

# Circuits linéaires du premier ordre

## Sommaire

<b>2.1 Propriétés des composants : le condensateur et la bobine</b>	<b>2</b>
2.1.1 Condensateur	2
2.1.2 Bobine	3
<b>2.2 Étude d'un système concret</b>	<b>4</b>
2.2.1 Présentation	4
2.2.2 Étude expérimentale	4
2.2.3 Modélisation	6
<b>2.3 Évolution des circuits linéaires du premier ordre</b>	<b>8</b>
2.3.1 Propriétés des composants	8
2.3.2 Le régime libre et exemple de résolution	10
2.3.3 Exemple d'un circuit RL	11
2.3.4 Résolution numérique pour un signal d'entrée de forme quelconque	12

### Questions de cours :

- Présenter le condensateur : composant, relation constitutive, démonstration de l'énergie stockée, modélisation en régime permanent.
- Présenter la bobine : composant, relation constitutive, démonstration de l'énergie stockée, modélisation en régime permanent.
- Sur l'exemple d'un circuit RC branché à un générateur de tension continue de fém  $E$ , déterminer l'équation différentielle vérifiée par  $u_c$  et la résoudre soigneusement lorsque le circuit est soumis à un échelon de tension.
- Sur l'exemple d'un circuit RL en série initialement alimenté par un générateur de tension continue de fém  $E$ , présenter le régime libre : équation différentielle, justification de la condition initiale et détermination de  $i(t)$ .

### Capacités exigibles du BO :

- Citer les ordres de grandeurs des composants L et C (cours).
- Exprimer l'énergie stockée dans un condensateur ou une bobine. (Ex. 5)
- Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire pour un circuit linéaire du premier ordre et analyser ses caractéristiques. Confronter les résultats expérimentaux aux expressions théoriques. (TP)
- Distinguer, sur un relevé expérimental, régime transitoire et régime permanent au cours de l'évolution d'un système du premier ordre soumis à un échelon. (TP)
- Interpréter et utiliser les continuités de la tension aux bornes d'un condensateur ou de l'intensité du courant traversant une bobine (Ex. 1 à 5).
- Établir l'équation différentielle du premier ordre vérifiée par une grandeur électrique dans un circuit comportant une ou deux mailles. (Ex. 1 à 5)
- Déterminer la réponse temporelle dans le cas d'un régime libre ou d'un échelon de tension. (Ex. 1 à 5)
- Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire. (Ex. 1, 3, 5)
- Capacité numérique : mettre en œuvre la méthode d'Euler à l'aide d'un langage de programmation pour simuler la réponse d'un système linéaire du premier ordre à une excitation de forme quelconque. (Ex. 2).
- Réaliser un bilan énergétique (Ex. 5)

### Manipulations de cours :

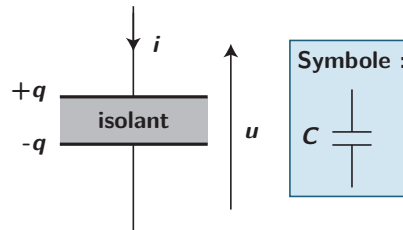
- Manip charge/décharge d'un condensateur avec influence de la valeur de  $R$ , de  $C$ .
- Manip évolution de  $i(t)$  pour un circuit RL.

On s'est intéressés dans le chapitre précédent à l'établissement des relations fondamentales en électricité, ainsi qu'à l'étude de composants électroniques les plus usuels. Néanmoins il en reste deux parmi les plus utilisés (dans les ordinateurs par exemple) : les condensateurs et les inductances, dont on va voir qu'ils peuvent stocker de l'énergie et conduisent à des comportements spécifiques au sein de circuits électriques : ils sont en particulier régis par des équations différentielles du premier ordre, d'où l'appellation de circuits « du premier ordre ».

