Montages à amplificateur linéaire intégré

Difficulté d'analyse et compréhension, initiative requise ;
Difficulté technique et calculatoire ;
Exercice classique et/ou important.

Flasher ou cliquer pour accéder au corrigé

Se préparer

Applications de cours

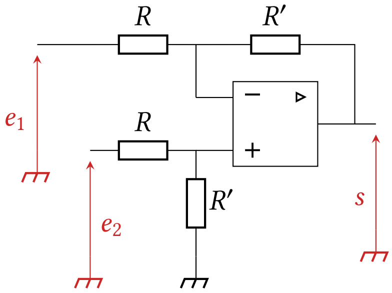
Ces applications de cours sont des briques élémentaires des raisonnements à mener dans les exercices : les maîtriser est incontournable. Elles sont toutes traitées de manière exhaustive dans le cours.

E6.1 - Établir la relation entrée-sortie du montage amplificateur non-inverseur OU amplificateur inverseur OU intégrateur pur (c'est-à-dire sans résistance en parallèle du condensateur).

E6.2 - Établir et représenter le cycle du comparateur à hystérésis non-inverseur.

Exercice 1 : Montage soustracteur 1 | 1 |

- *Montage simple à ALI ;*
- *Régime linéaire.*



Établir la relation entrée-sortie du montage ci-contre.

✎ ***Correction —*** *D'après le théorème de Millman appliqué à l'entrée ⊖ de l'ALI,*

$$v_- = \frac{\dfrac{e_1}{R} + \dfrac{s}{R'}}{\dfrac{1}{R} + \dfrac{1}{R'}} \qquad \text{soit} \qquad \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right) v_- = \frac{e_1}{R} + \frac{s}{R'}\,.$$

***Question d'analyse 1** - Pourquoi le théorème de Millman est-il ici plus efficace qu'un pont diviseur de tension ?*

Par ailleurs, en identifiant un pont diviseur de tension dans la branche « en bas à gauche » de l'ALI,

$$\frac{v_+}{e_2} = \frac{R'}{R + R'}\,.$$

Question d'analyse 2 - Pourquoi un pont diviseur est-il cette fois le plus adapté ?

Question d'analyse 3 - Écrire explicitement le théorème de Millman … et vérifiez que vous arrivez au même résultat !

À partir des équations précédentes, on trouve

$$(R+R')v_- = R'\,e_1 + R\,s \qquad \text{et} \qquad (R+R')v_+ = R' e_2$$

L'ALI fonctionnant a priori en régime linéaire, $v_+ = v_-$, d'où

$$R'\,e_1 + R\,s = R'\,e_2$$

ce qui conduit finalement à

$$\boxed{s = \frac{R'}{R}(e_2 - e_1)\,.}$$

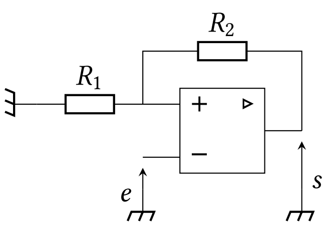
Question d'analyse 4 - Pourquoi l'hypothèse de régime linéaire est-elle légitime ?

Question d'analyse 5 - Peut-on déduire du fonctionnement linéaire que $v_+ = v_- = 0$?

Exercice 2 : Comparateur à hystérésis inverseur

2 | 1 |

- Montage simple à ALI ;
- Régime de saturation.



1 - Identifier le régime de fonctionnement de l'ALI ci-contre.

2 - Exprimer le potentiel v_+ en fonction de s.

3 - En déduire les tensions de basculement.

4 - On choisit $R_2 = 2R_1$. Représenter le cycle d'hystérésis du montage.

5 - Représenter le signal de sortie pour une entrée sinusoïdale d'amplitude 10 V.

✎ ***Correction —*** ***1*** *- L'ALI fonctionne en* ***régime de saturation****.*

Question d'analyse 1 - Justifier cette affirmation.

2 *- Les deux résistances R_1 et R_2 sont parcourues par le même courant et forment donc un pont diviseur. Ainsi,*

$$\frac{v_+}{s} = \frac{R_1}{R_1+R_2} \qquad \text{donc} \qquad \boxed{v_+ = \frac{R_1}{R_1+R_2}s\,.}$$

Question d'analyse 2 - Justifier que le courant dans les résistances est le même.

