

FONCTIONNEMENT D'UN HACHEUR



1. COMMANDE DU HACHEUR

1.1 Description de la maquette utilisée

On mesure à l'ohmmètre les valeurs de r et r' : $r = 10,1 \Omega$ et $r' = 1,2 \Omega$.

1.2 Fonctionnement de la commande

Q.1) Les masses du G.B.F et de l'oscilloscope étant au même potentiel, on risque de créer un court-circuit en prélevant sans précaution une tension à l'oscilloscope. Par exemple, pour visualiser $u_s = V_A - V_C$, on mettrait le point C à la masse et on court-circuiterait le transistor.

Le transformateur d'isolement ne laisse pas passer les tensions continues donc il n'est pas adapté ici.

Q.2) On a $\varepsilon = V^+ - V^- = \frac{0}{\frac{R_1}{1} + \frac{R_2}{R_2}} - V_e = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s - V_e$. Le montage étant bouclé uniquement sur l'entrée non inverseuse, on

a une rétroaction positive qui entraîne la saturation de l'A.L.I. On a donc $V_s = \pm V_{\text{sat}}$.

$$V_s = +V_{\text{sat}} \Leftrightarrow \varepsilon > 0 \Rightarrow \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}} - V_e > 0, \text{ soit } V_e < \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}} = V_{\text{basc.}}$$

$$V_s = -V_{\text{sat}} \Leftrightarrow \varepsilon < 0 \Rightarrow -\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}} - V_e < 0, \text{ soit } V_e > -\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}} = -V_{\text{basc.}}$$

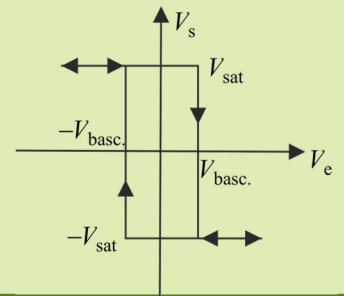
Avec les valeurs numériques choisies, on a $V_{\text{basc.}} = \frac{V_{\text{sat}}}{100} \approx 0,14 \text{ V}$: faible valeur.

On en conclut que :

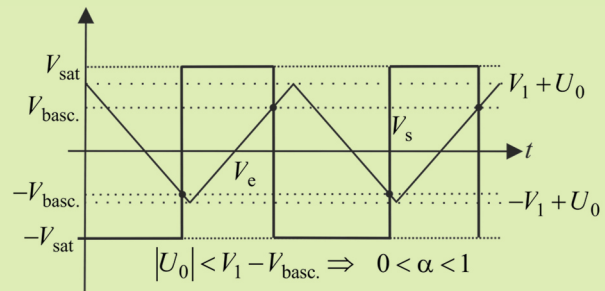
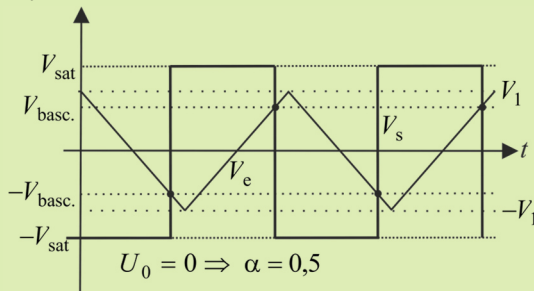
V_s bascule de $-V_{\text{sat}}$ à V_{sat} lorsque V_e devient inférieur à $-V_{\text{basc.}}$.

V_s bascule de V_{sat} à $-V_{\text{sat}}$ lorsque V_e devient supérieur à $V_{\text{basc.}}$.

On a donc le cycle d'hystérésis ci-contre :

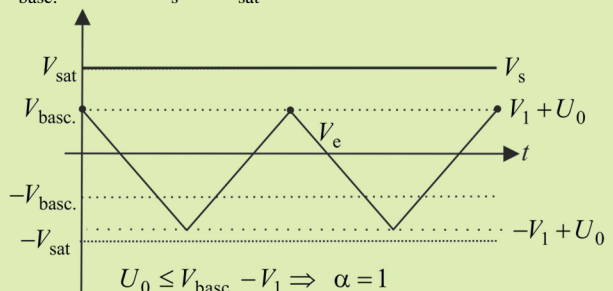
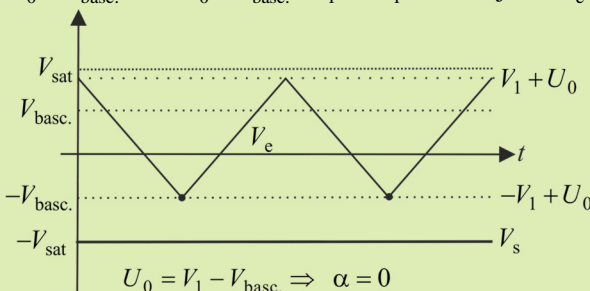


Q.3) En l'absence d'offset, si $V_1 > V_{\text{basc.}}$ (en fait $V_1 \gg V_{\text{basc.}}$), on a la même durée de l'état $V_s = +V_{\text{sat}}$ que de l'état $V_s = -V_{\text{sat}}$: $\alpha = 0,5$. En présence d'offset : si $V_1 + U_0 > V_{\text{basc.}}$ et $-V_1 + U_0 < -V_{\text{basc.}}$, soit : $|U_0| < V_1 - V_{\text{basc.}} \approx V_1$, on a $0 < \alpha < 1$ et α diminue quand U_0 augmente.

