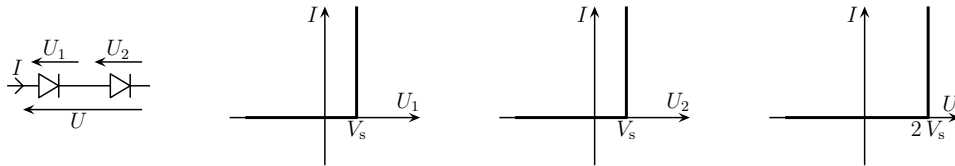


Dans cette police sont écrits les raisonnements menés et autres remarques sur les méthodes employées pour trouver les réponses aux questions posées. C'est à dire à l'oral mais à ne pas écrire en DS.

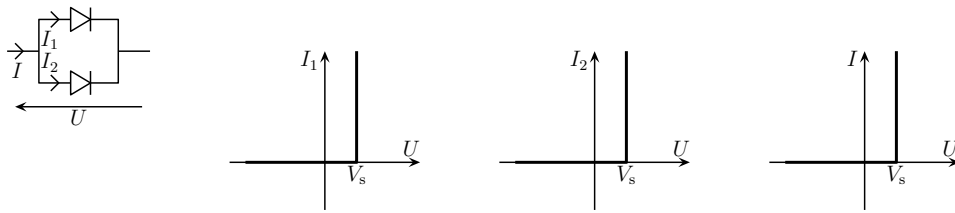
Circuits non linéaires

☛ Exercice 1

► **Association série.** À I fixé, nous devons additionner les tensions, cela donne :

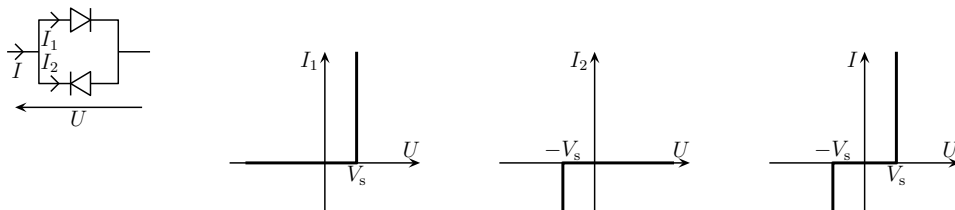


► **Association parallèle.** À u fixée, nous allons sommer les intensités. Cela donne :



☛ *Remarque* : ce montage n'a pas vraiment d'intérêt pratique car même si nous sommes en droit de penser qu'un tel montage permet au courant de se répartir dans les deux diodes et ainsi d'éviter la surchauffe de l'une ou l'autre, en pratique cela ne sera pas le cas. En effet les tensions de seuil des diodes n'étant pas rigoureusement identiques, celle dont la tension de seuil est la plus basse se mettra à passer en première et sera donc parcourue par la grande majorité du courant.

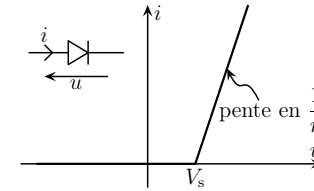
► **Association parallèle.** C'est la même chose que ci-dessus, sauf qu'ici une des deux diodes est renversée. Il faut donc faire attention à la caractéristique.



☛ Exercice 2

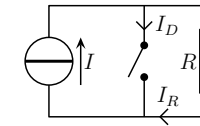
Ici, étant donné que l'énoncé fait référence à la résistance dynamique de la diode, il va de soi que le modèle à utiliser est le modèle de la diode linéarisée.

La caractéristique de la diode est représentée ci-dessous.



► Hypothèse diode bloquée

Faisons le montage équivalent avec la diode bloquée. Comme nous pouvons le voir, il s'agit désormais d'un circuit simple à une maille.



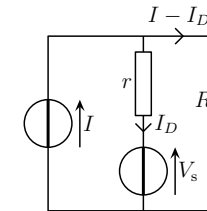
Pour la diode, nous avons $I_D = 0$ à condition d'avoir $u_D < V_s$ où u_D est la tension prise aux bornes de la diode dans le sens naturel.

Dans le circuit nous avons $u_D = +R I_R$ et $I_R + I_D = I$, ce qui donne, après « calculs » :

$$\text{Si } I < \frac{V_s}{R} = 7,0 \text{ mA, alors } I_D = 0 \text{ et } I_R = I$$

► Hypothèse diode passante

Cette hypothèse sera vérifiée pour $I_D > 0$. Le schéma équivalent est représenté ci-dessous.



