schéma électrique du transformateur peut-être simplifié :



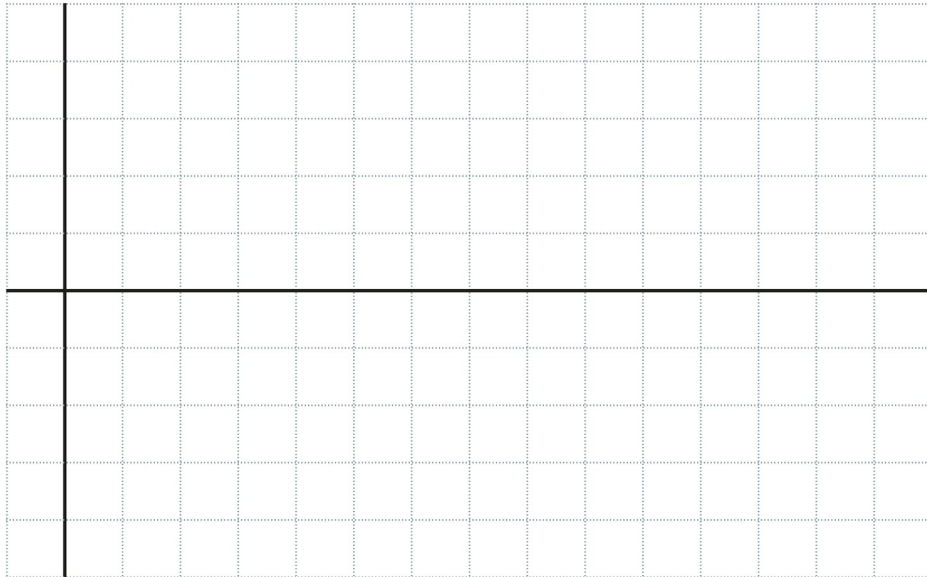
L'essai à vide permet de mesurer le rapport de transformation m , la résistance modélisant les pertes fer R_f ainsi que la réactance magnétisante X_μ .

Placez les appareils de mesure nécessaires pour mesurer les grandeurs suivantes, puis effectuez les différentes mesures. Le transformateur sous test sera alimenté à sa tension nominale par un autotransformateur présent sur le pupitre de TP, sachant qu'à partir de maintenant les tests se feront en régime sinusoïdal.

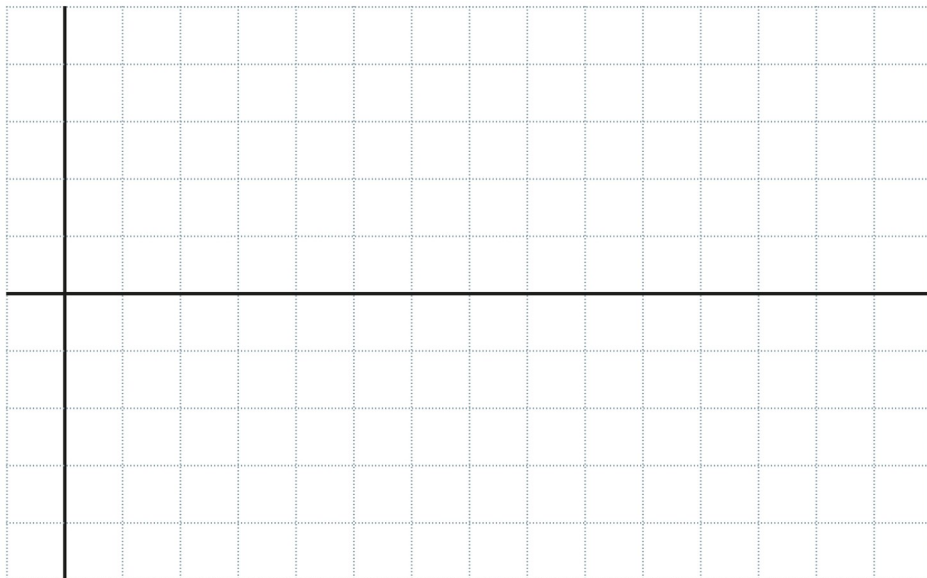
- Tension primaire V_{10} (à vide) =
- Tension secondaire V_{20} (à vide) =
- Courant primaire I_{10} (à vide) =
- Puissance active absorbée au primaire P_{10} (à vide) =

Vous allez observer l'allure du courant dans le primaire $i_{10}(t)$ en fonction du temps, à l'aide d'une sonde à effet Hall.

Imposez une tension au primaire égale à **10 % de V_{1n}** (tension nominale), et reportez ici le tracé de la tension au primaire $v_{10}(t)$ (à vide) et du courant au primaire $i_{10}(t)$ (à vide).



Imposez maintenant une tension au primaire à **V_{1n}** et relevez à nouveau les courbes.



Expliquez les différences d'allure du courant entre les deux situations.

La puissance de pertes par hystérésis P_m dans le noyau magnétique s'exprime par :

$$P_m = S \cdot L \cdot f \int_0^B H \cdot dB$$

S : Section du circuit magnétique
 L : Longueur du circuit magnétiques
 f : Fréquence du cycle de magnétisation
 H : Champ magnétique [$A \cdot m^{-1}$]
 B : Densité de flux magnétique [T]

Mais ces grandeurs sont difficilement mesurables. On se contentera, à l'aide des informations suivantes, de tracer une caractéristique image de $B = f(H)$ à partir de grandeurs directement mesurables sur notre maquette.

D'une part, un bobinage constitué de N spires et parcouru par un courant I génèrera un champ magnétique H selon la relation $H = N \cdot I / L$, L étant la longueur du circuit magnétique dans lequel circule le champ. Le champ magnétique H est donc directement proportionnel au courant circulant dans le bobinage.

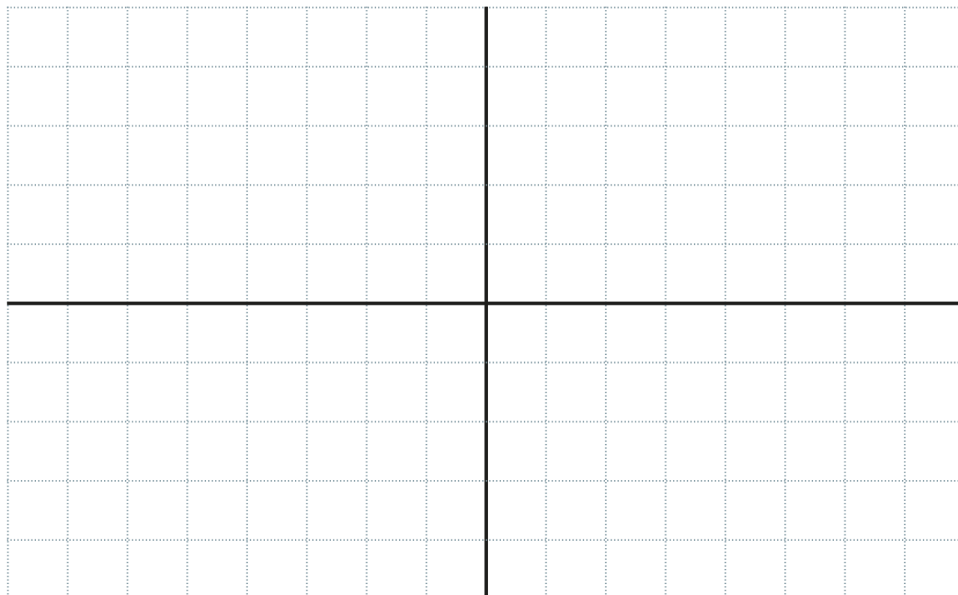
D'autre part, la tension induite aux bornes d'un bobinage (de N spires) traversé par un flux magnétique φ génère une force électro-motrice (f.e.m.) notée e :

$$e = -N \frac{d\varphi}{dt} = -N \cdot S \frac{dB}{dt}$$

Ainsi, pour un bobinage soumis à une flux magnétique sinusoïdal, la tension induite est l'image de la densité de flux magnétique B , avec un déphasage de 90° .

À l'aide des informations de cette page et des grandeurs mesurables sur la table, relevez en mode XY **l'image** du cycle d'hystérésis $B = f(H)$, les pertes par hystérésis dans le noyau magnétique étant proportionnelles à l'aire de ce cycle.