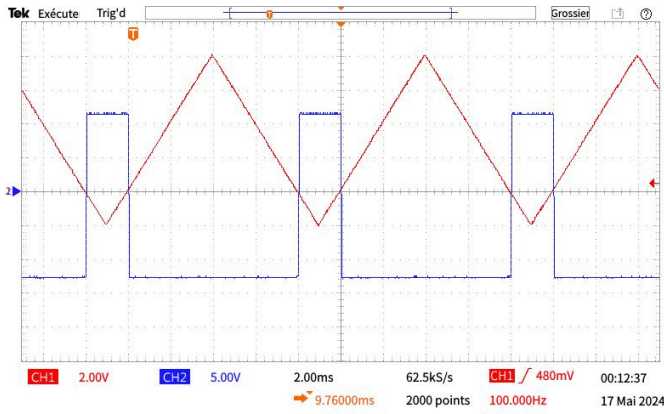


si $-V_1 + U_0 \geq -V_{\text{basc.}}$, soit $U_0 \geq V_1 - V_{\text{basc.}} \approx V_1$ on a toujours $V_e > -V_{\text{basc.}}$ et donc $V_s = -V_{\text{sat}} \forall t$: $\alpha = 0$

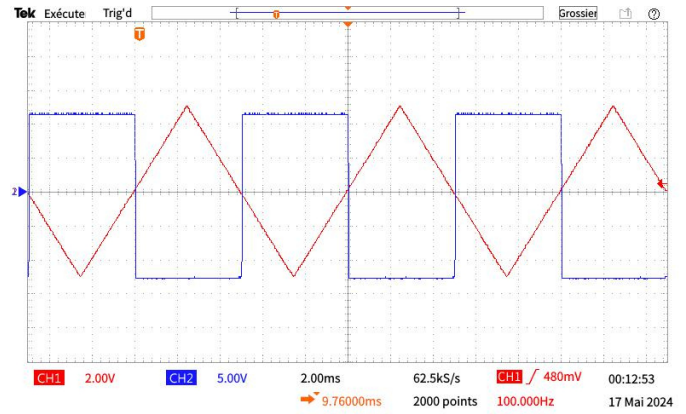
si $V_1 + U_0 \leq V_{\text{basc.}}$, soit $U_0 \leq V_{\text{basc.}} - V_1 \approx -V_1$ on a toujours $V_e < V_{\text{basc.}}$ et donc $V_s = +V_{\text{sat}} \forall t$: $\alpha = 1$



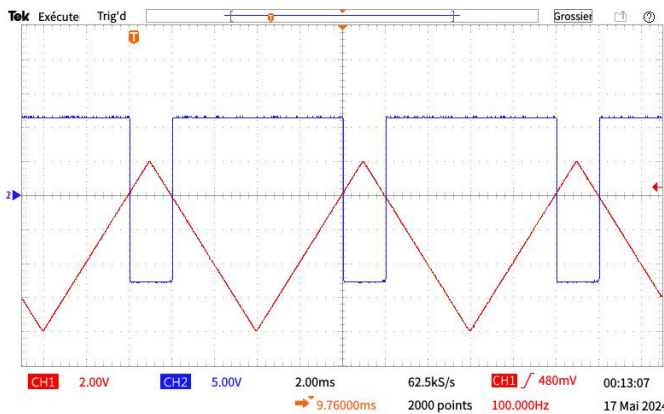
Le cycle d'hystérésis est conforme à la théorie, et on obtient bien la loi de commande du transistor désirée :



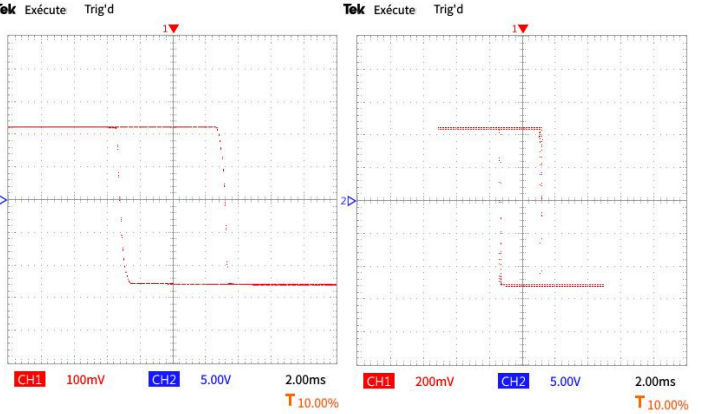
$\alpha = 0,20$



$\alpha = 0,50$



$\alpha = 0,80$



zoom sur le cycle d'hystérésis, basculement vers 140mV.

2. HACHEUR SÉRIE (DÉVOLTEUR)

2.1 Branchements

Q.4) La présence de la bobine en série nous assure que la source de sortie est une source de courant.