S'agissant d'un circuit à deux mailles pour lequel nous cherchons des intensités, l'approche maillère va de soi. Il y a deux mailles et un générateur idéal de courant, donc cela revient à une seule inconnue.

Dans le circuit nous avons (lois des mailles) :

$$V_s + r I_D - R(I - I_D) = 0 \quad \rightsquigarrow \quad I_D = \frac{R I - V_s}{r + R}$$

De plus avec $I_R = I - I_D$, nous trouvons $I_R = \frac{r I + V_s}{R + r}$.

La condition de vérification de l'hypothèse s'écrivant : $I_D > 0$, nous obtenons, après calculs :

$$\text{Si } I > \frac{V_s}{R} = 7,0 \text{ mA alors } I_D = \frac{R I - V_s}{R + r} \text{ et } I_R = \frac{r I + V_s}{R + r}$$

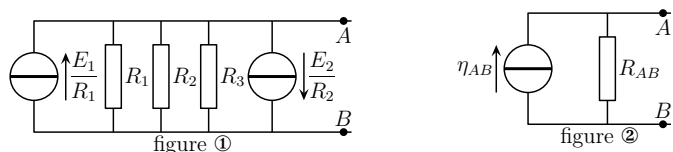
Nous pouvons voir aisément que toutes les valeurs possibles pour I ont été étudiées.

☛ Exercice 3

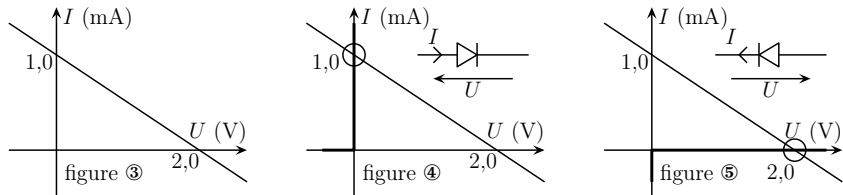
1. En utilisant les transformations THÉVENIN / NORTON, le circuit est équivalent au schéma représenté figure ①.

Ensuite en utilisant les associations en parallèle de générateurs de courant et de résistors, nous arrivons au circuit représenté figure ② où :

$$\eta_{AB} = \frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ A} \quad \text{et} \quad \frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \rightsquigarrow R_{AB} = 2,0 \text{ k}\Omega$$



Finalement nous obtenons la caractéristique du dipôle AB en convention générateur représentée figure ③ ci-dessous.



2. Lorsque la diode est montée en directe, la superposition des caractéristiques est représentée figure ④. Nous pouvons alors en déduire immédiatement que le point de fonctionnement est :

$$I = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ A et } U = 0$$

Lorsque la diode est montée en inverse, cela donne le point de fonctionnement de la figure ⑤ (notons que la caractéristique de la diode en inverse est obtenue à partir de celle montée en directe ayant subi une symétrie centrale de centre O) soit $i = 0$ et $U = 2,0 \text{ V}$.

☛ Exercice 4

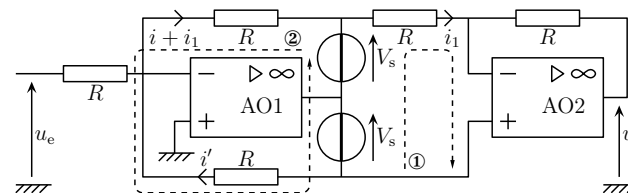
1. Remarquons tout d'abord, et cela restera vrai dans tout l'exercice, que l'AO2, étant rétroactionné uniquement sur son entrée inverseuse, est toujours en régime linéaire.

Pour montrer qu'une situation non linéaire est impossible, nous allons la supposer vraie et montrer qu'il est impossible que les conditions « à vérifier » soient vraies en même temps.

► Les deux diodes sont passantes.

Elles se comportent alors comme des générateurs idéaux de tension. Les deux conditions à vérifier sont $i > 0$ et $i' > 0$.

L'AO1 étant rétroactionné uniquement sur son entrée inverseuse, il est, lui aussi, en régime linéaire.



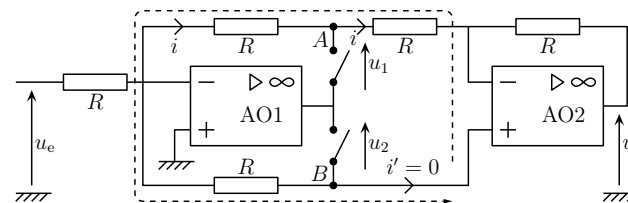
La loi des mailles ① s'écrit $V_s + V_s - R i_1 = 0$ ce qui donne $i_1 = \frac{2V_s}{R} > 0$.