## I. Propriétés des composants : le condensateur et la bobine

### I.1 Condensateur

#### a) Constitution et relation courant-tension



Un **condensateur**, est un dipôle constitué de deux armatures métalliques séparées par un isolant électrique. Si une tension est appliquée à ses bornes, des charges  $\pm q$  apparaissent sur ses armatures. En effet, en reliant le condensateur à un générateur, on observe brièvement un courant en sortie de ce dernier, signe d'un déplacement de charges. Celles-ci ne pouvant traverser l'isolant, elles s'accumulent sur les armatures jusqu'à ce que la répulsion entre particules de même charge soit trop importante.

#### Définition : capacité d'un condensateur

On définit la **capacité**  $C$  d'un condensateur comme le lien entre la tension appliquée et la charge électrique accumulée sur chaque armature selon la loi (**en convention récepteur**)

\*

$$q = Cu \quad (2.1)$$

Elle est exprimée en farad (symbole F). Elle dépend de l'isolant, de la surface des armatures ainsi que de l'espacement entre celles-ci. Elle prend typiquement des valeurs allant du pF au F.

À l'aide de la définition de l'intensité du courant et de la relation précédente, on obtient la relation constitutive du condensateur reliant intensité et tension en convention récepteur :

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (2.2)$$

En régime stationnaire le condensateur est équivalent à un **interrupteur ouvert**, de caractéristique une droite d'équation  $I = 0$ . Pour cette raison, le condensateur est utilisé en régime variable, d'où l'utilisation des minuscules dans les lois précédentes.

#### b) Aspects énergétiques

En convention récepteur, la puissance reçue par le condensateur vaut :

\*

$$P = ui = Cu \frac{du}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} Cu^2 \right) \quad (2.3)$$

Ceci permet d'exprimer l'énergie reçue algébriquement pendant un temps  $\delta t = t_2 - t_1$  :

\*

$$\Delta \mathcal{E} = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} Cu^2 \right) dt = \mathcal{E}_C(t_2) - \mathcal{E}_C(t_1) \quad (2.4)$$

où l'on a posé :

\*

$$\mathcal{E}_C(t) = \frac{1}{2} Cu(t)^2 \quad (2.5)$$

qui est l'**énergie stockée dans un condensateur** sous forme électrique à l'instant  $t$ .

On rappelle que la puissance  $P$  et l'énergie  $\mathcal{E}$  sont reliées par la relation

$$P = \frac{d\mathcal{E}}{dt}$$

### c) Fonctionnement générateur ou récepteur et utilisations

L'énergie stockée dans un condensateur est sous forme électrique avec la présence d'un champ électrique. Selon le contexte, un condensateur peut fonctionner en tant que récepteur ou générateur :

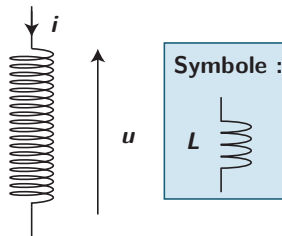
- par exemple, si la tension  $u$  est positive mais décroissante, on a  $\frac{du}{dt} < 0$ , donc  $i < 0$  et alors  $P_{\text{reçue}} < 0$  indiquant un fonctionnement générateur : cela se produit lors de la « décharge » du condensateur, car  $q = Cu$  diminue ;
- au contraire si la tension  $u$  est positive et croissante,  $P_{\text{reçue}} > 0$ , le condensateur accumule des charges et fonctionne en récepteur : le condensateur se « charge ».

Ce composant ne dissipe pas d'énergie, il peut soit en accumuler soit en restituer sans perte. D'un point de vue pratique, un condensateur est utilisé pour modifier un signal électrique (processus de filtrage), ou stocker (et libérer) de l'énergie.

## 1.2 Bobine

### a) Constitution et relation courant-tension

Une bobine est un dipôle constitué d'un bobinage de fils enroulé autour d'un axe :



#### Définition : inductance d'une bobine

On définit l'**inductance**  $L$  d'une bobine comme le lien entre la tension appliquée et le courant électrique la traversant selon la loi (en convention récepteur)

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (2.6)$$

Elle est exprimée en henry (symbole H). Elle dépend de la géométrie du composant (nombre de fils, section de la bobine). Les valeurs usuellement rencontrées vont de  $10 \mu\text{H}$  à  $1 \text{H}$ .