Question d'analyse 3 - Représenter sur le schéma les flèches de tension montrant le pont diviseur.

3 *- Supposons l'ALI en saturation haute. Il y reste tant que*

$$v_- < v_+ \qquad \text{soit} \qquad \boxed{e < \frac{R_1}{R_1+R_2}V_{sat}\,.}$$

Supposons maintenant l'ALI en saturation basse. Il y reste tant que

$$v_- > v_+ \qquad \text{soit} \qquad \boxed{e > -\frac{R_1}{R_1+R_2}V_{sat}\,.}$$

Question d'analyse 4 - Expliquer l'apparition du signe − dans la dernière inégalité.

4 *- Voir figure 1 à gauche.*

Question d'analyse 5 - Indiquer par des flèches le sens dans lequel les parties verticales du cycle sont parcourues.

***5** - Voir figure 1 à droite.*

Question d'analyse 6 - Pourquoi la sortie ne bascule-t-elle pas aux instants notés t_1 et t_2 ?

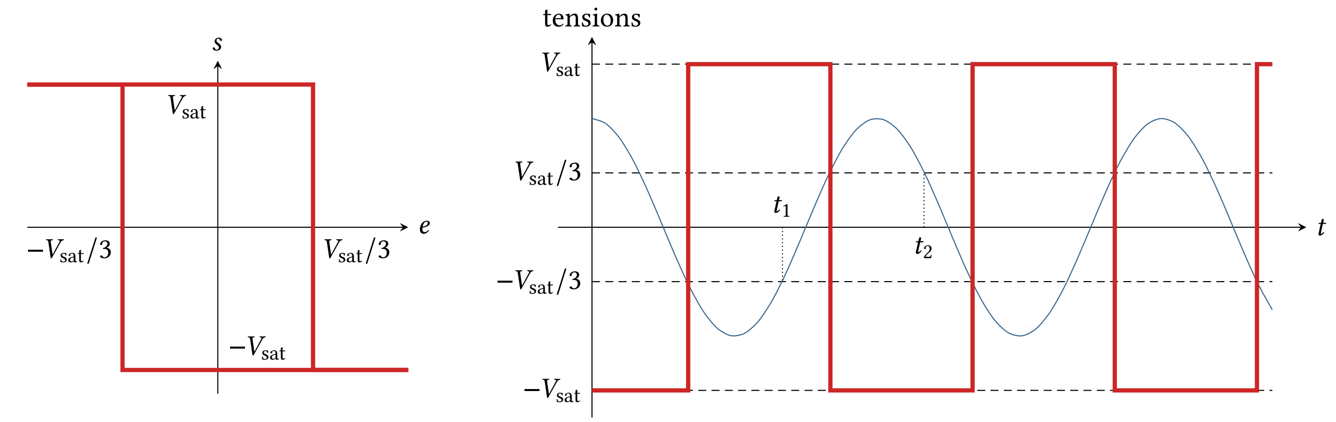


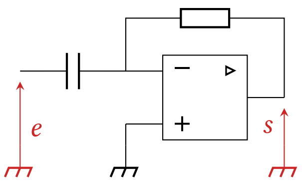
Figure 1 – Comparateur à hysérésis inverseur. Gauche : diagramme entrée-sortie. Droite : signal de sortie pour un signal d'entrée sinusoïdal.

Réalisation de fonctions

Exercice 3 : Montage dérivateur

1 | 1 |

- *Montage simple à ALI ;*
- *Régime linéaire.*

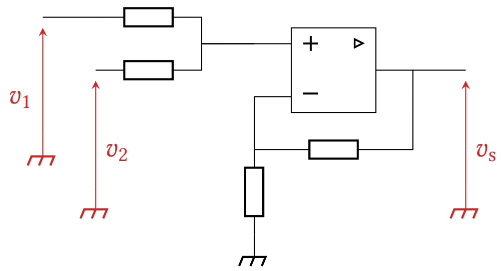


Établir la relation entrée-sortie du montage.