Appelez l'enseignant si besoin !



Il n'y a aucun courant circulant au secondaire et nous négligerons la chute de tension au primaire liée à la résistance de pertes Joule et de fuites. Sachant que le transformateur n'est pas chargé, la puissance active absorbée n'est qu'une puissance de pertes. Nous mesurons en fait les pertes fer et pertes Joule côté primaire .

- Déduire de vos mesures le rapport de transformation ?

- Déduire de vos mesures la valeur de la résistance totale ramenée au secondaire R_s , modélisant les pertes fer ($\propto P_{10}$). Nous négligerons la chute de tension au primaire.

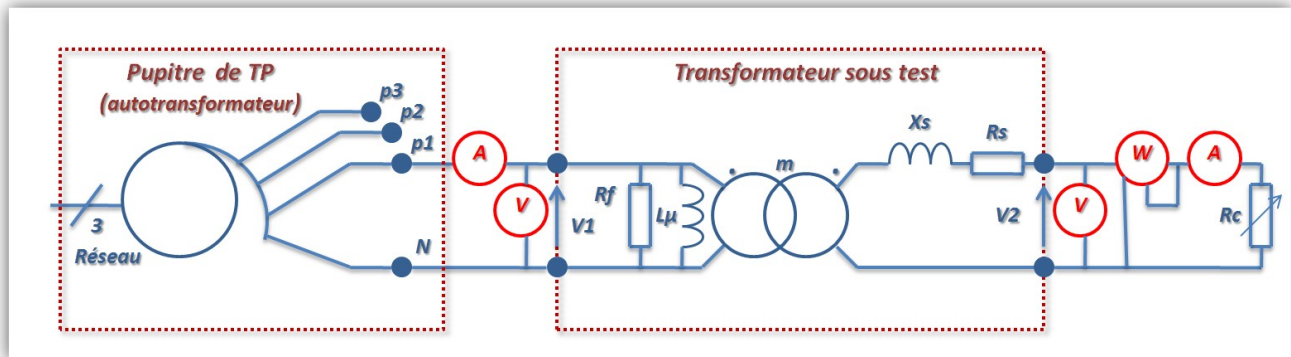
- Déduire de vos mesures les puissances apparente S_{10} et réactive Q_{10} .

- Déduire de vos mesures la valeur de la réactance magnétisante X_μ ($\propto Q_{10}$). Nous négligerons les fuites magnétiques au primaire.

- Quel type de puissance absorbée est prédominante (puissance active ou puissance réactive) ? Est-ce cohérent ? Pourquoi ?

I.3. Essai en court-circuit

Cet essai permet si nécessaire de retrouver la valeur du rapport de transformation et de la résistance R_s modélisant les pertes Joule ramenées au secondaire. Il permet également d'estimer la réactance de fuites ramenées au secondaire X_s .



Soyez très prudent, en court-circuit les valeurs nominales des courants sont très rapidement atteintes sous des niveaux de tension faible de quelques Volts !

Placez les appareillages de mesure nécessaires à mesurer les grandeurs suivantes, puis effectuez les différentes mesures :

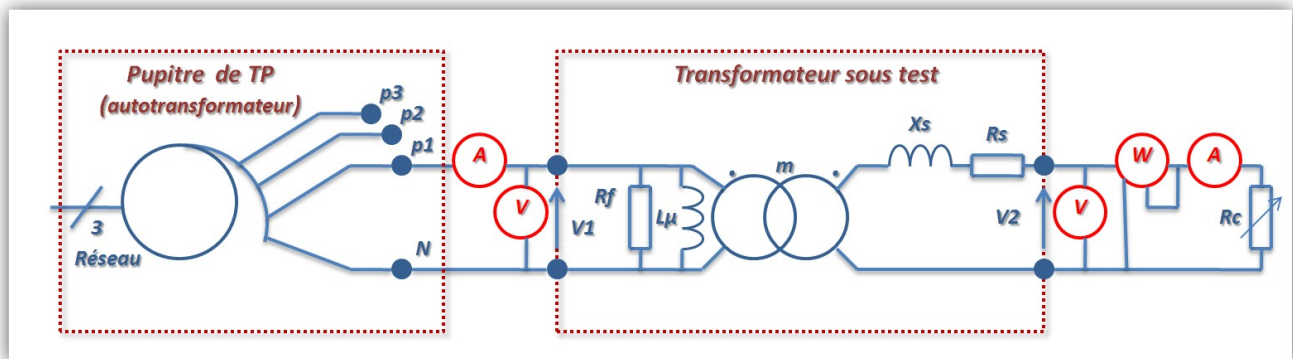
- Tension primaire $V1_{cc}$ (en court-circuit) =
- Courant primaire $I1_{cc}$ (en court-circuit) =
- Courant secondaire $I2_{cc}$ (en court-circuit) =
- Puissance active absorbée au primaire $P1_{cc}$ (en court-circuit) =

En court-circuit (charge nulle) la puissance active absorbée n'est qu'une puissance de pertes due aux pertes Joule et aux pertes fer. Sous ces niveaux de tension (très faibles), nous pouvons alors négliger les pertes fer.

- Déduire de vos mesures la valeur de la résistance totale ramenée au secondaire R_s , modélisant les pertes Joule du transformateur ?
- Déduire de vos mesures la valeur de la réactance totale de fuites ramenée au secondaire X_s ?

I.4. Essai en charge résistive

Cet essai charge sera réalisé sur un charge résistive. Durant cet essai nous allons mesurer la chute de tension au secondaire du transformateur. Nous devons attaquer le transformateur sous sa tension nominale puis la garder constante. En faisant varier la résistance de charge nous demanderons un courant plus ou moins important sans jamais dépasser le courant nominal.



La valeur théorique ΔV de la chute de tension au secondaire du transformateur est donnée par la formule de Kapp :

$$\Delta V = R_s \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_2) + X_s \cdot I_2 \cdot \sin(\varphi_2)$$

- Remplissez le tableau ci-dessous. Vous devez travailler sous $V_2 = V_{2n}$.

I_2 (A)	0									$I_2 = I_{2n}$
V_2 (V)										
$\cos\varphi_2$										
ΔV (V)										

- À quoi devons-nous le fait que $\Delta V \propto R_s \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_2)$?
- Sur une charge purement inductive, à quoi serait égale ΔV et pourquoi ?

I.5. Rendement

Le rendement d'un transformateur peut-être obtenu par le calcul ainsi que par la mesure. Il s'agit du rapport entre la puissance utile appelée par la charge côté secondaire (sortie) sur la puissance absorbée au primaire.

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{absorbée}}} = \frac{V_2 \cdot I_2 \cos(\varphi_2)}{V_2 \cdot I_2 \cos(\varphi_2) + P_{\text{fer}} + R_S \cdot I_2^2}$$

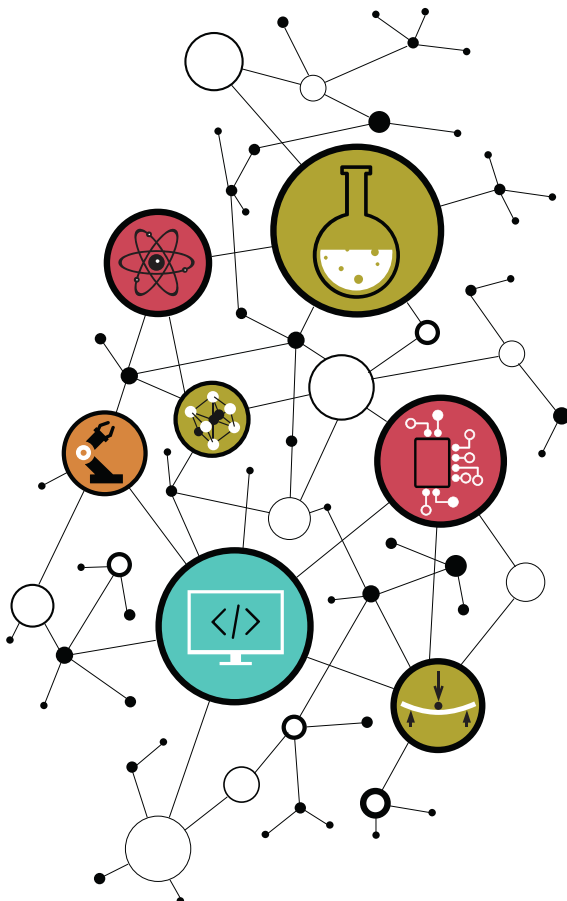
- Placez-vous au fonctionnement nominal puis mesurez le rendement du transformateur pour une charge résistive. Comparez la valeur obtenue avec la valeur théorique déduite des précédents test.