En régime stationnaire, la tension aux bornes d'une bobine est nulle, elle se comporte donc comme un **interrupteur fermé** (ou fil) : sa caractéristique est une droite  $U = 0$ .

On peut être éventuellement plus précis dans la description du composant en rajoutant la **résistance du bobinage**  $r$ , qui est de l'ordre du ohm et alors la tension aux bornes de la bobine vérifie

$$u = L \frac{di}{dt} + ri \quad (2.7)$$

### b) Aspects énergétiques

#### Exercice

Déterminer l'énergie stockée dans une bobine.

La puissance reçue par la bobine s'écrit

$$P = ui = L \frac{di}{dt} i = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} Li^2 \right) \quad (2.8)$$

À l'instar du condensateur, on peut effectuer un bilan énergétique entre deux instants :

$$\Delta \mathcal{E} = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} Li^2 \right) dt = \mathcal{E}_L(t_2) - \mathcal{E}_L(t_1) \quad (2.9)$$

où l'on a posé

$$\mathcal{E}_L(t) = \frac{1}{2}Li(t)^2 \quad (2.10)$$

qui est l'énergie stockée dans une bobine à l'instant  $t$ .

En effet, l'équation  $u = L\frac{di}{dt}$  indique qu'une variation rapide de  $i$  due à l'ouverture brutale du circuit produit une surtension pouvant dépasser la tension de claquage de l'air et pouvant ainsi produire un arc électrique.

Un relais est un interrupteur commandé en tension, il possède en général un état ouvert si la tension est nulle, et fermée si la tension de commande dépasse une certaine valeur. La fréquence de commutation est faible car la fermeture ou l'ouverture est mécanique.

### c) Fonctionnement générateur ou récepteur et utilisations

L'énergie stockée par une bobine est sous forme magnétique. Cependant ce n'est pas aussi pratique qu'avec un condensateur, dans la mesure où cela nécessite la persistance d'un courant électrique. Elle sert plutôt de stockage temporaire d'énergie, par exemple dans les transformateurs de tension. On la retrouve aussi dans certains filtres électriques, dans des dispositifs d'allumage de moteurs thermiques nécessitant la production d'étincelles ou de courants très forts sur des faibles durées.

## II. Étude d'un système concret

### II.1 Présentation

Dans toute la suite de cette section, on va prendre un exemple concret d'utilisation d'un condensateur de capacité  $C$  en régime variable. En effet, intéressons-nous au système de temporisation du mouvement des essuies-glace d'une voiture : selon le réglage, il est possible de faire varier la période du mouvement de va-et-vient des balais. Cela s'explique par l'utilisation d'un condensateur qui subit différentes conditions :

- il peut soit se **charger**, c'est-à-dire qu'il se produit une accumulation de charges sur ses deux armatures, jusqu'à ce que la charge sur l'armature chargée positivement atteigne  $q = CU$  avec  $U$  la tension qu'on impose à ses bornes ;
- il peut également se **décharger**, ce qui correspond au processus inverse où les charges se mettent en mouvement à partir des armatures.

Lorsque la valeur de la charge sur les armatures du condensateur, et donc de la valeur de la tension à ses bornes, dépasse un certain seuil (fixé par exemple à 5 V), un relais passe à l'état fermé et met en marche le moteur commandant les balais d'essuie-glace.