On a $u_s = E' + Ri_s + L \frac{di_s}{dt}$ ⁽¹⁾. En prenant la valeur moyenne : $\alpha E = E' + RI_0$ ⁽²⁾, soit $I_0 = \frac{\alpha E - E'}{R}$ puisqu'en régime établi

i_s est périodique et donc $\left\langle \frac{di_s}{dt} \right\rangle = 0$.

En faisant (1) - (2) on obtient $u_s - \alpha E = R\delta i_s + L \frac{d\delta i_s}{dt}$, en posant

$\delta i_s = i_s - I_0$ la fluctuation d'intensité, soit $\frac{u_s - \alpha E}{L} = \frac{\delta i_s}{\tau} + \frac{d\delta i_s}{dt}$ avec

$\tau = \frac{L}{R}$ constante de temps du circuit L, R .

Or $\delta i_s = O(I)$ fluctue sur la durée caractéristique $T \ll \tau$, donc $\frac{d\delta i_s}{dt}$ est

de l'ordre de $\frac{I}{T} \gg \frac{I}{\tau}$ et on peut faire l'approximation $\frac{u_s - \alpha E}{L} = \frac{d\delta i_s}{dt}$.

Entre 0 et αT , K est fermé, K' est ouvert : $u_s = E$ et $\frac{d\delta i_s}{dt} = \frac{1-\alpha}{L} E$.

On en déduit $\Delta i_s = i_{s\max} - i_{s\min} = \alpha(1-\alpha) \frac{E}{L} T$.

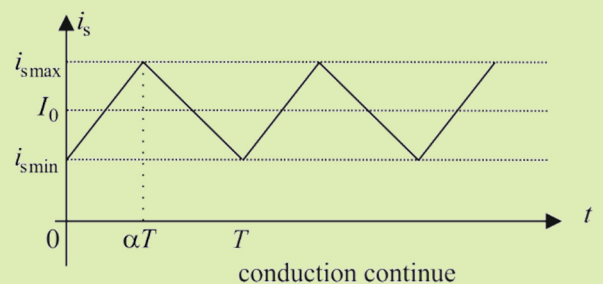
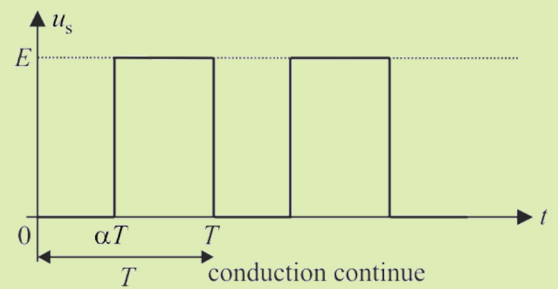
Entre αT et T , K est ouvert, K' est fermé : $u_s = 0$ et :

$\frac{d\delta i_s}{dt} = \frac{0 - \alpha E}{L} = -\alpha \frac{E}{L} < 0 \Rightarrow \delta i_s = -\alpha \frac{E}{L} t + Cte$. On en déduit :

$-\Delta i_s = i_{s\min} - i_{s\max} = -\alpha(1-\alpha) \frac{E}{L} T$.

On retrouve le résultat précédent.

La fluctuation de courant est constituée par des segments de droites.