- Verdict, un transformateur, même pour des puissances relativement faibles, possède-t-il un bon rendement ?

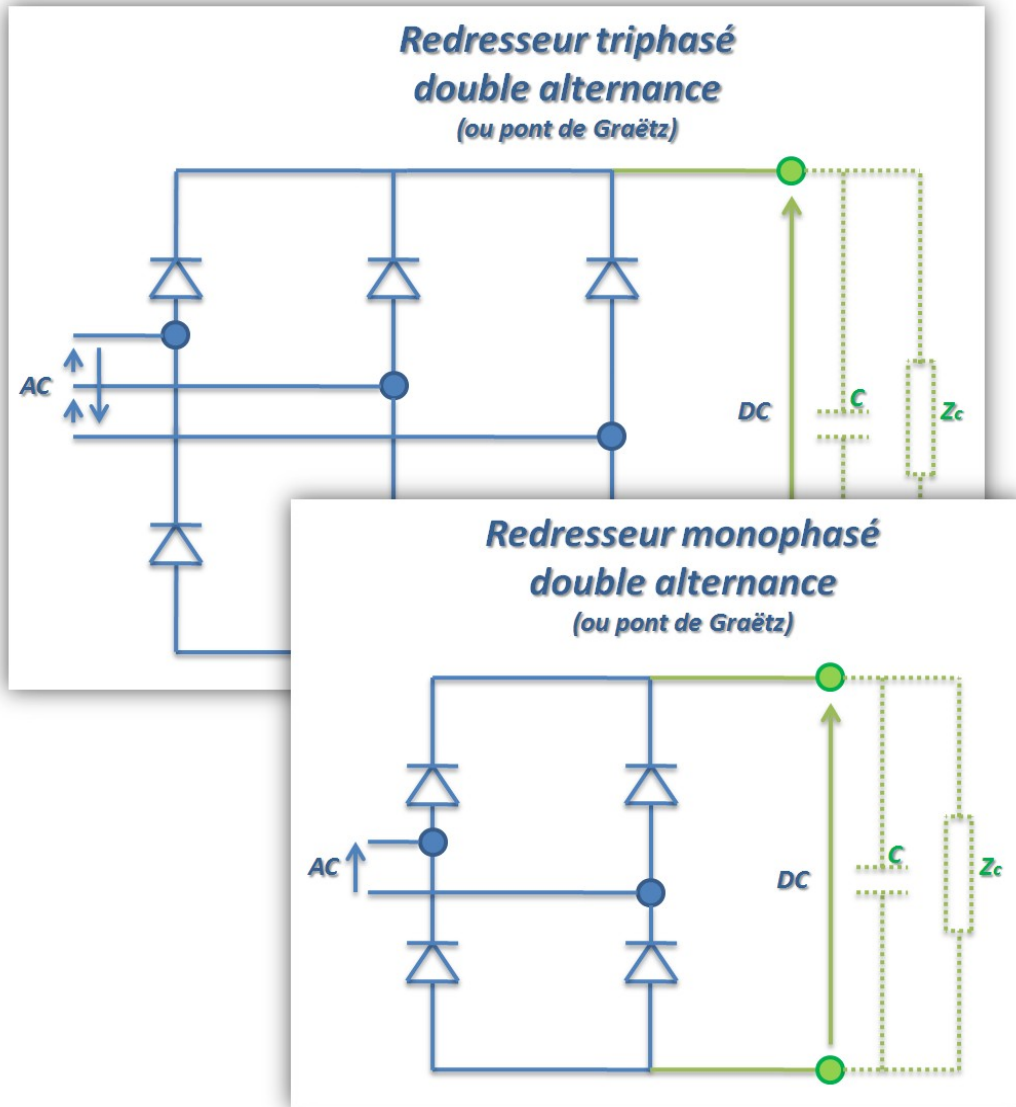
Pour rappel, les rendements peuvent atteindre près de 99% pour les transformateurs en haute tension présents sur le réseau de transport RTE.

CHAPITRE II

REDRESSEUR



Nous allons, à travers ce TP, découvrir le fonctionnement du redresseur double alternance à 4 diodes, plus communément appelé pont de Graëtz. Le redresseur sous test sera alimenté par un autotransformateur présent sur le pupitre de TP. Soyez prudent à bien respecter les consignes énoncées ci-dessous.

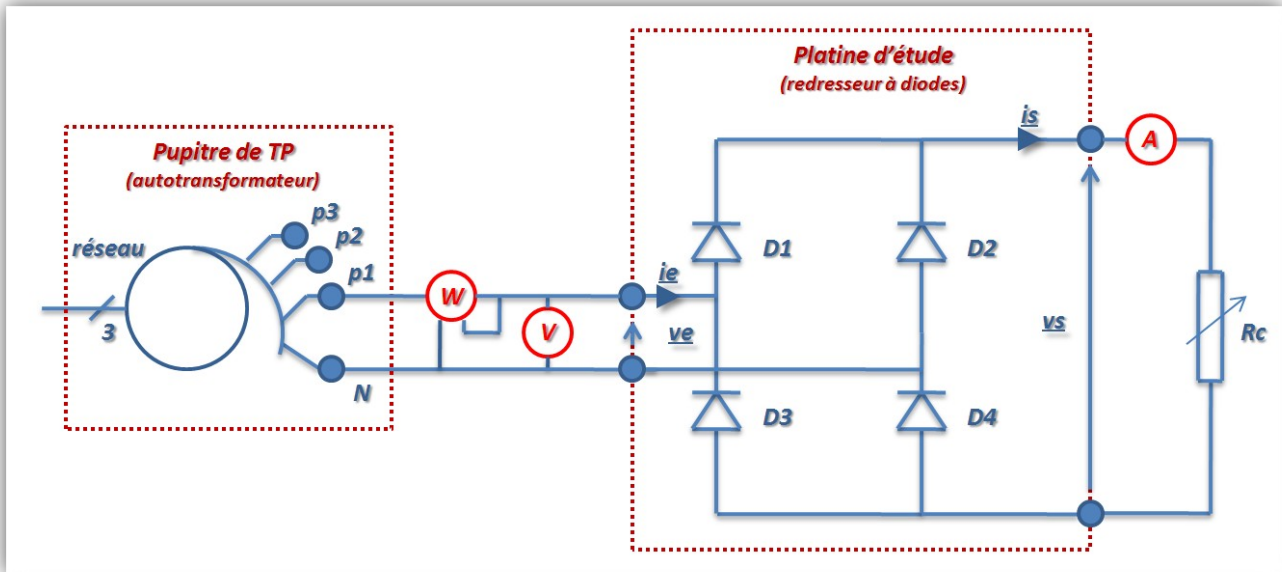


Les différents composants utilisés durant ce TP sont dimensionnés pour des calibres de tension et de courant relativement faibles.