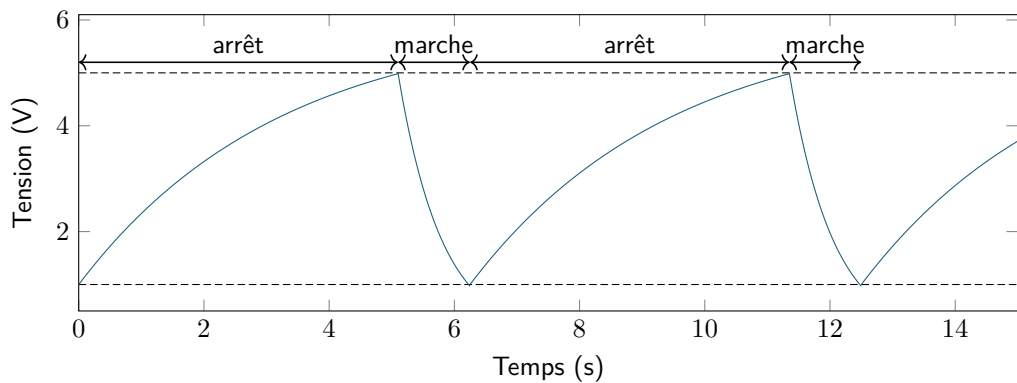


Figure 2.1 – Signal de commande du relais actionnant un essuie-glace

Par un moyen non décrit ici, une modification du circuit provoque la décharge du condensateur : lorsque la tension à ses bornes devient inférieure à une certaine valeur (par exemple 1 V), le relais repasse à l'état ouvert et provoque l'arrêt du moteur, et à nouveau un processus de charge du condensateur. Le phénomène est alors périodique, comme illustré figure 2.1. On observe que l'allure temporelle semble de forme relativement similaire, mais les temps mis en jeu sont différents lors de l'arrêt ou de la marche du moteur. On va étudier par la suite un montage relativement simplifié, afin d'expliquer globalement en quoi la tension aux bornes du condensateur peut varier au cours du temps, et quels paramètres influencent le temps de charge ou de décharge du condensateur.

### II.2 Étude expérimentale

## a) Montage

Étudions donc un circuit composé d'un générateur de tension caractérisé par sa tension à vide  $E_0 = 5,0\text{V}$ , relié à un interrupteur  $K$ , une résistance  $R = 2,3\text{k}\Omega$  et un condensateur de capacité  $C = 1,0\mu\text{F}$  initialement déchargé (aucune charge n'est présente sur ses armatures).

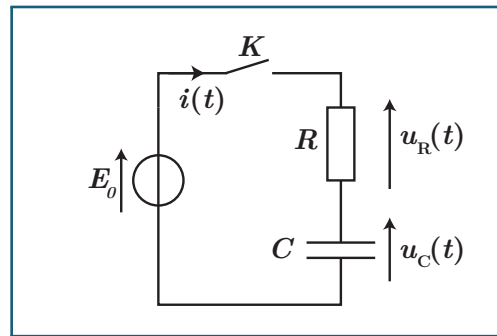


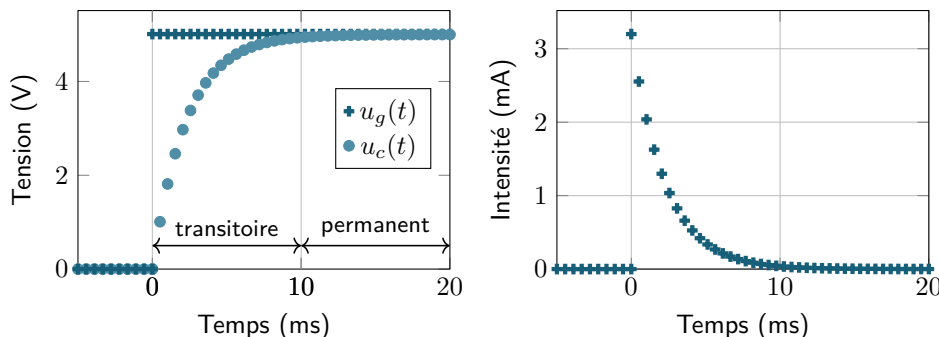
Figure 2.2 – Schéma d'un circuit appelé "circuit RC"

À un instant initial  $t = 0$ , le générateur est connecté au reste du circuit en fermant l'interrupteur et l'acquisition temporelle de la tension aux bornes de la résistance  $u_R(t)$  et du condensateur  $u_C(t)$  est réalisée. Le courant  $i(t)$  est obtenu à partir de  $u_R(t)$  par  $i(t) = \frac{u_R(t)}{R}$ , représenté ci-après.