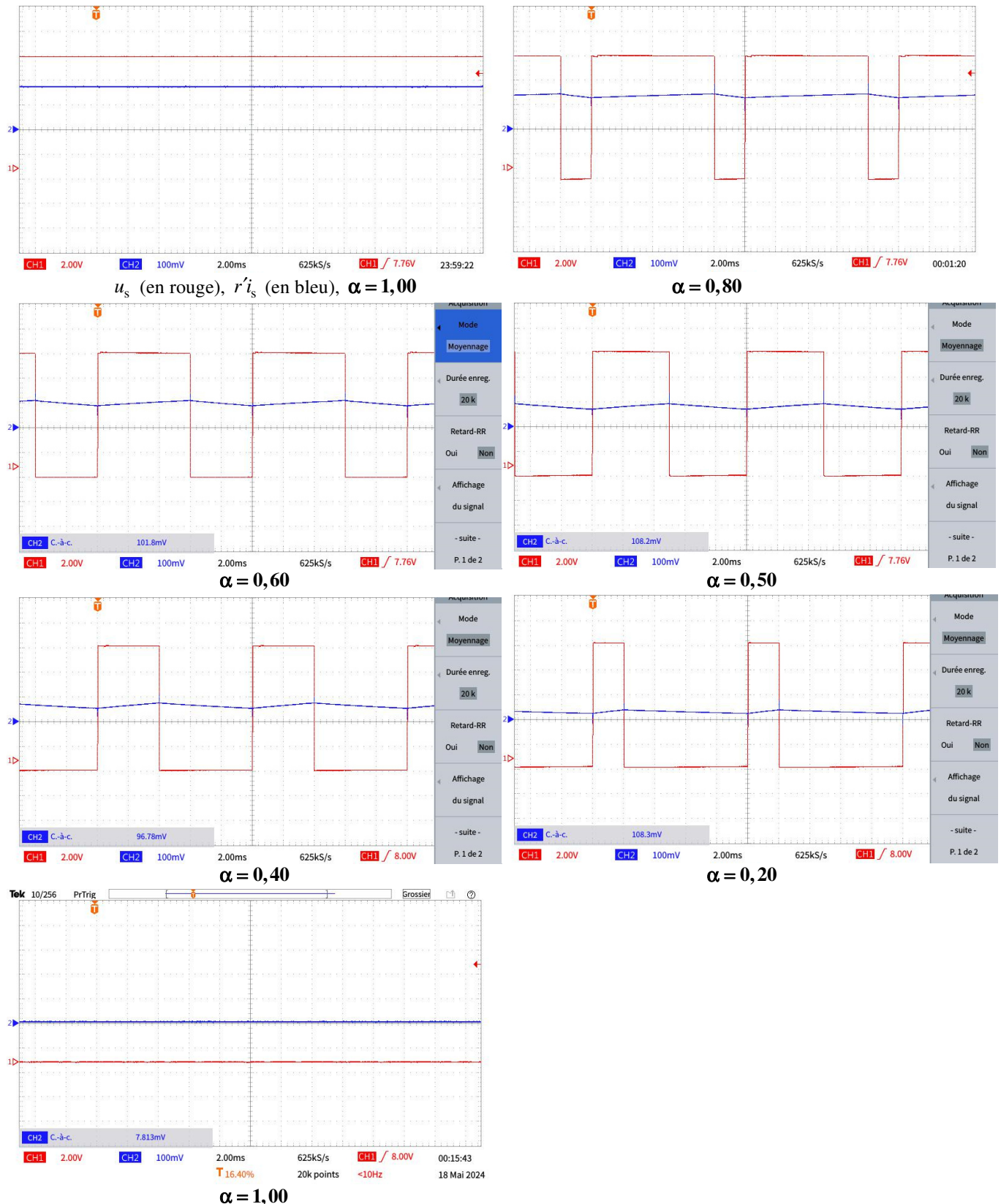


2.2 Fonctionnement sur une charge (R' , L)

On mesure $R' = 63,5 \Omega$.

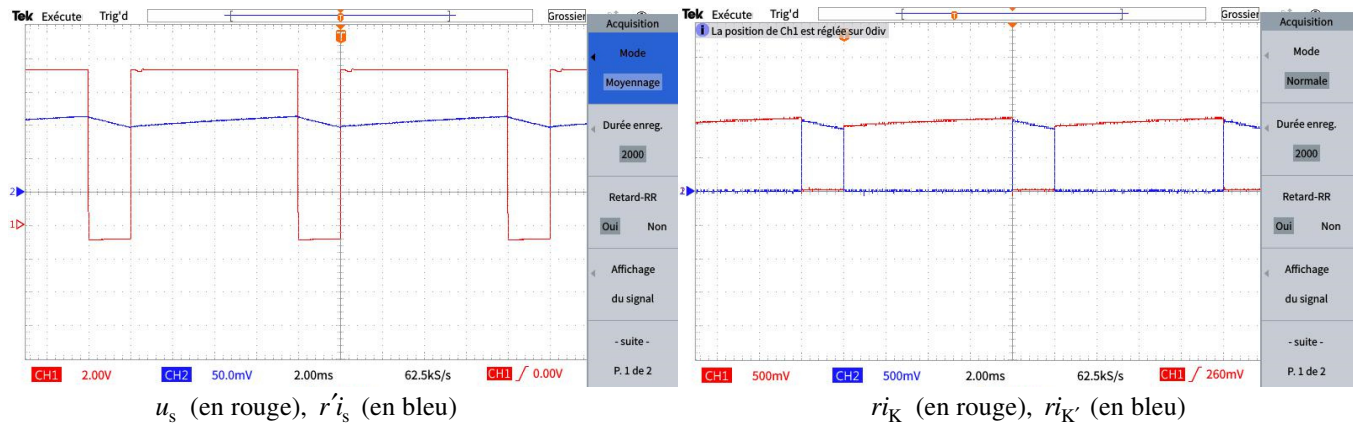
Une mesure de $L_{\max}$ est réalisée en utilisant la résonance aux bornes de $R = 1 \text{ k}\Omega$ dans le circuit série $R L_{\max} C$ dans lequel $C = 100 \text{ nF}$. On mesure la fréquence de résonance $f_0 = 444 \text{ Hz}$, valeur pour laquelle la tension aux bornes de R est en phase avec la tension du générateur qui alimente l'association série (en visualisant ces deux tensions en mode XY à l'oscilloscope, on passe en quelques Hz d'une ellipse à une droite). On en déduit $L_{\max} = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} = 1,28 \text{ H}$.

>>> Voici quelques relevés Pour $E = 10 \text{ V}$, $f = 100 \text{ Hz}$, et diverses valeurs de α :



On constate bien que I_0 décroît avec α , et que l'ondulation de courant est maximale pour $\alpha = 0,50$.

>>> Pour $E = 10 \text{ V}$, $f = 100 \text{ Hz}$, et $\alpha = 0,80$ on relève les courbes suivantes :



Le signal u_s est bien haché et mesure 10 V crête-à-crête, mais est décalé de $-0,8 \text{ V}$, ce que l'on peut imputer au comportement réel du transistor et de la diode (tension de seuil...), considérés comme idéaux dans la théorie.