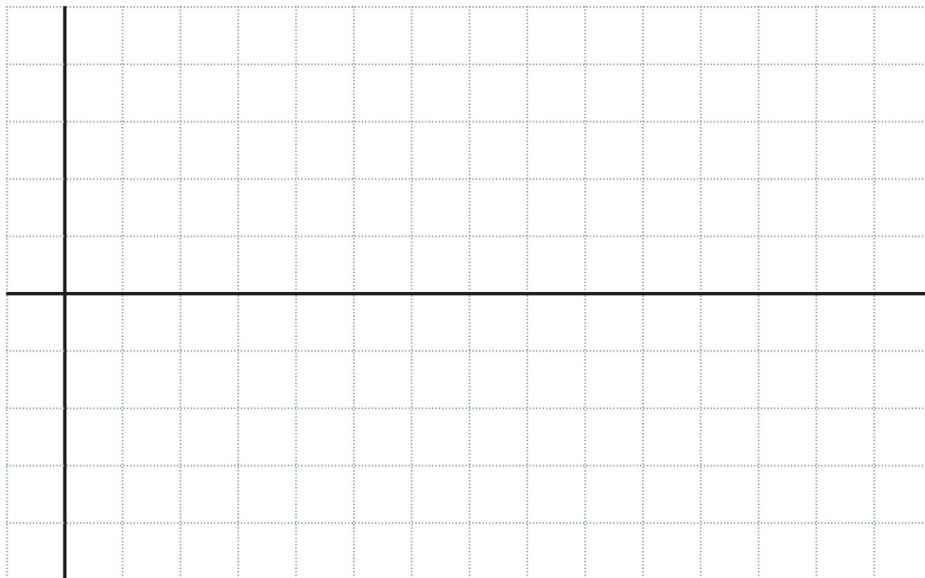
Ne dépassez pas 30 V en valeur efficace maximum en entrée et 3 A en valeur maximum du courant moyen dans la charge.

Faire valider votre montage par l'enseignant encadrant avant chaque test !

II.1. Redresseur monophasé, charge résistive

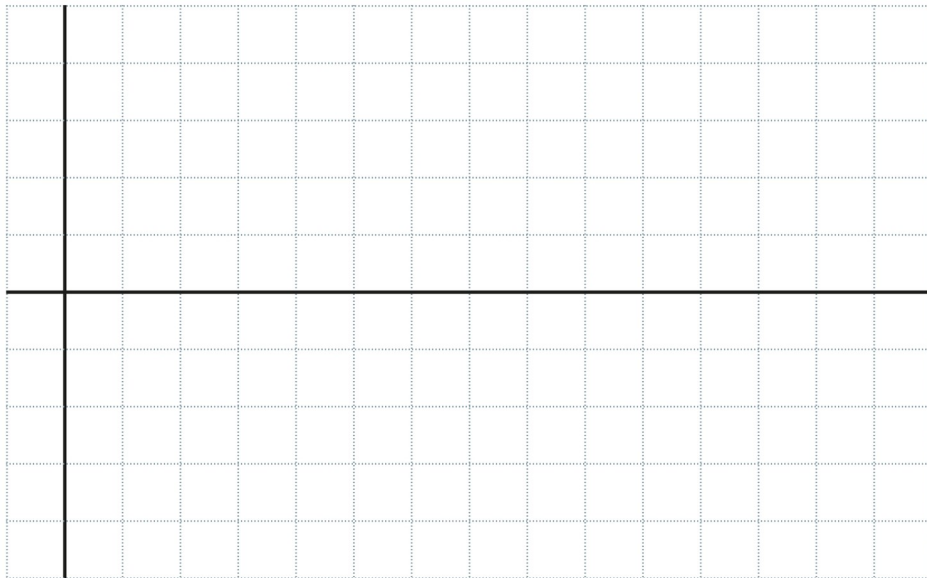


- Visualisez à l'oscilloscope puis relevez les formes d'ondes des tensions $v_e(t)$ et $v_s(t)$



- Spécifiez sur le chronogramme précédent les intervalles de conduction des différentes diodes

- Donnez l'expression de la valeur moyenne de la tension de sortie. Nous prendrons $v_e(t) = V_e \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$ avec $f = 50 \text{ Hz}$ et $V_e = 30 \text{ V}$.
- Comparez la mesure de la valeur moyenne de la tension de sortie à la valeur théorique.
- Visualisez à l'oscilloscope puis relevez les formes d'ondes des tensions $v_e(t)$ et $i_e(t)$:



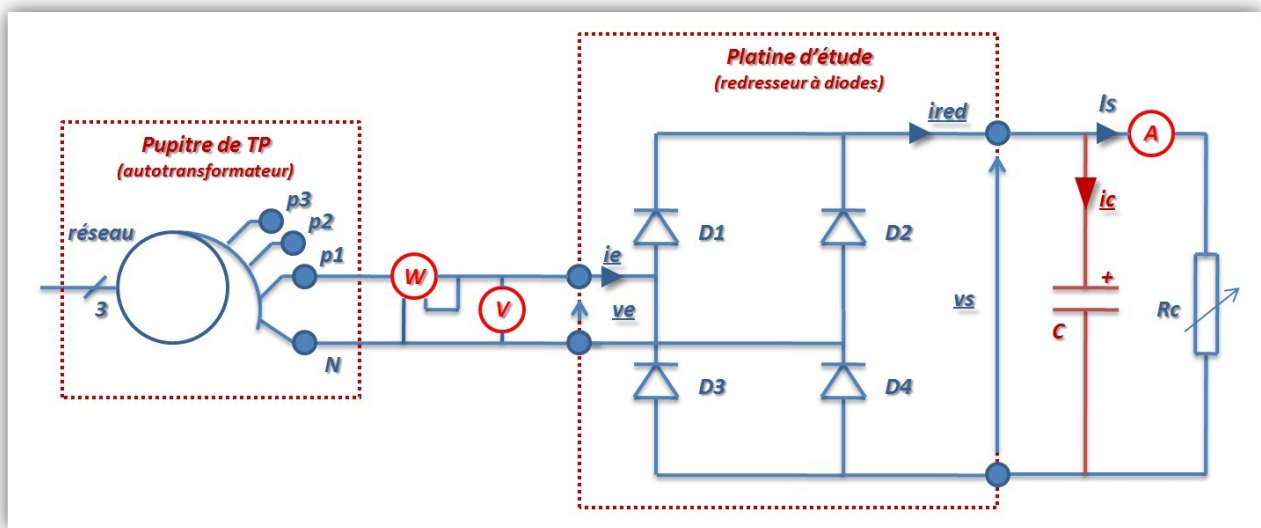
- Mesurez les puissances active et apparente en entrée du redresseur. Calculez le facteur de puissance $f_p = P / S$. Ce résultat est-il concluant ?

II.2. Condensateur de lissage

Nous avons jusqu'à présent réussi à redresser la tension d'entrée et de plus en offrant un facteur de puissance quasi unitaire. Tout ceci est parfait vu d'EDF.

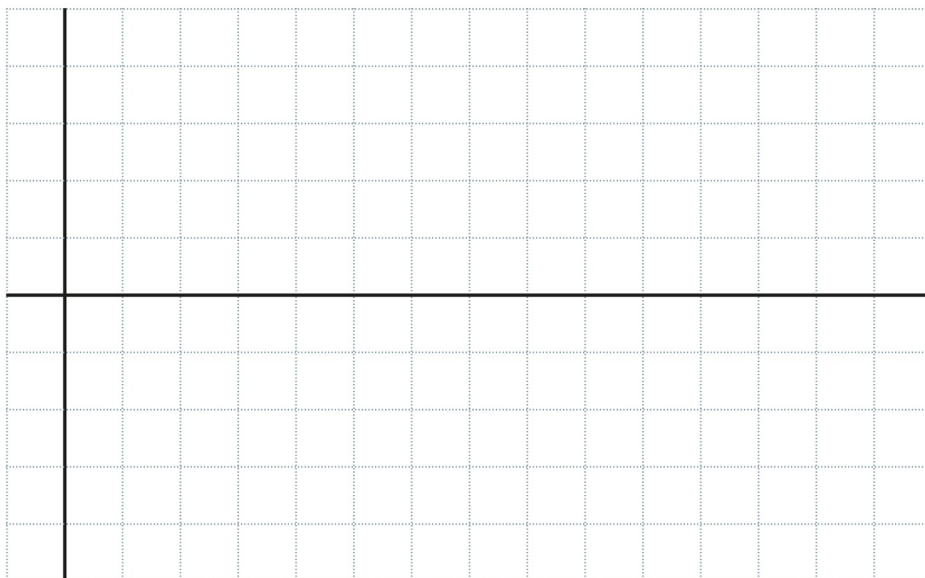
Cependant nous n'avons toujours pas obtenu une tension continue en sortie. Nous allons donc utiliser un condensateur de lissage (capacité en tête) afin d'y parvenir. En revanche, nous constaterons que nous allons y perdre sur certains aspects !