La loi des mailles représentée sur le schéma ci-dessus s'écrit $R(i + i_1) + R i' + V_s + V_s = 0$. Chacun de ces 4 termes est strictement positif par hypothèse. Il est donc impossible de satisfaire cette égalité. Le résultat est ainsi contradictoire, ce qui invalide l'hypothèse initiale :

les deux diodes ne peuvent pas être simultanément passantes

► Les deux diodes sont bloquées.

L'AO1 n'est plus rétroactionné sur son entrée inverseuse, il fonctionne donc en régime de saturation : $V_S = \epsilon V_{\text{sat}}$ avec $\epsilon = \pm 1$. Alors, avec les notations ci-dessous, il faut vérifier $u_1 < V_s$ et $u_2 < V_s$.



La loi des mailles représentée donne $2Ri = 0$ soit $i = 0$, ce qui implique $V_A = V_B = u_e$. Comme $u_2 = V_S - V_B$ et $u_1 = V_A - V_S$, les conditions à respecter sont :

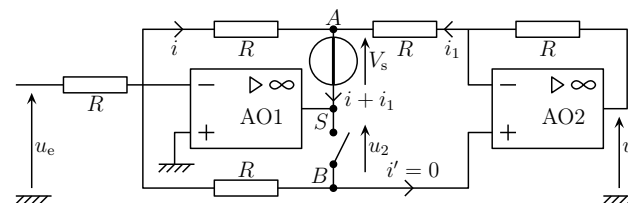
$$\epsilon V_{\text{sat}} - u_e < V_s \quad \text{et} \quad u_e - \epsilon V_{\text{sat}} < V_s$$

La première donne, si $\epsilon = +1$: $u_e > V_{\text{sat}} - V_s \simeq 14,3 \text{ V}$ ce qui n'est pas possible étant donné que $-10 \text{ V} < u_e < 10 \text{ V}$.

La deuxième donne, avec $\epsilon = -1$: $u_e < -V_{\text{sat}} + V_s \simeq -14,3 \text{ V}$, impossible pour les mêmes raisons.

Comme il n'y a pas de solution non contradictoires, l'hypothèse faite est fautive et ainsi on peut dire que les deux diodes ne peuvent pas être bloquées en même temps.

2. (a) Commençons par refaire le schéma avec la diode ① passante et la ② bloquée.



Constata tout d'abord que l'AO1 est en régime linéaire car il est rétroactionné uniquement sur son entrée inverseuse.

Pour que diodes soient dans ces états, il faut d'une part que $u_2 < V_s$ et d'autre part que $i + i_1 > 0$.

→ *Condition sur la diode ②.* Comme la condition se fait en potentiel, mieux vaut une approche nodale. Comme $V_- = V_+$ (régime linéaire d'un AO idéal) et $V_+ = 0$, nous en déduisons $v_B = 0$ et $u_2 = V_S$. La loi des nœuds en terme de potentiel à l'entrée inverseuse de l'AO1 s'écrit donc

$$\frac{u_e - V_-}{R} + \frac{V_1 - V_-}{R} + \frac{V_B - V_-}{R} - 0 = 0 \quad \rightsquigarrow \quad V_A = -u_e$$

Ainsi, comme $V_S = V_A - V_S$ nous en déduisons $V_S = -u_e - V_S$, puis, parce qu'il faut $V_S = u_2 < V_S$: $u_e > -2V_S$.

→ *Conditions sur la diode ①.* Ici, comme nous avons déjà utilisé l'approche nodale pour la question précédente, nous allons la poursuivre afin de déterminer les courants $i = \frac{V_{-,1} - V_A}{R}$ et $i = \frac{V_{-,2} - V_A}{R}$ pour vérifier $i + i_1 > 0$.

Comme $i' = 0$, la loi constitutive du résistor « en dessous » de l'AO1 s'écrit $\frac{V_B - V_{-,1}}{R} = 0$, ce qui donne $V_{-,1} = V_B$.

Or $V_B = V_{+,2}$ et comme l'AO2 est idéal et en régime linéaire : $V_{+,2} = V_{-,2}$. De même pour l'AO1 : $V_{+,1} = V_{-,1}$.