### Échelon de tension

Lorsqu'un générateur passe d'une valeur nulle (à  $t = 0^-$ ) à une valeur non nulle (à  $t = 0^+$ ), le signal délivré est appelé un **échelon de tension**. Lorsqu'un circuit électrique est soumis à un tel signal, on dit qu'on étudie sa **réponse indicielle**.

## b) Observations expérimentales



À partir de l'instant où l'interrupteur est fermé, les courbes expérimentales représentées ci-dessus montrent que :

- la tension aux bornes du condensateur évolue jusqu'à atteindre une valeur qui semble ici être celle du générateur de tension ;
- \* ▪ pendant ce même laps de temps, le courant évolue en partant d'une valeur maximale et tend vers 0 lorsque la tension aux bornes du condensateur se stabilise ;
- la tension aux bornes du condensateur semble continue lors de la fermeture de l'interrupteur, mais ce n'est pas le cas du courant.

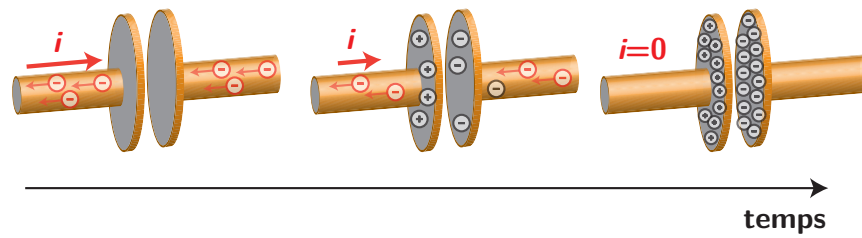
### Régimes possibles

On distingue deux régimes possibles de fonctionnement :

- le régime **permanent** ou **établi** lorsque la réponse du système prend la même forme que l'entrée, ici une valeur constante ;
- le régime **transitoire** reliant deux régimes permanents.

### c) Interprétation qualitative du phénomène

Le phénomène observé peut être interprété qualitativement et est illustré ci-dessous.



Dès que le condensateur est soumis à une tension à ses bornes, un mouvement d'électrons (donc un courant) se produit et permet la charge, c'est-à-dire l'accumulation des charges sur chacune des armatures, avec apparition d'un courant électrique. Au fur et à mesure, du fait des interactions électrostatiques répulsives, de moins en moins de charges se déplacent (l'intensité du courant diminue), jusqu'à ce que le condensateur atteigne sa limite maximale où aucun courant n'existe, ce qui traduit un équilibre entre la répulsion entre particules de même charge, et l'attraction entre particules de charges opposées.

On observe alors qu'un courant électrique existe alors que le circuit est ouvert : en effet, le condensateur est composé d'un milieu isolant, aucune charge ne passe entre les deux armatures. Néanmoins il existe bien un mouvement de charges de part et d'autre.

### II.3 Modélisation

#### a) Équation différentielle

Afin d'exprimer la tension aux bornes du condensateur, appliquons la loi des mailles au circuit :

$$E_0 - u_R(t) - u_c(t) = 0 \iff E_0 = Ri(t) + u_c(t) \quad (2.11)$$

\* Puis avec  $i = C \frac{du_c}{dt}$  il vient :

$$RC \frac{du_c}{dt} + u_c = E_0 \quad (2.12)$$

On obtient une **équation différentielle du premier ordre** associée à la variable  $u_c$ .

#### b) Résolution

Avant d'explicitier les solutions mathématiques de l'équation précédente, effectuons une analyse dimensionnelle du terme  $RC$  qui apparaît dans cette équation. Via l'équation différentielle,  $\left[RC \frac{du_c}{dt}\right] = [u_c]$  soit  $\frac{[RC]}{T}[u_c] = [u_c]$  donc  $[RC] = T$ . On pose donc  $\tau = RC$  la **constante de temps du circuit RC**.