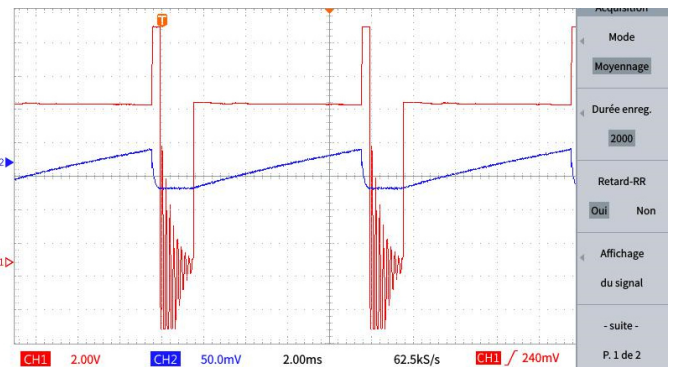
Le signal i_s est en triangles ; c'est dû au comportement intégrateur du filtre (R', L) dans le domaine $f \gg f_c = \frac{1}{2\pi\tau}$.

i_K possède l'allure attendue (nul quand K est ouvert ; $i_K = i_s$ quand K est fermé) ainsi que $i_{K'}$ (nul quand K' est bloquée ; $i_{K'} = i_s$ quand K' est passante).

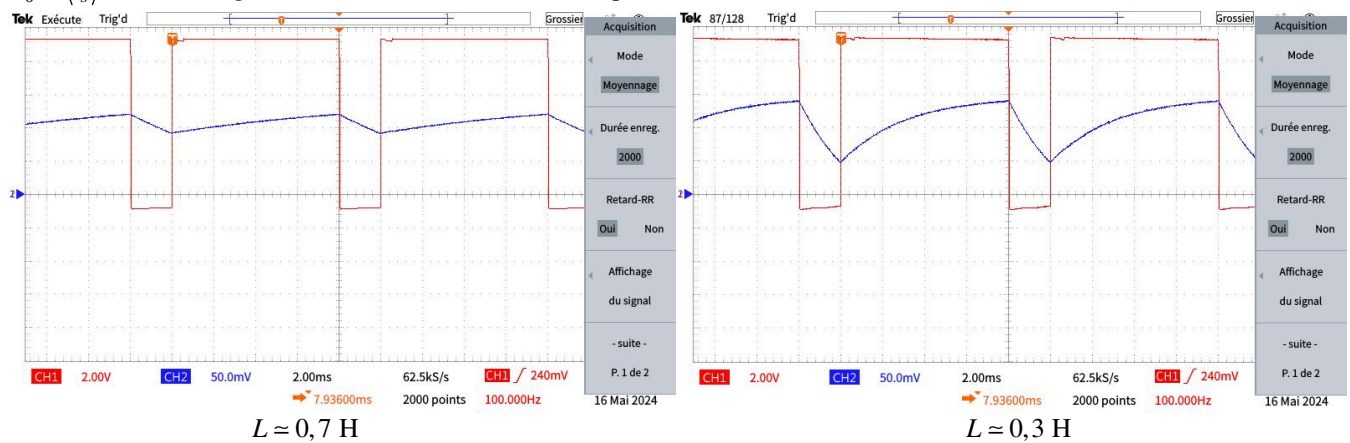
On met hors service la diode de roue libre (u_s est en rouge, $r'i_s$ est en bleu).

L'allure de u_s et de i_s est correcte tant que K est fermé. En revanche i_s s'annule brusquement quand K s'ouvre, ce qui provoque une surtension pour u_s , suivie d'oscillations pendant lesquelles u_s devient négatif !).

Ce fonctionnement est bien sûr indésirable et risque d'endommager le transistor, et il faut bien une diode de roue libre pour que le courant circule dans la source de sortie quand K est ouvert.



On remet K' en fonction et on diminue la valeur de L en sortant progressivement le noyau de fer doux de la bobine. u_s et $I_0 = \langle i_s \rangle$ sont inchangés, conformément à l'étude théorique.