Finalement : $V_{+,2} = V_{-,2} = V_{+,1} = V_{-,1} = u_e$.

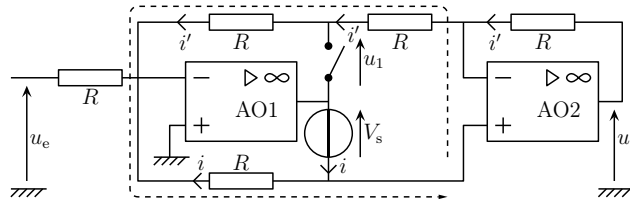
Ainsi la condition se réécrit $i + i_1 = \frac{2u_e}{R} > 0$ soit $u_e(t) > 0$.

Comme cette condition est plus restrictive que la précédente, nous ne gardons que cette dernière.

2. (b) La loi des nœuds en terme de potentiel à l'entrée inverseuse de l'AO2 donne :

$$s \frac{V_A - 0}{R} + \frac{u_s - 0}{R} = 0 \quad \rightsquigarrow \quad u_s = -V_A \quad \rightsquigarrow \quad u_s(t) = u_e(t)$$

3. Redessignons tout d'abord le schéma du circuit.



L'AO1 est en régime linéaire car il est rétroactionné sur son entrée inverseuse. Nous avons donc, puisqu'il est idéal $V_- = V_+ = 0$.

Les conditions à vérifier sont $u_1 < V_S$ pour la diode ① et $i > 0$ pour la diode ②.

→ *Condition sur la diode ①.* Cette condition portant sur un courant, nous allons, pour une fois, regarder de plus près l'approche maillère. En notant les courants sur le circuit, nous en trouvons deux. Il y a donc deux inconnues. Pour l'approche nodale, nous comptons 6 potentiels inconnus... C'est décidé : approche maillère.

La loi des mailles repérée sur le circuit s'écrit :

$$-Ri' - Ri' + Ri = 0 \quad \rightsquigarrow \quad i' = \frac{i}{2}$$

Comme la loi d'Ohm s'écrit pour la résistance à l'extrême gauche $-R(i + i') = u_e$, nous en déduisons $i = -\frac{2}{3} \frac{u_e}{R}$ et $i' = -\frac{1}{3} \frac{u_e}{R}$.

Ainsi avec $u_1 = -V_S - Ri + Ri'$ (additivité des tensions) nous obtenons la condition $-V_S + \frac{u_e}{3} < V_S$ soit $u_e < 6V_S$.

→ *Condition sur la diode ②.* Il faut vérifier $i > 0$.

Avec les résultats obtenus lors de la première vérification, nous obtenons $u_e(t) < 0$.

Comme cette dernière est la plus restrictive, c'est celle que l'on garde.

→ *Loi de fonctionnement*

L'additivité des tensions permet d'écrire $u_s = V_- + Ri' + Ri' + Ri'$ ce qui donne $u_s(t) = -u_e(t)$.

4. Comme $u_s(t) = u_e(t)$ pour $u_e(t) > 0$ et $u_s(t) = -u_e(t)$ pour $u_e(t) < 0$, nous constatons que nous avons bien, en fait $u_s(t) = |u_e(t)|$, ce qui correspond à un montage redresseur double alternance sans seuil.

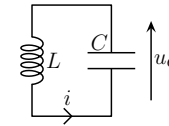
Exercice 5

Analyse physique. C'est un circuit en régime transitoire, un circuit de type L,C qui est donc a priori oscillant. Là, la diode va interdire les oscillations car elle fonctionne en mode « sens interdit » et n'auto-risera donc pas le courant à aller dans les deux sens. C'est pourquoi nous allons tout de suite commencer par l'hypothèse « diode passante ».

Analyse technique. C'est un circuit à une maille, pas la peine de compliquer la situation.

Hypothèse : La diode est passante.

Dans ces conditions, $u_D = 0$ et il faudra vérifier $i \geq 0$. Le circuit est donc équivalent au schéma ci-dessous.