Exercice 4 : Montage sommateur

1 | 1 |

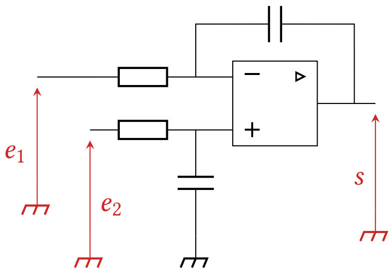
- *Montage simple à ALI ;*
- *Régime linéaire.*



Exprimer v_s en fonction de v_1 et v_2. Les quatre résistances R sont identiques.

Exercice 5 : Intégrateur différentiel 1 | 2

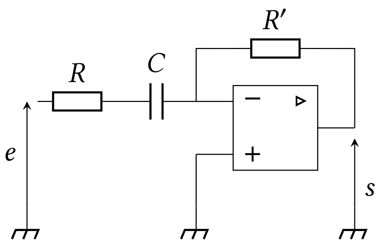
- *Montage simple à ALI ;*
- *Régime linéaire.*



Exprimer dans le domaine fréquentiel puis temporel la relation entre la tension de sortie et les deux tensions d'entrée du montage. Les deux résistances R et les deux condensateurs C sont identiques.

Exercice 6 : Filtre passe-haut amplificateur 2 | 2 |

- *Fonction de transfert ;*
- *Tracé d'un diagramme de Bode ;*
- *Régime linéaire et de saturation.*



1 - Identifier sans calcul la nature du filtre ci-contre.

2 - Établir sa fonction de transfert sous forme canonique

$$\underline{H} = \frac{H_0}{1 - \mathrm{j}\omega_c/\omega}\,.$$

3 - On souhaite une pulsation de coupure $\omega_c = 1 \cdot 10^4\,\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$ et un gain de 20 dB en haute fréquence. Déterminer les valeurs à donner à R' et C pour $R = 1\,\mathrm{k\Omega}$.

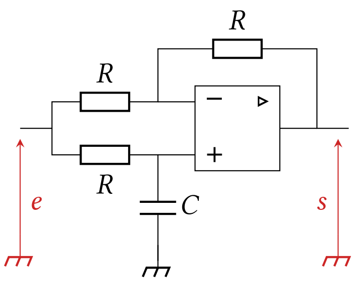
4 - Tracer le diagramme de Bode du filtre.

5 - On envoie en entrée du filtre une tension sinusoïdale $e(t) = E_0 \cos(\omega t)$. Donner l'allure de la tension de sortie et de son spectre dans les quatre cas suivants :

- $E_0 = 1\,\mathrm{V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^2\,\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$;
- $E_0 = 3\,\mathrm{V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^2\,\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$;
- $E_0 = 1\,\mathrm{V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^5\,\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$;
- $E_0 = 3\,\mathrm{V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^5\,\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$.

Exercice 7 : Filtre passe-tout déphaseur 2 | 2

- *Fonction de transfert ;*
- *Tracé d'un diagramme de Bode ;*
- *Régime linéaire.*



1 - Justifier que l'ALI peut fonctionner en régime linéaire. On fait cette hypothèse pour la suite de l'exercice.

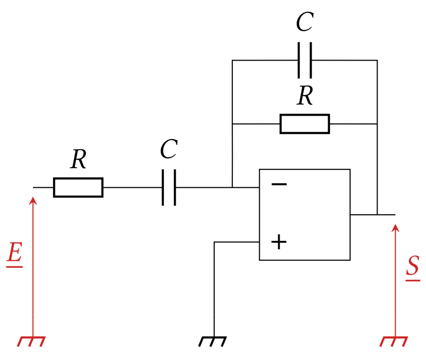
2 - Dans cette hypothèse, établir la fonction de transfert du montage.

3 - Construire son diagramme de Bode en gain et en phase.

4 - Justifier le nom du montage.

Exercice 8 : Filtre passe-bande inverseur 2 | 2

- *Fonction de transfert ;*
- *Tracé d'un diagramme de Bode ;*
- *Régime linéaire.*



Considérons le montage de la figure ci-contre, pour $R = 1\,\mathrm{k\Omega}$ et $C = 16\,\mathrm{nF}$.

1 - Justifier que l'ALI fonctionne probablement en régime linéaire. On se place dans cette hypothèse par la suite. Serait-il possible d'avoir un fonctionnement en saturation ? à quelle condition ?

2 - Montrer sans calcul mais en justifiant rigoureusement la réponse qu'il s'agit d'un filtre passe-bande.