On cherche donc à résoudre l'équation  $\tau \frac{du_c}{dt} + u_c = E_0$ , plusieurs étapes sont nécessaires :

- \* ■ écriture de la **solution de l'équation sans second membre** (ESSM)  $\tau \frac{du_c}{dt} + u_c = 0$  dont on admet qu'elle prend la forme  $u_{c,ssm}(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$  où  $A$  est une constante réelle pour l'instant inconnue ;
- recherche de la **solution particulière**, que l'on suppose constante car le second membre est une constante : avec  $\frac{du_{c,p}}{dt} = 0$ , il vient  $u_{c,p} = E_0$  ;
- écriture de la solution générale de l'équation avec second membre

$$u_c(t) = u_{c,ssm}(t) + u_{c,p}(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + E_0$$

- \* ■ utilisation des conditions initiales, ici  $u_c(t=0) = 0$  : on le justifiera dans la section suivante, admettons-le pour l'instant, en concordance avec les observations expérimentales. Il vient alors  $u_c(0) = 0 = A + E_0$  soit  $A = -E_0$

Ce modèle simple explique par exemple que la capacité d'un condensateur augmente avec la surface (à répulsion identique entre les particules de même charge, on peut placer davantage de charges sur chaque armature), et diminue avec l'épaisseur (car l'attraction est moins importante si les particules de charge opposée sont plus éloignées).

La solution est donc finalement

\*

$$u_c(t) = E_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (2.13)$$

Elle est en parfaite concordance avec les données expérimentales comme l'illustre la figure 2.3, et l'on justifie bien que la tension aux bornes du condensateur tend bien vers celle du générateur de tension.

### c) Caractérisation du régime transitoire

La constante de temps  $\tau = RC = 2,3 \text{ ms}$  joue un rôle fondamental pour caractériser le régime transitoire, semblant durer approximativement 10 ms. En effet, on peut chercher à quel instant la tension aux bornes du condensateur vaut approximativement  $E_0$  à 1% près :

$$u(t) = 0,99E_0 \Leftrightarrow 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} = 0,99 \Leftrightarrow e^{-\frac{t}{\tau}} = 0,01 \Leftrightarrow t = -\ln(0,01)\tau \Leftrightarrow t = 4,6\tau \quad (2.14)$$

On remarque également que pour  $t = \tau$ ,  $u(\tau) = 0,63E_0$  **lors de la charge**. Cette dernière méthode est d'ailleurs la plus utile pour déterminer rapidement la valeur numérique de  $\tau$ .

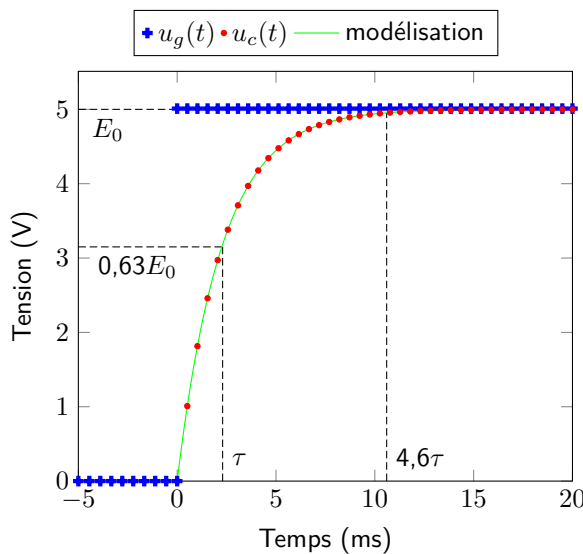


Figure 2.3 – Tension  $u_c$  lors de la charge d'un condensateur pour un circuit RC et modélisation théorique.

#### Régime transitoire d'un système du premier ordre

Pour un système du premier ordre dont un paramètre physique  $f$  vérifie l'équation

$$\tau \frac{df}{dt} + f = \text{cste} \quad (2.15)$$

$\tau$  est alors appelée constante de temps du système ; l'évolution temporelle est liée à la fonction  $e^{-\frac{t}{\tau}}$ , et le temps du régime transitoire est de l'ordre de quelques  $\tau$ .