Nous pouvons trouver l'équation différentielle vérifiée par $u_C(t)$ à partir de la loi des mailles :

$$\frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + \omega_0^2 u_C(t) = 0 \quad \text{avec} \quad \omega_0^2 \stackrel{\text{not}}{=} \frac{1}{LC}$$

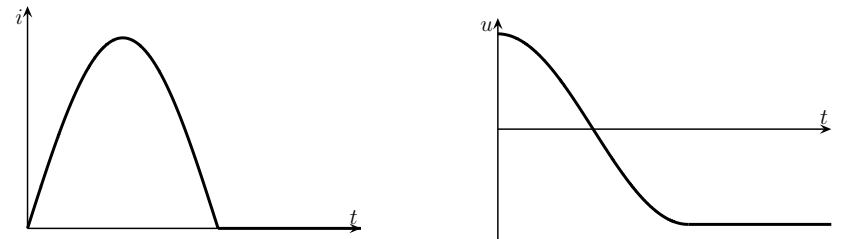
Pour vérifier l'hypothèse, il est nécessaire de résoudre cette équation.

Nous savons que la solution peut s'écrire $u_C(t) = \lambda \cos(\omega_0 t) + \mu \sin(\omega_0 t)$.

Comme la tension aux bornes d'un condensateur est mathématiquement continue, nous avons $u_C(0^+) = u_C(0^-) = E$.

De plus comme l'intensité du courant traversant une bobine est mathématiquement continue, nous avons $i(0^+) = i(0^-) = 0$, ce qui implique $\frac{du_C}{dt}(0) = 0$.

$$\text{Or} \quad \frac{du_C(t)}{dt} = -\lambda \omega_0 \sin(\omega_0 t) + \mu \omega_0 \cos(\omega_0 t).$$



En écrivant les conditions initiales, nous obtenons donc :

$$\begin{cases} \lambda + 0 = E \\ 0 + \mu\omega_0 = 0 \end{cases} \rightsquigarrow \begin{cases} \lambda = E \\ \mu = 0 \end{cases} \rightsquigarrow \begin{cases} u_C(t) = E \cos(\omega_0 t) \\ i(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} = EC\omega_0 \sin(\omega_0 t) \end{cases}$$

L'hypothèse diode passante est vérifiée tant que $i \geq 0$, c'est-à-dire pour $0 \leq t \leq \frac{T_0}{2}$, où $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$.

Nous avons alors $u_C\left(\frac{T_0}{2}\right) = -E$.

À partir de cet instant, la diode ne peut plus être passante, car avec ces conditions initiales ($u_C(0) = -E$, $i(0) = 0$), l'évolution « diode passante » se ferait comme précédemment (mêmes équations déterministes obligent) et aboutirait à $i \leq 0$, i.e. une contradiction.

La diode est donc bloquée et : $i(t) = 0$, $u_C(t) = -E$. Finalement :

$$\text{Pour } 0 \leq t \leq \frac{T_0}{2} \text{ nous avons } \begin{cases} u_C(t) = E \cos(\omega_0 t) \\ i(t) = EC\omega_0 \sin(\omega_0 t) \end{cases}$$

$$\text{et } \begin{cases} \text{Pour } t > \frac{T_0}{2}, \text{ nous avons } \\ i(t) = 0 \end{cases} \begin{cases} u_C(t) = -E \\ i(t) = 0 \end{cases}$$

✿ Exercice 6

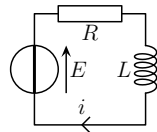
► **Premier cas** : $0 < t < \frac{T}{2}$

Analyse physique. Ici le circuit est en régime transitoire, non seulement parce que c'est dit dans le titre, mais surtout parce que la période T est de l'ordre de la constante de temps du circuit R, L : $\tau = \frac{L}{R}$. Il n'est donc pas possible de supposer le régime permanent atteint avec une bobine qui se comporte comme un fil. Nous aurions pu si seulement nous avions eu $T \gg \tau$. Mais comme ce n'est pas le cas, ça fera un exercice un peu plus long. Tant mieux : plus c'est long, plus c'est bon ! ☺

Analyse technique. C'est un circuit à une maille, donc un circuit simple, donc tout se passera bien.

Hypothèse : la diode est passante.

La diode se comportant, par hypothèse, comme un interrupteur fermé, le circuit est équivalent au schéma ci-dessous. Nous devons vérifier que $i(t) \geq 0$.



Nous pouvons alors trouver l'équation d'évolution avec une simple additivité des tensions :

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = E \rightsquigarrow \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} i(t) = \frac{E}{L} \quad \text{avec } \tau \stackrel{\text{not}}{=} \frac{L}{R}$$

La solution est donc de la forme $i(t) = \lambda e^{-t/\tau} + i_{\text{part}}(t)$ et en cherchant $i_{\text{part}}(t) = C^{\text{te}}$, nous arrivons à $i(t) = \lambda e^{-t/\tau} + \frac{E}{R}$.