3 - Montrer que sa fonction de transfert s'écrit

$$\underline{H} = -\frac{\mathrm{j}RC\omega}{1 + 2\mathrm{j}RC\omega - (RC)^2\omega^2}\,.$$

4 - Écrire la fonction de transfert sous forme canonique, en identifiant H_0, ω_0 et Q tels que

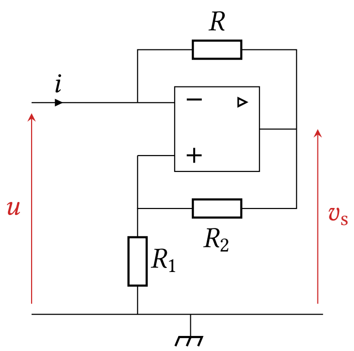
$$\underline{H} = \frac{\dfrac{\mathrm{j}x}{Q}H_0}{1 - x^2 + \dfrac{\mathrm{j}x}{Q}} \qquad \text{avec} \qquad x = \frac{\omega}{\omega_0}\,.$$

5 - Tracer le diagramme de Bode asymptotique en gain et en phase, puis l'allure du diagramme réel. Le tracé doit être justifié.

Simulation de dipôles

Exercice 9 : Résistance négative 2 | 2

- *ALI en régime linéaire ;*
- *Impédance d'entrée.*



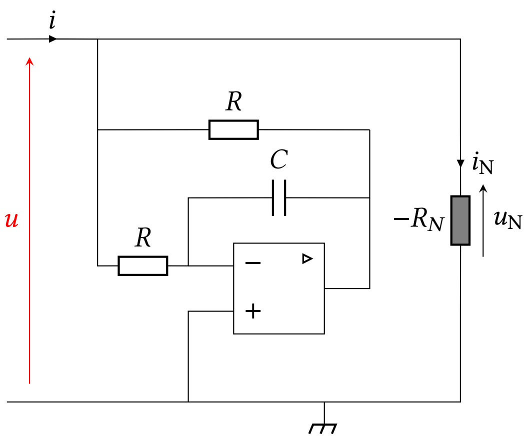
1 - Peut-on anticiper simplement le régime de fonctionnement de l'ALI ? On s'intéresse pour la suite uniquement au fonctionnement en régime linéaire.

2 - Exprimer les potentiels v^+ et v^- en fonction de i et v_s.

3 - En déduire *de manière rigoureuse* que ce montage se comporte comme un dipôle de résistance $R_N < 0$ à exprimer en fonction de R_1, R_2 et R.

Exercice 10 : Simulateur d'inductance — 3 | 2

- *Impédance d'entrée ;*
- *Régime linéaire.*



Les bobines sont des composants très utilisés en électronique de puissance, mais leur grande taille les rend peu pratiques à insérer dans des circuits intégrés. Ce n'est cependant pas un souci puisqu'elles peuvent être remplacées par des montages à ALI comme celui représenté ci-contre, beaucoup plus compact.

L'ALI fonctionne en régime linéaire. Le dipôle « $-R_N$ » désigne l'impédance d'entrée d'un montage à résistance négative, dont la loi de comportement en convention récepteur s'écrit $u_N = -R_N i_N$ (voir exercice 9).

1 - Déterminer l'impédance d'entrée $\underline{Z} = \underline{U}/\underline{I}$ du montage. Il pourra être plus simple de déterminer d'abord l'admittance $\underline{Y} = 1/\underline{Z}$.

2 - En déduire la valeur à donner à R_N pour que le montage soit équivalent à une inductance pure, et en déduire $L_{\text{éq}}$.

Régime de saturation

Exercice 11 : Régulation de température — inspiré écrit Centrale TSI 2018 | 2 | 2

- *Comparateur à hystérésis.*

Cet exercice propose l'étude d'un dispositif simple de régulation thermique, réalisable avec des composants électroniques bon marché. Le régulateur permet de maintenir la température T d'une pièce autour d'une valeur de consigne T_c, en enclenchant le système de chauffage lorsque $T \leq T_c - \Delta T$ et en le stoppant lorsque $T \geq T_c + \Delta T$. Le déclenchement du système de chauffage se fait pour un signal de commande positif, l'arrêt pour un signal de commande négatif.