Dans l'exercice qui suit nous supposerons que le courant de sortie est parfaitement continu et que la constante de temps $R_c \times C$ est bien supérieure à une demi période du réseau (20 ms). Sur système réel, le dimensionnement du condensateur sera fait de telle sorte à respecter ces hypothèses !



Ajoutez en sortie du pont de Graetz le condensateur de 2200 μf qui vous est proposé. Câblez le schéma donné ci-dessus.

- Visualisez à l'oscilloscope puis relevez les formes d'ondes des tensions $v_e(t)$ et $v_s(t)$ (représentez également $-v_e(t)$) et indiquez les intervalles de conduction des diodes.



- En supposant que la pente observée durant la décharge du condensateur C dans R_c est linéaire, que le courant I_s est parfaitement continu et que la décharge se fait sur une demi période de $v_e(t)$, donnez l'expression simplifiée de l'ondulation de la tension de sortie ΔV_s en fonction de I_s , f et C .
- Du point de vu d'un industriel, imaginons que nous souhaitons avoir sur le bus continu une tension de $41 \text{ V} \pm 5\%$ sous un courant nominal moyen de 3 A . Quelle serait alors la valeur de capacité du condensateur de lissage ?
- Visualisez à l'oscilloscope puis relevez les formes d'ondes des tensions $v_e(t)$ et $i_e(t)$:



- Mesurez les puissances active et apparente en entrée du redresseur à capa en tête. Calculez le facteur de puissance $f_p = P / S$. Que déduisez-vous de ce résultat ?

Voici le gros inconvénient de ce type de montage : **le courant absorbé sur le réseau est un courant pulsé très riche en harmoniques**. Si nous ne faisons rien, à grande échelle, cela impliquerait un sur-dimensionnement des infrastructures sur le réseau EDF. Nous verrons des solutions de résolution par la suite !

- Ce montage absorbe-t-il de la puissance réactive ? Rappelez le théorème de Boucherot en régime sinusoïdal

Si les grandeurs, notamment les courants sont riches en harmoniques, l'expression de la puissance apparente S et donc du théorème de Boucherot s'écrit comme suit :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

Avec : $P = U \times I_1 \cos(\varphi_1)$

$$Q = U \times I_1 \sin(\varphi_1)$$

$$D = \sum_{k=2} U \times I_k \cos(\varphi_k)$$

D étant la puissance déformante portée par les harmoniques de courant.

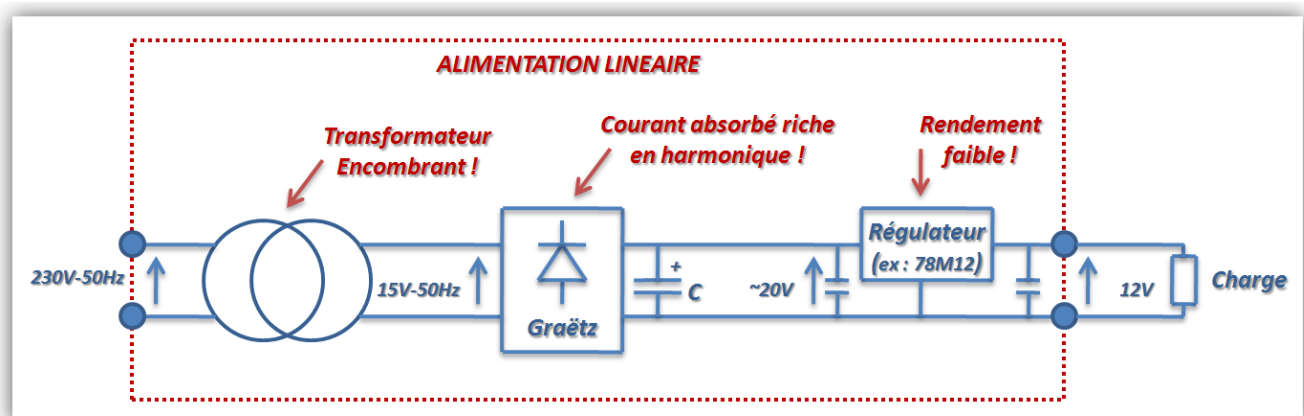
II.3. Bilan de puissance

- Donnez l'expression de la puissance utile absorbée par la charge ?
- Donnez l'expression de la puissance absorbée à l'entrée du redresseur ?
- Mesurez les puissances en entrée ainsi qu'en sortie du redresseur après le condensateur puis calculez le rendement du redresseur
- A quoi sont principalement dues les pertes dans un redresseur à diodes ?

Les alimentations anciennement rencontrées en électronique étaient des alimentations linéaires. Elles possédaient quelques gros inconvénients :

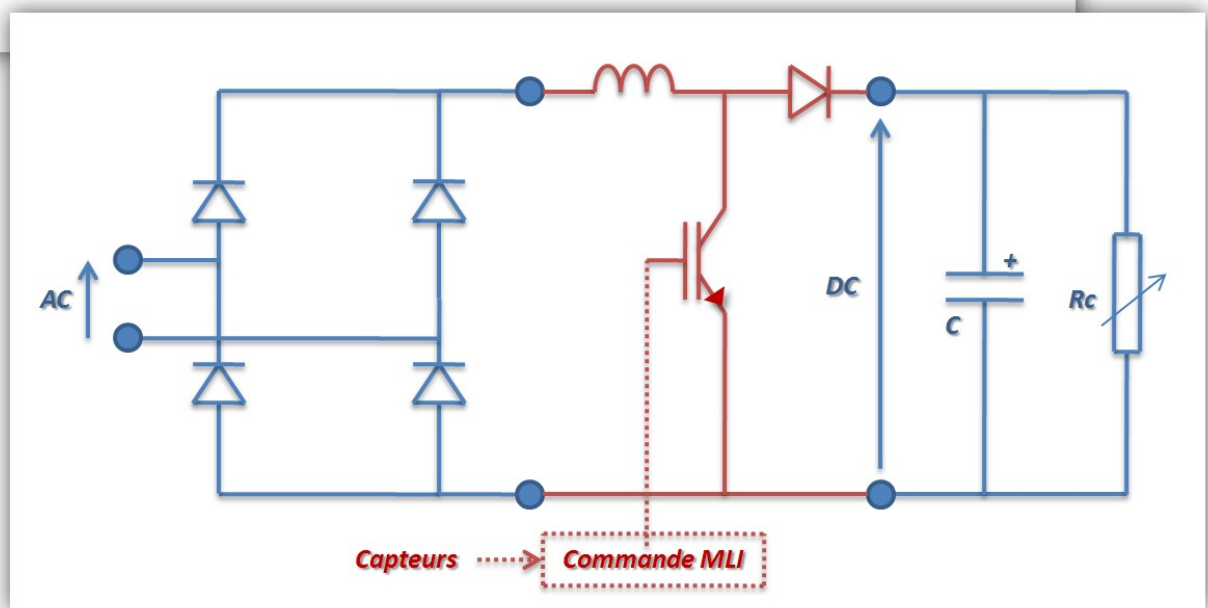
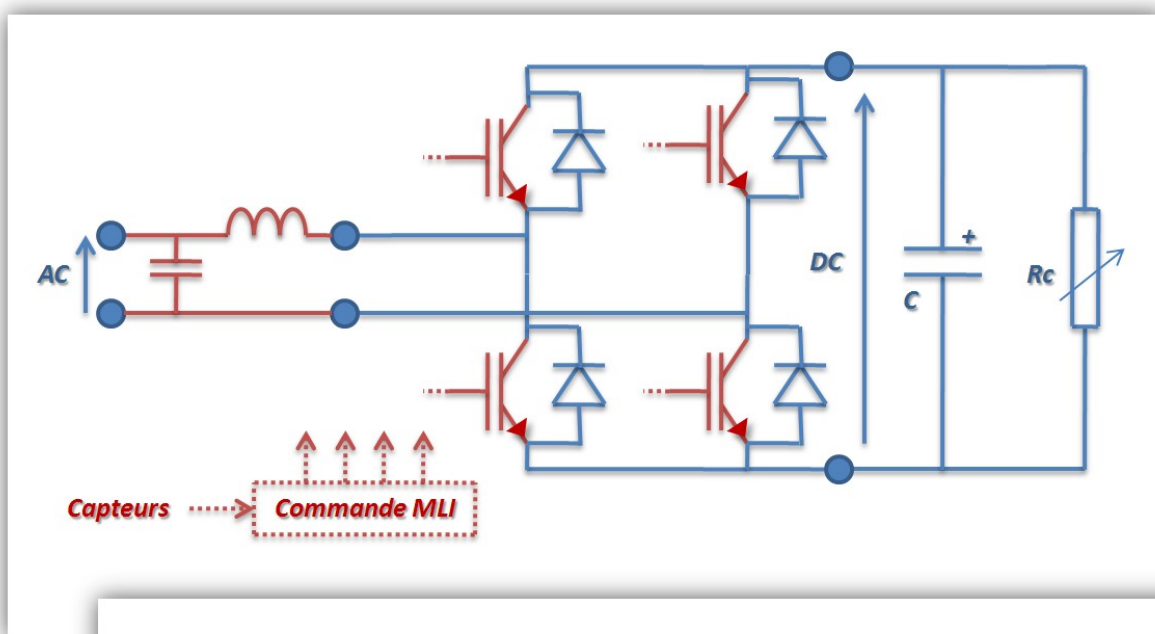
- Mauvais rendement
- Poids et encombrement
- Courant absorbé riche en harmoniques (cf. problème précédent)