Comme l'intensité du courant traversant une bobine est mathématiquement continue, nous avons $i(0^+) = i(0^-) = 0$, ce qui permet de déterminer λ et d'arriver finalement à :

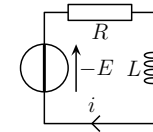
$$\text{Pour } 0 < t < \tau, \text{ nous avons } i(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

Nous pouvons aisément vérifier que l'hypothèse « diode passante » est valide car nous avons bien $i(t) \geq 0$ pour $t < \tau = \frac{T}{2}$.

► **Deuxième cas** : $\frac{T}{2} < t < T$

Hypothèse : la diode est passante.

Cette hypothèse est de fait vérifiée (au moins au début) car l'intensité du courant traversant la bobine est mathématiquement continue *donc* positif. Le circuit est alors équivalent au schéma ci-dessous.



L'additivité des tensions donne tout de suite :

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = -E \rightsquigarrow \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} i(t) = -\frac{E}{R}$$

De même que ci-dessus, la solution est de la forme $i(t) = \lambda e^{-t/\tau} + i_{\text{part}}(t)$ et en cherchant $i_{\text{part}}(t) = C^{\text{te}}$, nous arrivons à $i(t) = \lambda e^{-t/\tau} - \frac{E}{R}$.

L'intensité du courant qui traverse une bobine est mathématiquement continue, donc à $t = \tau$ nous pouvons écrire $i(\tau^+) = i(\tau^-) = \frac{E}{R} \left(\frac{e-1}{e}\right)$.

En utilisant les deux expressions valables pour $i(t)$ lorsque $t > \tau$ et $t < \tau$, nous arrivons à l'égalité $\frac{E}{R} \left(\frac{e-1}{e}\right) = \frac{\lambda}{e} - \frac{E}{R}$ ce qui permet de déterminer λ et finalement d'aboutir à :

$$i(t) = \frac{E}{R} (2e-1)e^{-t/\tau} - \frac{E}{R}$$

► **Valeur maximale**

$i(t > \tau)$ est décroissante, donc la valeur maximale de $i(t)$ est la valeur « initiale » :

$$i_{\text{max}} = i(\tau) = \frac{E}{R} \left(\frac{e-1}{e}\right)$$

► **Diode passante, diode bloquée**

L'hypothèse selon laquelle la diode est passante est soumise à la condition *sine qua non* $i(t) \geq 0$.

Comme $i(t > \tau)$ est une fonction décroissante, la condition sera vérifiée si et seulement si nous avons $i(2\tau) \geq 0$.

$$\text{Or } i(2\tau) = \frac{E}{R} \left(\frac{2}{e} - \frac{1}{e^2} - 1\right) = -0,400 \frac{E}{R} < 0.$$

L'hypothèse selon laquelle la diode est passante jusqu'à $t = 2\tau$ n'est donc pas vérifiée.

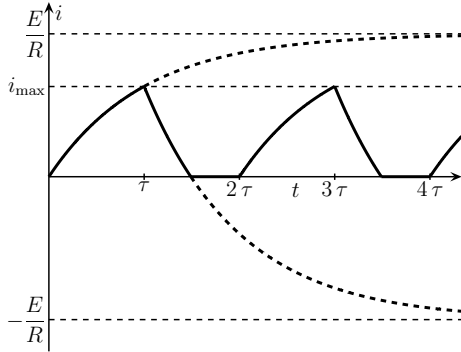
Calculons l'instant t_0 à partir duquel la diode se bloque. Cet instant est tel que $i(t_0) = 0$.

L'équation s'écrit $0 = \frac{E}{R}(2e - 1)e^{-t_0/\tau} - \frac{E}{R}$ ce qui donne, après résolution : $t_0 = \tau \ln(2e - 1)$.

Nous avons bien $1 \leq \ln(2e - 1) = 1,49 \leq 2$.

Finalement (cf. graphes ci-dessous) :

pour $\tau < t < \tau \ln(2e - 1)$, $i(t) = \frac{E}{R} \left((2e - 1)e^{-t/\tau} - 1 \right)$ et pour $\tau \ln(2e - 1) < t < 2\tau$, $i(t) = 0$.



✿ Exercice 7

1. Si v_s prend une valeur positive, alors $v_+ = \beta v_s > 0$. Comme $\varepsilon = v_+ - v_-$ et que $v_- = 0$ (parce que la tension aux bornes du condensateur est mathématiquement continue), alors $\varepsilon > 0$.