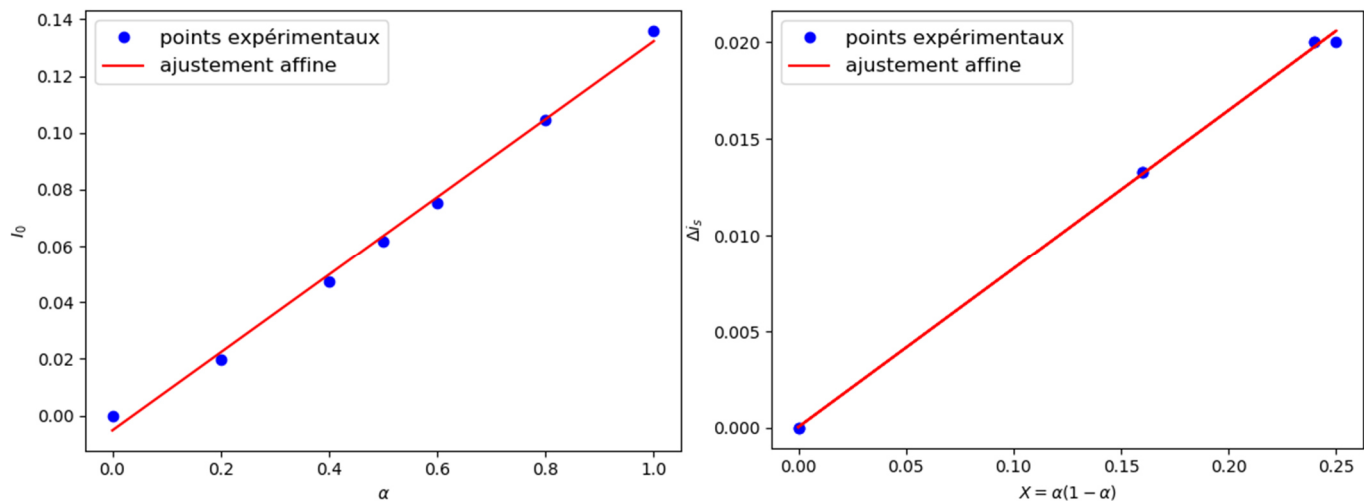


En diminuant la valeur de L , on constate que les fluctuations de i_s deviennent plus importantes, conformément à la théorie, et qu'elles ne sont plus du tout assimilables à des segments de droite quand L est trop faible (arcs d'exponentielle, les expressions théoriques perdent de leur validité).

Afin de vérifier la relation $I_{0th} = \langle i_s \rangle = \frac{\alpha E}{R}$, et $\Delta i_s = i_{s\max} - i_{s\min} = \alpha(1-\alpha) \frac{E}{L} T$, on effectue les mesures demandées, ce qui permet de remplir les tableaux suivants :

$E = 10 \text{ V}$, $f = 100 \text{ Hz}$

α	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1
$I_{0\text{exp}}$ (mA)	0	19,7	47,3	61,7	75,3	104,6	136
$\Delta i_{s,\text{exp}}$ (mA)	0	13	20	20	20	13	0



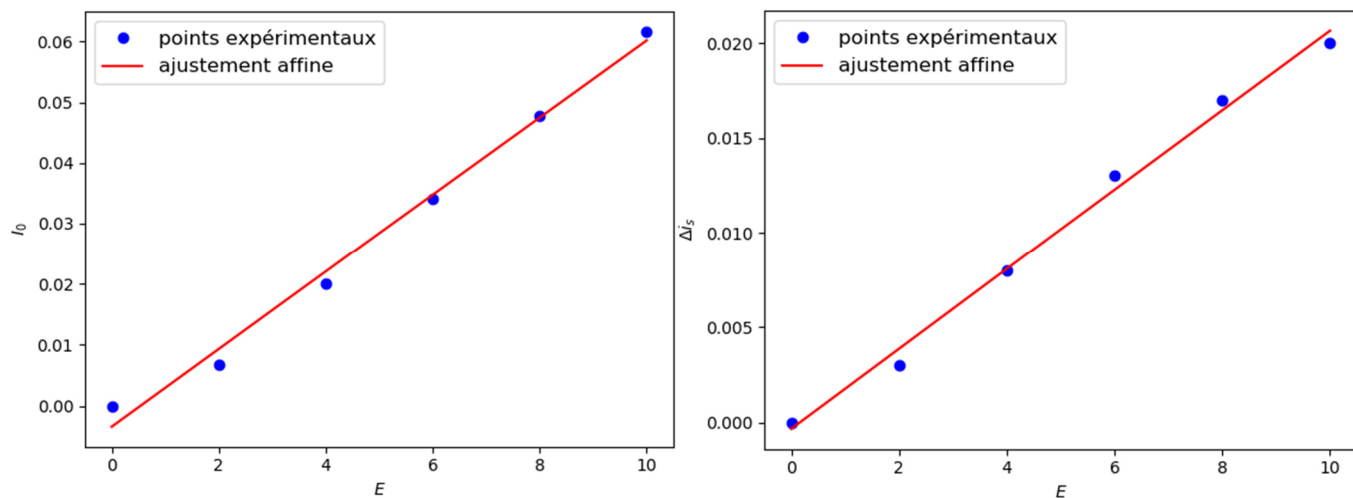
Les incertitudes-type sont de l'ordre du mA pour $I_{0\text{exp}}$ et pour Δi_{sth} .

Pour la courbe $I_{0\text{exp}}(\alpha)$, la pente mesurée $a_{\text{exp}} = 0,138 \text{ A}$ permet de déterminer $R = \frac{E}{a_{\text{exp}}} = 72,7 \Omega$. Cette résistance est plus grande que $R' = 63,5 \Omega$, ce qui doit être dû aux composants, non idéaux, du circuit.

On trace également Δi_{sth} en fonction de $X = \alpha(1-\alpha)$. La pente mesurée $a_{\text{exp}} = 0,082 \text{ A}$ semble en accord avec la pente théorique $a_{\text{th}} = \frac{E}{L}T = 0,078 \text{ A}$.

$\alpha = 0,5$, $f = 100 \text{ Hz}$

$E \text{ (V)}$	0	2	4	6	8	10
$I_{0\text{exp}} \text{ (mA)}$	0	6,8	20,0	34,2	47,7	61,7
$\Delta i_{s,\text{exp}} \text{ (mA)}$	0	3	8	13	17	20



Pour la courbe $I_{0\text{exp}}(E)$, la pente mesurée $a_{\text{exp}} = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ S}$ semble en accord avec la pente théorique $a_{\text{th}} = \frac{\alpha}{R} = 6,9 \cdot 10^{-3} \text{ S}$.