Observons un exemple de d'alimentation linéaire afin de bien cibler les défauts ce type d'alimentation :

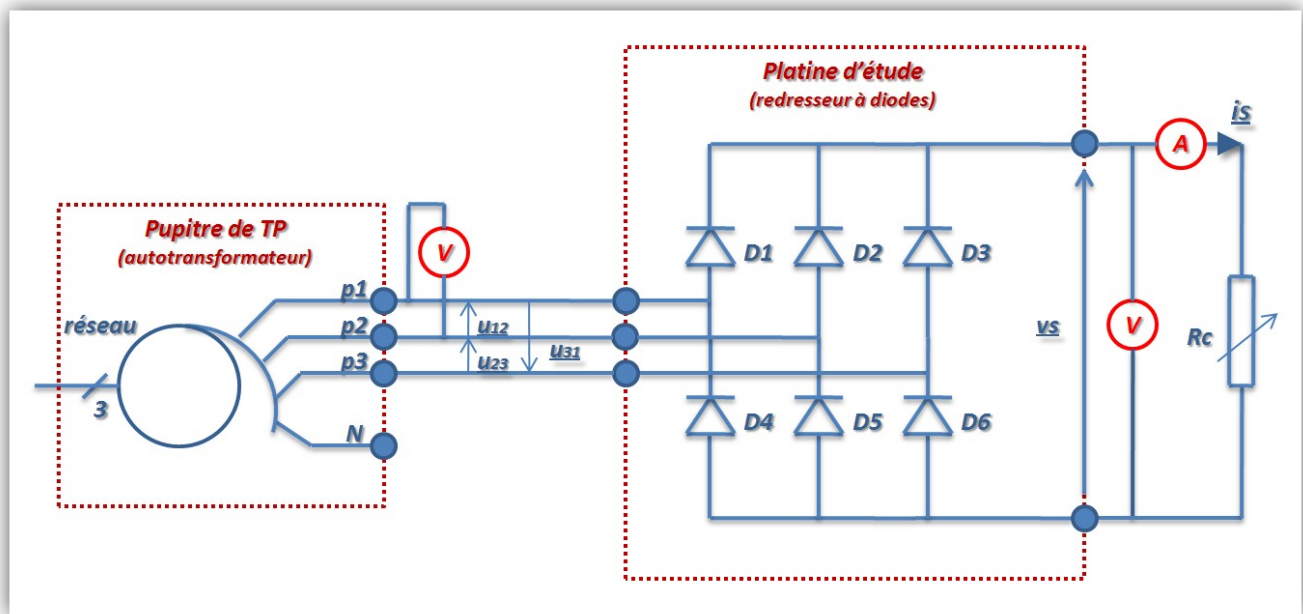


Les redresseurs dits **commandés** sont capables de redresser la tension d'entrée afin de stabiliser le niveau de tension sur le bus continu tout en absorbant un courant quasi sinusoïdal en phase avec la tension (facteur de puissance unitaire). Tout ceci n'est possible qu'en mettant en place une automatique de commande. Ce travail devient alors du ressort d'un automaticien.

Prenons deux exemples de solutions (les plus rencontrées) à base d'IGBT ou de MOSFET :

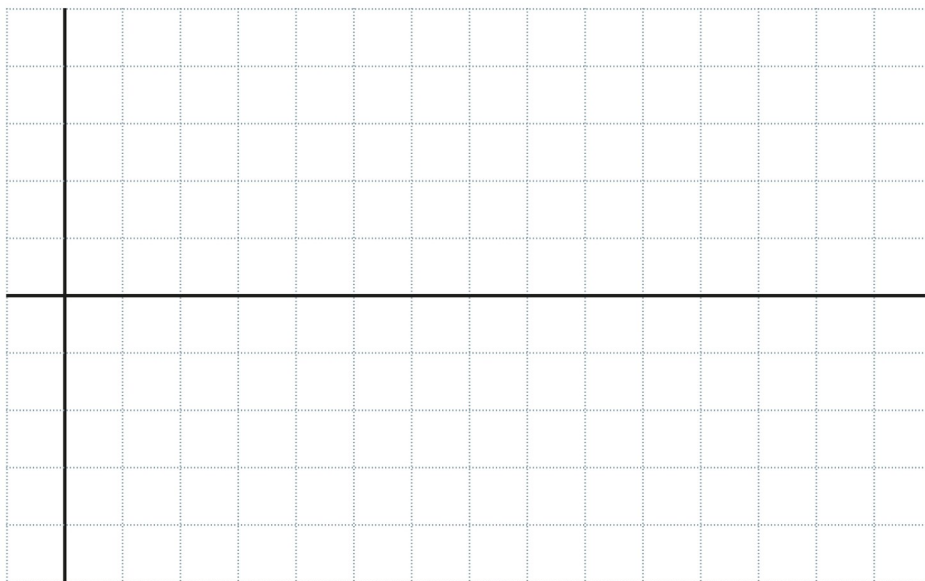


II.4. Redresseur triphasé, charge résistive



Attention à ne pas dépasser les 30 V efficace entre phases concernant l'alimentation du redresseur !

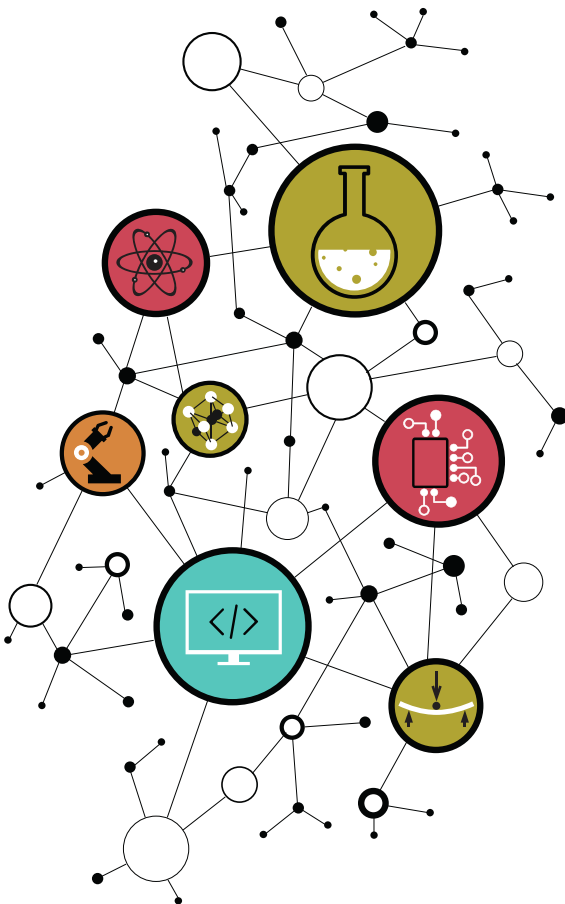
- Visualisez à l'oscilloscope puis relevez les formes d'ondes des tensions $v_1(t)$, $U_{12}(t)$ et $v_s(t)$, en spécifiant les intervalles de conductions des différentes diodes.