Dans ces conditions, l'AO amplifiant ε , v_s atteint brusquement V_{sat} et le condensateur se charge.

En écrivant la loi d'évolution de $v_-(t)$ et en résolvant l'équation différentielle, nous obtenons : $v_-(t) = V_{sat} \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$ avec $\tau = RC$, ce qui n'est autre que la charge d'un condensateur initialement déchargé soumis à l'échelon de tension V_{sat} .

Nous avons toujours $v_+ = \beta v_s$ (diviseur de tension). Donc lorsque v_- atteint βV_{sat} , $\varepsilon = v_+ - v_-$ devient négatif et v_s atteint alors la valeur $-V_{sat}$ puis la tension aux bornes du condensateur tend alors vers $-V_{sat}$.

Évitons ici de parler de décharge du condensateur, car s'il est vrai que dans un premier temps (jusqu'à ce que $v_- = 0$) la quantité de charges accumulées dans le condensateur diminue, cette quantité réaugmente dès lors que v_- devient négatif : le condensateur se recharge mais « à l'envers ».

L'équilibre n'est donc pas possible, le système est instable.

2. Lorsque $v_s = -V_{sat}$, nous avons : $v_-(t) = -V_{sat} + (\beta V_{sat} + V_{sat}) e^{-t/\tau}$ car on reconnaît qu'il s'agit de l'évolution de la tension aux bornes d'un condensateur dans un circuit RC soumis à l'échelon de tension $-V_{sat}$. Il faut juste faire attention à la tension initiale qui, ici, n'est pas nulle.

Déterminons l'instant t_1 tel que $v_-(t_1) = -\beta V_{sat}$. Il faut :

$$-\beta V_{sat} = -V_{sat} + (\beta V_{sat} + V_{sat}) e^{-t_1/\tau} \rightsquigarrow \frac{1 - \beta}{1 + \beta} = e^{-t_1/\tau} \rightsquigarrow t_1 = \tau \ln \frac{1 + \beta}{1 - \beta}$$

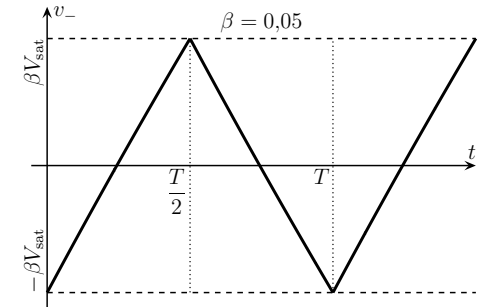
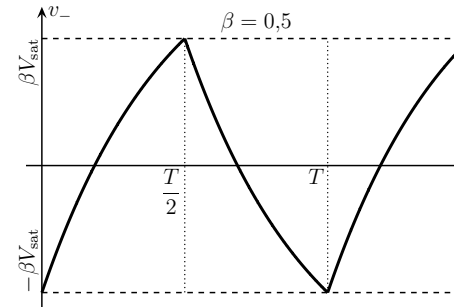
Lorsque $v_s = +V_{sat}$, la tension $v_-(t)$ vaut : $v_-(t) = V_{sat} + (-\beta V_{sat} - V_{sat}) e^{-(t-t_1)/\tau}$ car on reconnaît qu'il s'agit de l'évolution de la tension aux bornes d'un condensateur dans un circuit RC soumis à l'échelon de tension $+V_{sat}$. La condition initiale s'écrit ici $v_-(t_1) = -\beta V_{sat}$.

Ainsi la période T est telle que : $v_-(t) = \beta V_{sat}$, ce qui s'écrit :

$$\beta V_{sat} = V_{sat} - (\beta V_{sat} + V_{sat}) e^{-(T-t_1)/\tau} \rightsquigarrow \frac{1 - \beta}{1 + \beta} = e^{-(T-t_1)/\tau} \rightsquigarrow T - t_1 = \tau \ln \frac{1 + \beta}{1 - \beta}$$

Finalement $T = 2\tau \ln \frac{1 + \beta}{1 - \beta}$.

3. Si $\beta \ll 1$, le signal se triangularise : la constante de temps du circuit RC étant très grande devant la période des oscillations, chaque évolution exponentielle ressemblera qu'à un tout petit bout de droite.



✿ Exercice 8

1. Pour assurer $u_2 = +V_{sat}$, il faut que $\varepsilon = V_+ - V_-$ soit positif. Comme $V_- = 0$, cela revient en fait à $V_+ > 0$.