On trace également Δi_{sth} en fonction de E . La pente mesurée, $a_{\text{exp}} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ S}$, semble en accord avec la pente théorique

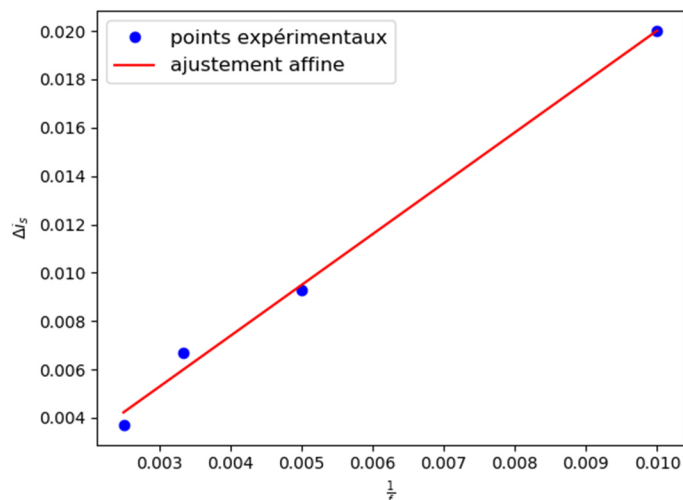
$$a_{\text{th}} = \frac{\alpha(1-\alpha)}{L}T = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ S}.$$

$\alpha = 0,5$, $E = 10 \text{ V}$

$f \text{ (Hz)}$	100	200	300	400
$I_{0\text{exp}} \text{ (mA)}$	61,7	61,5	61,6	61,6
$\Delta i_{s,\text{exp}} \text{ (mA)}$	20	9	7	4

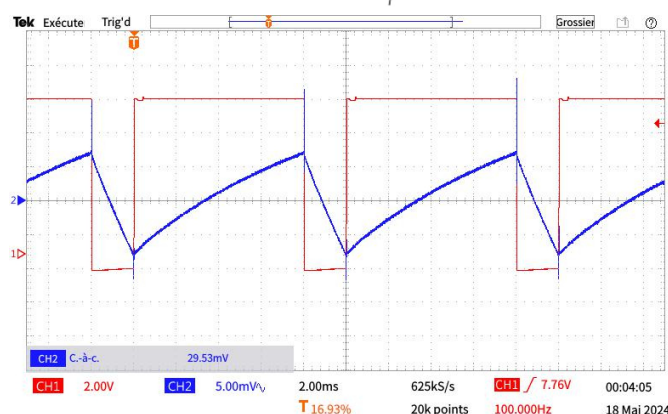
On constate que $I_{0\text{exp}}$ est bien indépendant de la fréquence comme le prévoit la théorie.

On trace également Δi_{sth} en fonction de $1/f$. La pente mesurée, $a_{\text{exp}} = 2,1 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$, semble en accord avec la pente théorique $a_{\text{th}} = \frac{\alpha(1-\alpha)}{L} E = 2,0 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$.



Il ne faut pas utiliser les mesures automatiques d'amplitude lorsque le signal est très bruité (même si on a moyenné), car le bruit, ou les pics indésirables, est pris en compte dans l'amplitude crête-à-crête comme on le voit ci-contre où la valeur automatique donne 29,53 mV alors que la valeur mesurée manuellement est de 15,5 mV.

On remarque également que l'ondulation de courant n'est pas triangulaire à 100 Hz. En effet, la constante de temps du circuit vaut $\tau = L/R \approx 20 \text{ ms}$ et n'est pas très grande devant la période de hachage $T = 10 \text{ ms}$. L'approximation serait meilleure à des fréquences plus élevées, mais alors l'amplitude devient trop faible pour être distinguée du bruit.



2.3 Fonctionnement sur une charge (R' , L , force contre-électromotrice E')

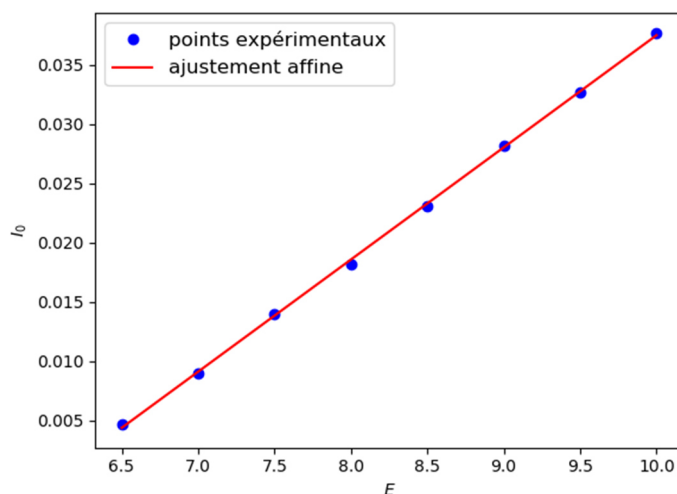
>>> On mesure au voltmètre $E' = 4,34 \text{ V}$.