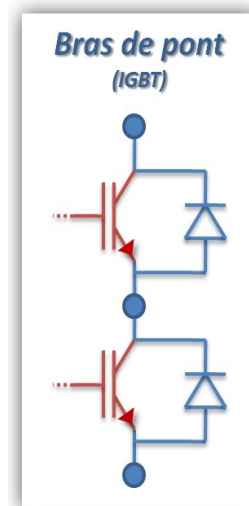
- Mesurez l'ondulation de tension de sortie sans condensateur. Qu'en déduisez-vous concernant le dimensionnement du condensateur de lissage ?

CHAPITRE III

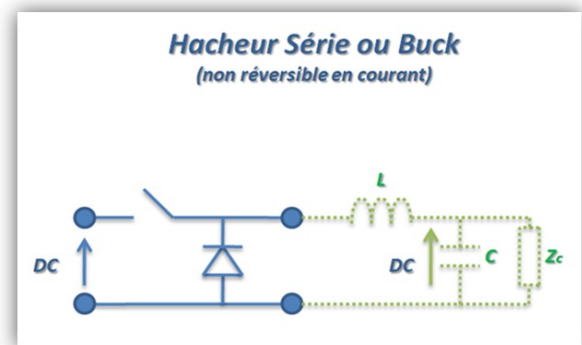
HACHEUR



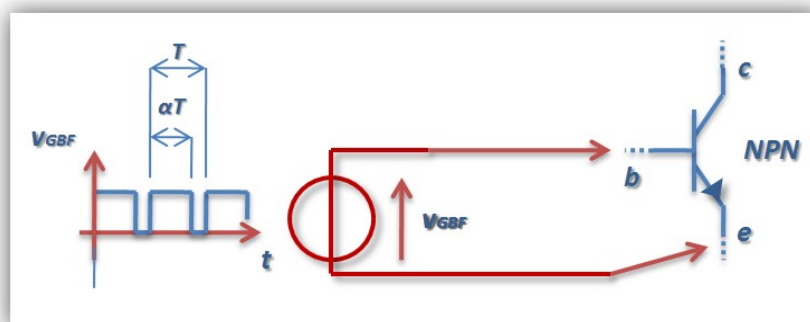
L'objectif de ce TP est de découvrir deux des principales structures de hacheurs rencontrées dans le domaine de l'électronique de puissance. Il s'agit des hacheurs **série (buck)** et **parallèle (boost)**. Rappelons que la cellule à la base de ce domaine est le bras de pont :



Les hacheurs série et parallèle sont deux variantes non réversibles en courant utilisant certains éléments d'un bras de pont (topologie). Prenons l'exemple du hacheur série :



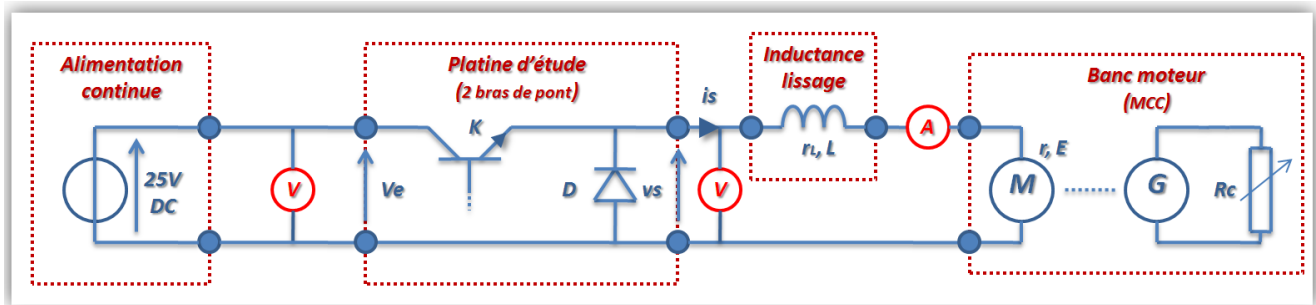
Dans le cadre de ce TP, les interrupteurs statiques sont des transistors bipolaires. Ils seront pilotés par un signal TTL (0-5V) de fréquence 2 kHz (période $T = 0,5$ ms) et à rapport cyclique α variable. Ce signal sera généré par un GBF.



Attention à bien appliquer le signal de commande au **vbe** ou **vcb** des transistors en fonction du type de transistor bipolaire commandé (NPN ou PNP)

III.1. Hacheur série (Buck converter)

Réalisez le montage ci-dessous. L'alimentation stabilisée sera réglée pour délivrer 25 V. Le moteur entraînera une génératrice chargée par une résistance de charge (interrupteur correspondant vers le haut).



Voici ci-dessous les caractéristiques de la bobine de lissage :

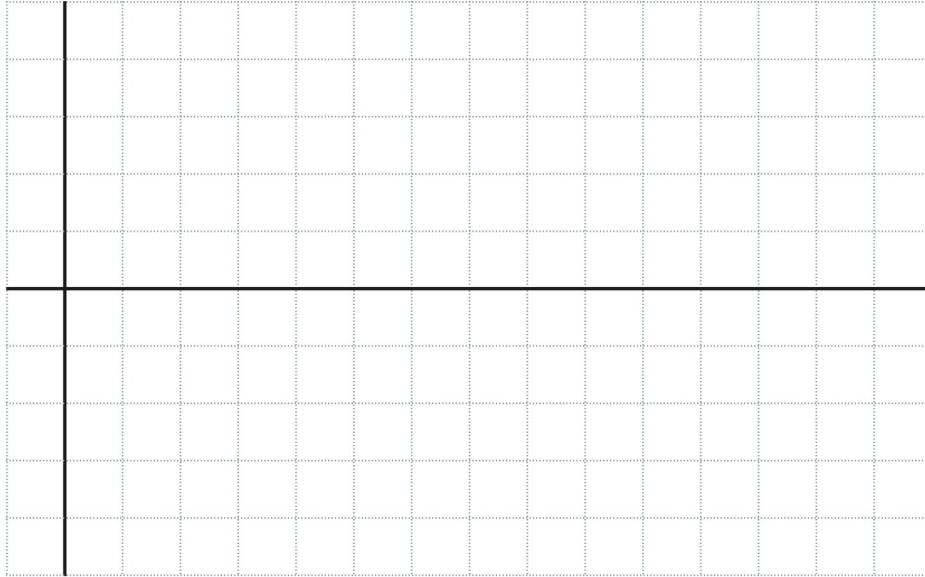
- $r_L = 7,3 \Omega$
- $L = 0,058 \text{ H}$ (noyau retiré)
- $L = 1,11 \text{ H}$ (noyau rentré)



Soyez très prudent à bien utiliser les sondes d'isolement afin d'effectuer vos différentes mesures (facteur d'atténuation de 100 ou 200) !

III.1.a. Fonctionnement continu

- Visualisez à l'oscilloscope puis relevez les formes d'ondes de $v_s(t)$ et $i_s(t)$:



- Spécifiez sur le chronogramme précédent les intervalles de conduction de la diode D et du transistor K
- Donnez l'expression de la valeur moyenne de $v_s(t)$ en fonction de V_e et α . Vérifiez ce résultat expérimentalement.
- Ce montage est-il abaisseur ou élévateur de tension ?

- Ce montage est-il réversible en courant (circulation du courant de la charge vers la source) ? Pourquoi ?
- Proposez la structure minimale (pour le hacheur) assurant une **pleine réversibilité en courant**. Aidez-vous de la structure d'un bras de pont complet.
- Proposez une autre structure, assurant cette fois la **réversibilité en tension et en courant**. La réversibilité en tension permet à la source d'appliquer une tension aussi bien positive que négative à la charge.