Le régulateur dispose d'une sonde de température permettant la mesure de T. On utilise comme capteur de température une thermistance CTN (pour Coefficient de Température Négatif), dont la résistance $R(T)$ diminue lorsque la température T augmente. Le dispositif de régulation est réalisé à l'aide du montage représenté figure 2 dans lequel $R(T)$ est la résistance CTN et $E(T_c)$ est fonction de la température de consigne T_c selon la loi

$$E(T_c) = a + b\,T_c\,,$$

L'ALI du bloc 2 est supposé idéal, de tensions de saturation $\pm V_{sat}$. L'objectif est de dimensionner le bloc ❷, c'est-à-dire de déterminer les coefficients a, b et une condition sur les résistances R_1 et R_2.

1 - Déterminer l'expression littérale de $v_1(T)$ en fonction des composants du bloc ❶. On admet que dans la plage de température étudiée, la loi de comportement de la thermistance CTN permet d'approximer

$$v_1(T) \simeq \alpha + \beta T \qquad (\alpha, \beta \text{ deux constantes connues}).$$

2 - Montrer que le potentiel de l'entrée non-inverseuse de l'ALI s'écrit

$$v_+ = k\,v_s + (1-k)E \qquad \text{avec} \qquad k = \frac{R_1}{R_1 + R_2}\,.$$

3 - Justifier que l'ALI du bloc ❷ fonctionne en régime de saturation. Déterminer en fonction de E les valeurs de la tension v_e pour lesquels il y a changement d'état de saturation.

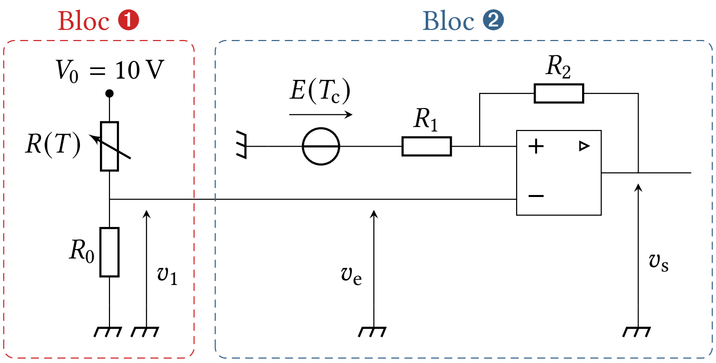


Figure 2 – Schéma du régulateur de température.

4 - Tracer la caractéristique $v_s = f(v_e)$. Quelle est la fonction réalisée par le montage ?

5 - Écrire les conditions de basculement en termes des températures. En déduire que le bon fonctionnement du système impose

$$k = \frac{\beta\,\Delta T}{V_{sat}}\,.$$

6 - Montrer alors que les coefficients doivent vérifier la relation

$$[(1-k)b - \beta]\,T_c + [(1-k)a - \alpha] = 0$$

En déduire les expressions de a et b.

7 - Pourquoi est-il intéressant d'imposer une tension $v_1(T)$ fonction affine de T ?

Exercice 12 : Trigger de Schmidt — 3 | 2

- *Montage à deux ALI ;*
- *Oscillateur auto-entretenu ;*
- *Régime linéaire et de saturation.*

On s'intéresse au montage de la figure 3, appelé *multivibrateur astable* ou *trigger de Schmidt*. Il s'agit d'un oscillateur auto-entretenu, c'est-à-dire d'un montage capable de produire des signaux variables à partir uniquement de l'alimentation continue des ALI. Ce montage ne présente ni tension d'entrée ni tension de sortie, en revanche la sortie du bloc ② est l'entrée du bloc ① et réciproquement.

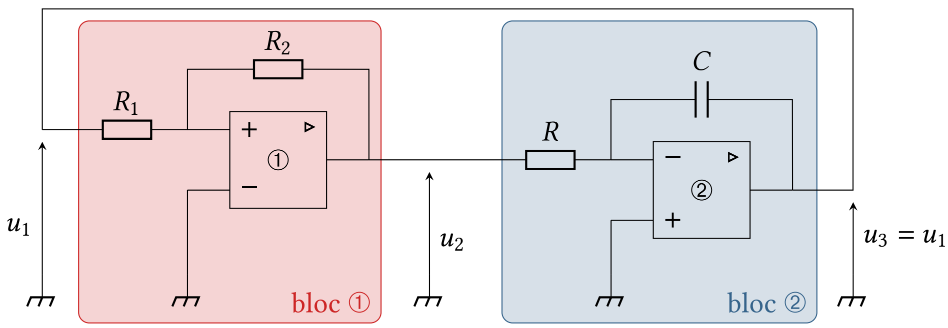


Figure 3 – Multivibrateur astable.