Conduction discontinue

>>> La conduction continue est observée pour $\alpha = 0,8$ et $E = 10 \text{ V}$. Comme prévu, l'allure de u_s n'est pas modifiée par la présence de la pile, pas plus que l'ondulation de i_s . En revanche $I_0 = \langle i_s \rangle$ est modifiée.

$\alpha = 0,80$, $f = 100 \text{ Hz}$.

$E \text{ (V)}$	10	9,5	9,0	8,5	8,0	7,5	7,0	6,5
$I_{0\text{exp}} \text{ (mA)}$	37,7	32,7	28,2	23,1	18,2	14,0	8,95	4,7

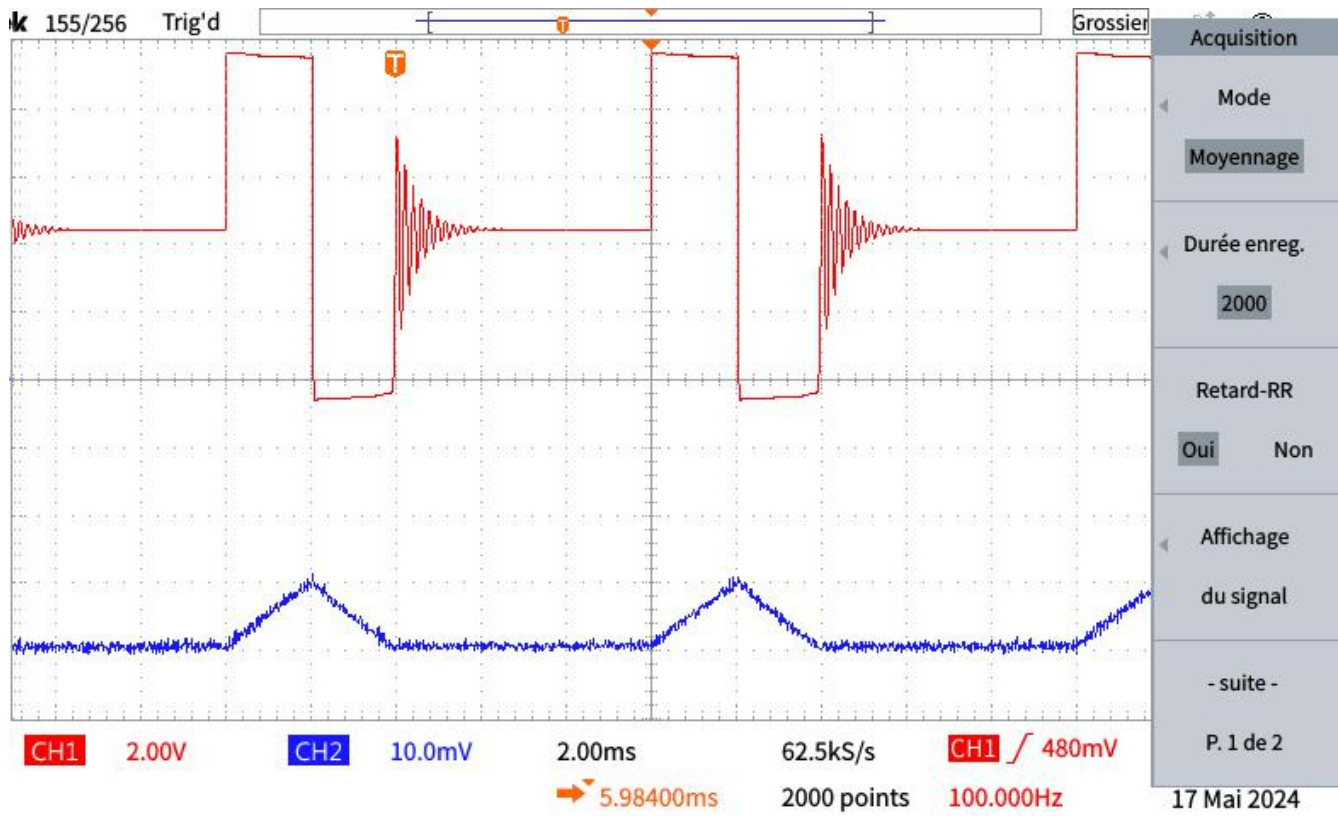


Pour la courbe $I_{0\text{exp}}(E)$, la pente mesurée $a_{\text{exp}} = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ S}$ semble en accord avec $a_{\text{th}} = \frac{\alpha}{R} = 11,0 \cdot 10^{-3} \text{ S}$.

L'ordonnée à l'origine $b_0 = -0,057 \text{ A}$ semble compatible avec sa valeur théorique $-\frac{E'}{R} = -0,060 \text{ A}$.

Conduction discontinue

>>> Avec $f = 100\text{ Hz}$, $\alpha = 0,20$ et $E = 10\text{ V}$, on observe la conduction discontinue :



Conformément à la théorie, le courant i_s croît quand K est fermé ($u_s = E$), puis décroît quand K est ouvert ($u_s = 0$). Lorsqu'il atteint la valeur nulle, K' est bloquée et on a bien (après un rapide régime transitoire oscillant) $u_s = E' \simeq 4,4\text{ V}$.

En conclusion, le hacheur étudié fonctionne correctement sur charge inductive et devrait permettre de piloter un petit moteur à courant continu.