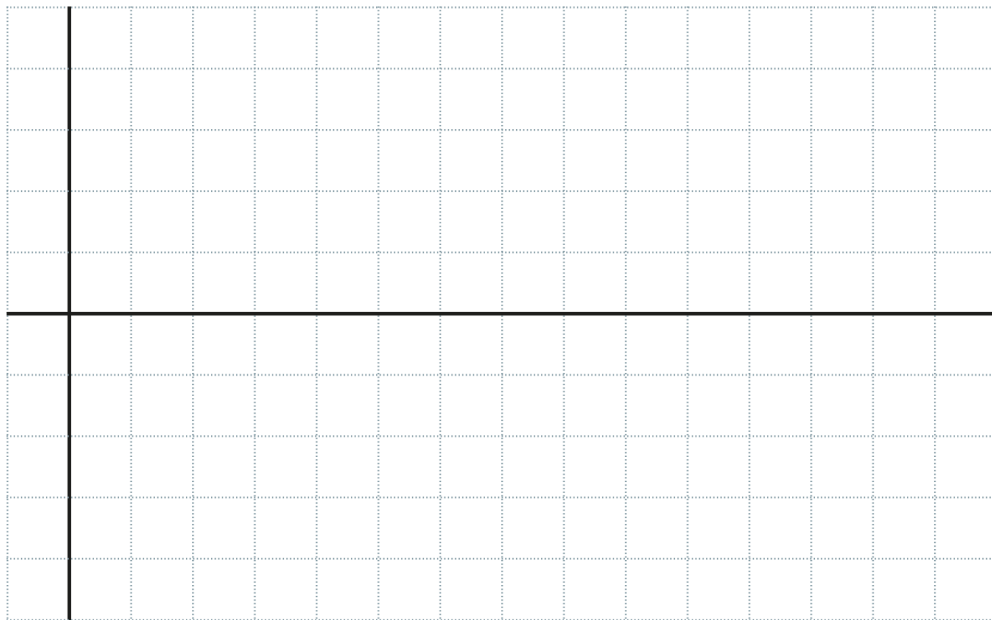
- Retour à notre hacheur série. En supposant que la tension aux bornes du moteur est égale à la valeur moyenne de $v_s(t)$, retrouvez l'expression de l'ondulation de courant donnée ci-dessous :

$$\Delta I_s = \frac{V_e}{L \cdot f} \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha)$$

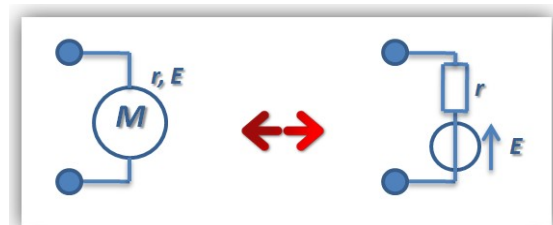
- Vérifiez par la mesure la valeur théorique de l'ondulation de courant à la valeur expérimentale pour $\alpha = 25\%$, $\alpha = 50\%$ et $\alpha = 75\%$.
- Afin de minimiser l'ondulation de courant, devons-nous travailler à noyau magnétique retiré ou rentré avec l'inductance de lissage ?
- Effectuez un essai en chargeant la génératrice puis à vide. Quels sont les effets de ce test sur la valeur moyenne et l'ondulation du courant débité par le hacheur ?
- Comment justifiez-vous le résultat précédent ?

III.1.b. Fonctionnement discontinu

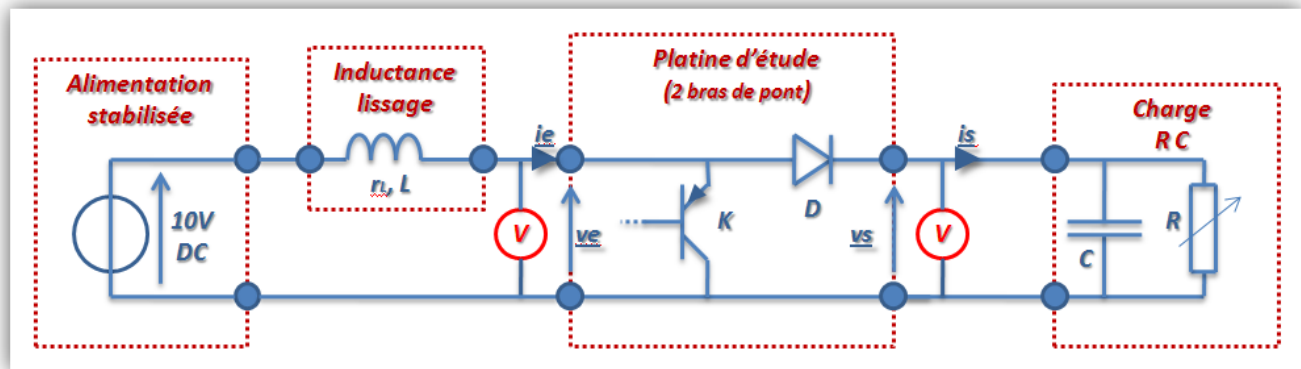
- Retirez le noyau magnétique de l'inductance de lissage, fixez un rapport cyclique α de 50% puis diminuez la fréquence du signal de commande jusqu'à obtenir un mode de fonctionnement discontinu (jusqu'à $f \sim 40$ Hz).
- Visualisez à l'oscilloscope puis relevez les formes d'ondes de $v_s(t)$ et $i_s(t)$ et indiquez les intervalles de conduction de la diode D et du transistor K:



- Le modèle simplifié de l'induit d'une machine à courant continu est donné ci-contre. En supposant que la f.é.m. E (force électro-motrice) soit constante, déduisez du test précédent la valeur de celle-ci.

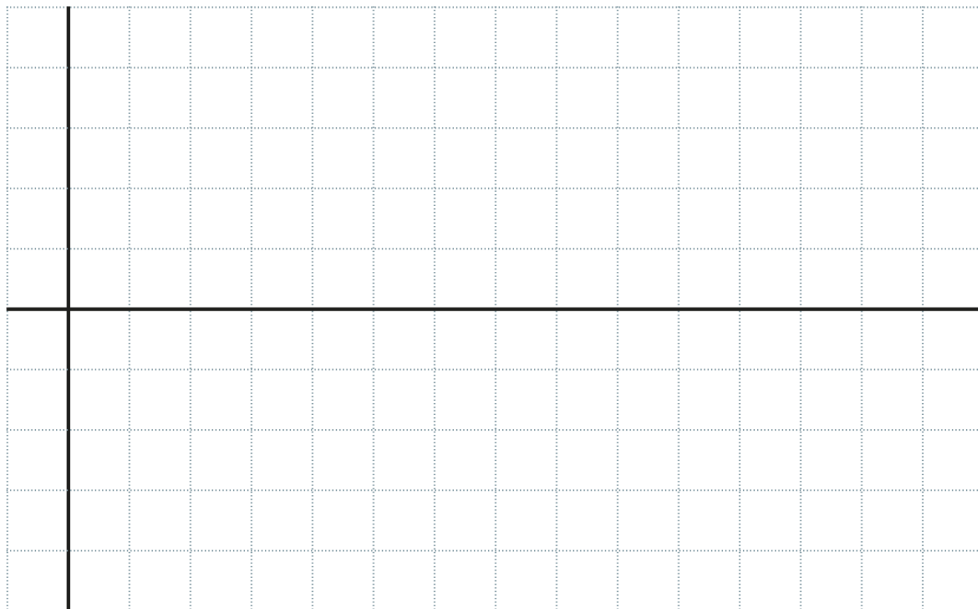


III.2. Hacheur parallèle (Boost converter)



Attention, ne pas travailler avec un niveau de tension d'entrée supérieur à 5 V.
 Vous constaterez qu'en jouant sur le rapport cyclique, le niveau de tension de sortie augmente rapidement !

- Visualisez à l'oscilloscope puis relevez les formes d'ondes de $v_s(t)$ et $i_e(t)$:



- Spécifiez sur le chronogramme précédent les intervalles de conduction de la diode D et du transistor K

- Donnez l'expression de la valeur moyenne de $v_s(t)$ en fonction de la valeur moyenne de $v_e(t)$ ($\langle v_e(t) \rangle$) et α . Vérifiez ce résultat expérimentalement.
- Ce montage est-il abaisseur ou élévateur de tension ?
- Ce montage est-il réversible en courant (circulation du courant de la charge vers la source) ? Pourquoi ?
- Ajouter en parallèle de la charge un condensateur de $10 \mu\text{F}$. Justifiez le résultat obtenu.