1 - Supposons $\beta = R_1/R_2 < 1$. Étudier le bloc ① isolément et déterminer la relation entre $u_2(t)$ et $u_1(t)$. Quelle fonction réalise-t-il ?

2 - Mêmes questions pour le bloc ②, en posant $\tau = RC$.

3 - La figure 4 représente l'allure des tensions u_1 et u_2 au cours du temps. Identifier la courbe correspondant à chaque tension, et indiquer les valeurs de V_1 et V_2.

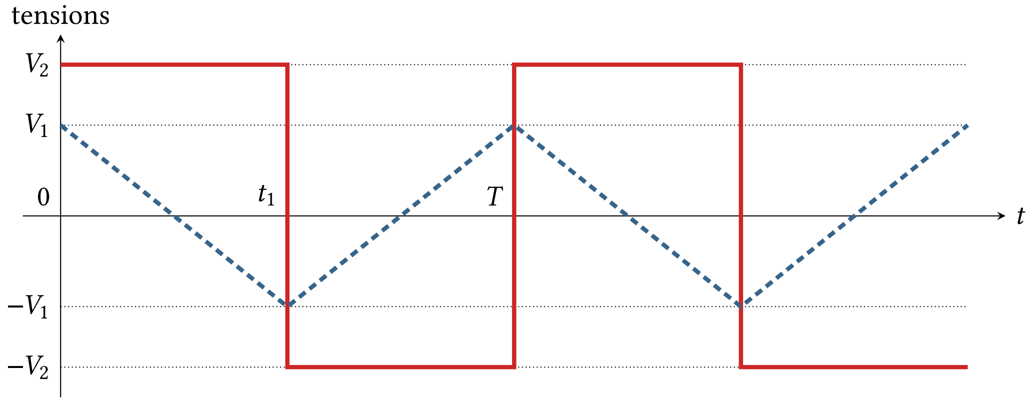


Figure 4 – Allure des tensions u_1 et u_2.

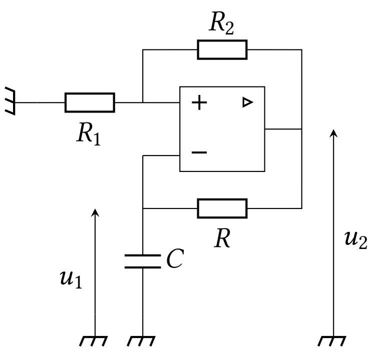
Déterminons maintenant la période des oscillations. On définit $t = 0$ comme un instant auquel l'ALI ① bascule en saturation haute.

4 - Déterminer la condition initiale $u_1(0^+)$ en justifiant précisément (pas seulement à partir de la courbe). En déduire l'instant t_1 auquel l'ALI ① bascule en saturation basse.

5 - Reprendre l'étude à partir de cet instant pour déterminer la période T des oscillations, que l'on exprimera en fonction de β et τ uniquement.

Exercice 13 : Astable compact — 3 | 3

- *Régime de saturation ;*
- *Oscillateur auto-entretenu.*



1 - Montrer que l'ALI fonctionne en régime de saturation. Pour cela, exprimer les potentiels v_+ et v_- en fonction de la tension de sortie u_2 dans une hypothèse de fonctionnement linéaire et conclure.

2 - Établir une relation d'hystérésis entre u_1 et u_2. La représenter graphiquement. On notera $\pm\alpha V_{\text{sat}}$ les tensions de basculement.

3 - On suppose qu'à l'instant $t = 0$ l'ALI vient de basculer en saturation basse. Établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par $u_1(t)$. En déduire l'instant t_1 auquel l'ALI bascule en saturation haute, ce qui amorce une seconde phase.

4 - Déterminer la durée de la deuxième phase. On pourra poser $t' = t - t_1$.

5 - En déduire la période des oscillations, et représenter l'allure des signaux sur quelques périodes.