La loi des nœuds en terme de potentiel à l'entrée non inverseuse s'écrit

$$\frac{u_1 - V_+}{R_1} + \frac{u_2 - V_+}{R_2} = 0 \rightsquigarrow V_+ = \frac{R_1 u_2 + R_2 u_1}{R_1 + R_2}$$

Nous obtenons donc la condition $R_1 u_2 + R_2 u_1 > 0$ et, comme $u_2 = +V_{sat}$: $u_1 > -\frac{R_1}{R_2} V_{sat}$.

La loi de fonctionnement de l'intégrateur s'écrit $u_3(t) = -\frac{1}{RC} \frac{du_2(t)}{dt}$ et comme $u_2 = +V_{sat}$, nous arrivons à $u_3(t) = -V_{sat} \frac{t}{\tau} + C^{te}$ où $\tau \neq RC$.

2. Avec un raisonnement identique, nous constatons qu'il faut $\varepsilon < 0$ puis $V_+ < 0$ ce qui donne $R_1 u_2 + R_2 u_1 < 0$ et comme ici $u_2 = -V_{sat}$, cela donne $u_1 < \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$.

La loi de fonctionnement de l'intégrateur est identique, ce qui donne $u_3(t) = +V_{sat} \frac{t}{\tau} + C^{te}$.

3. Définissons $t = 0$, l'instant où u_2 bascule de $-V_{sat}$ à $+V_{sat}$.

La limite étant atteinte, nous pouvons dire que $u_1(0^-) = \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$.

Or $u_1 = u_2 = u_C$, tension aux bornes du condensateur. Comme cette dernière est mathématiquement continue, nous avons $u_C(0^+) = u_C(0^-) = \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$ et ainsi $u_1(0^+) = \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$.

Comme l'AO est en saturation haute, $u_2 = +V_{\text{sat}}$, alors $u_1(t) = u_3(t) = -V_{\text{sat}} \frac{t}{\tau} + C^{\text{te}}$, ce qui donne, avec la condition initiale $u_1(t) = -V_{\text{sat}} \frac{t}{\tau} + \frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}}$.

Cette expression est valable tant que $u_1 > -\frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}}$, i.e. pour $-V_{\text{sat}} \frac{t}{\tau} + \frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}} > -V_{\text{sat}} \frac{R_1}{R_2}$ ou encore pour $t < 2 \frac{R_1}{R_2} \tau \stackrel{\text{not}}{=} t_0$.

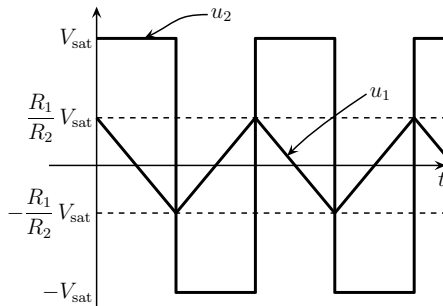
À l'instant $t = t_0$, u_2 bascule de $+V_{\text{sat}}$ à $-V_{\text{sat}}$.

u_3 est mathématiquement continue pour les mêmes raisons que précédemment et $u_3(t) = +V_{\text{sat}} \frac{t}{\tau} + C^{\text{te}}$ avec $u_3(t_0) = -\frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}}$, ce qui donne $u_3(t) = V_{\text{sat}} \frac{t - t_0}{\tau} - \frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}}$.

Cette dernière expression est valable tant que $u_3(t) < \frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}}$, i.e. pour $t - t_0 < t_0$ ou encore pour $t < 4 \frac{R_1}{R_2} \tau \stackrel{\text{not}}{=} T$. À $t = T$, il y a à nouveau un basculement de u_2 et nous nous retrouvons dans la même situation qu'en $t = 0$.

L'allure des tensions est représentée ci-dessous. Nous constatons que :

- u_1 est triangulaire, d'amplitude $\frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}}$ et de fréquence $f = \frac{1}{T}$ soit $f = \frac{R_2}{4 R_1 R C}$.
- u_2 est rectangulaire, d'amplitude V_{sat} et de même fréquence que u_1 .



4. Pour que l'intégrateur remplisse bien son rôle, il faut que $f \gg \frac{1}{R'C}$, ce qui se traduit par la condition $\frac{R_2}{4 R_1 R C} \gg \frac{1}{R' C}$ ou encore $R' \gg 4 \frac{R_1}{R_2} R$.