La constante de temps est ainsi une bonne indication du **temps de réponse du système**, que l'on peut donc modifier simplement en changeant la valeur de la résistance ou de la capacité, dans l'exemple étudié.

Pour revenir à l'exemple initial du balais d'essuie-glace, on observe deux types de régimes transitoires, avec deux constantes de temps différentes et des conditions initiales différentes. On observe aussi une charge ou une décharge, ce qui implique qu'il faut savoir étudier les systèmes du premier ordre dans un cadre très général.

### d) Bilan de puissance et d'énergie

Effectuons un bilan de puissance lors de la charge d'un condensateur d'un circuit RC branché à un générateur de tension  $E_0$  (circuit de la figure 2.2) . **Une méthode possible consiste à partir de la loi**

des mailles lorsqu'elle n'est parcourue que par un seul courant et de multiplier par le courant :

$$E_0 i = Ri^2 + u_c i \Leftrightarrow P_{\text{gén}} = P_{\text{joule}} + u_c C \frac{du_c}{dt} = P_{\text{joule}} + \frac{d\mathcal{E}_{\text{cond}}}{dt} \quad (2.16)$$

\* avec  $\mathcal{E}_{\text{cond}} = \frac{1}{2} C u_c^2$  l'énergie stockée à un instant  $t$  dans le condensateur.

Le bilan est alors clair : la puissance fournie par le générateur se répartit en puissance dissipée par effet Joule dans le conducteur ohmique et en puissance stockée dans le condensateur.

On peut aller plus loin en calculant l'énergie apportée et cédée durant l'ensemble du régime transitoire (soit théoriquement pour un temps compris entre  $t = 0$  et  $t \rightarrow +\infty$ , même si on considèrera en pratique qu'au bout de quelques  $\tau$  le régime permanent est quasiment atteint). L'intensité du courant

vaut déjà  $i(t) = C \frac{du_c}{dt} = C \frac{E_0}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{E_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$ ,

▪ l'énergie cédée par le générateur est

$$\mathcal{E}_g = \int_0^{+\infty} E_0 i(t) dt = \int_0^{+\infty} \frac{E_0^2}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} dt = \frac{E_0^2}{R} \left[ -\tau e^{-\frac{t}{\tau}} \right]_0^{+\infty} \quad (2.17)$$

$$= \frac{\tau E_0^2}{R} = C E_0^2 \quad (2.18)$$

▪ l'énergie dissipée par effet Joule est

\* 
$$\mathcal{E}_j = \int_0^{+\infty} Ri^2(t) dt = \int_0^{+\infty} \frac{E_0^2}{R} e^{-2\frac{t}{\tau}} dt = \frac{E_0^2}{R} \left[ -\frac{\tau}{2} e^{-2\frac{t}{\tau}} \right]_0^{+\infty} \quad (2.19)$$

$$= \frac{\tau E_0^2}{2R} = \frac{C E_0^2}{2} \quad (2.20)$$

▪ et l'énergie stockée dans le condensateur vaut :

$$\mathcal{E}_{\text{cond}} = \int_0^{+\infty} \frac{d\mathcal{E}_{\text{cond}}}{dt} dt = \left[ \frac{1}{2} C u_c(t)^2 \right]_0^{+\infty} = \frac{C E_0^2}{2} \quad (2.21)$$

On retrouve bien le bilan :  $\mathcal{E}_g = \mathcal{E}_j + \mathcal{E}_{\text{cond}}$  et l'on remarque que  $\mathcal{E}_{\text{cond}} = \mathcal{E}_j$  : il y a autant de pertes, ici par effet Joule, que d'énergie stockée. On peut alors définir un rendement de conversion énergétique

$$\eta = \frac{\mathcal{E}_{\text{cond}}}{\mathcal{E}_g} = \frac{1}{2} \text{ quelle que soit la valeur choisie pour } R \text{ et } C.$$

### III. Évolution des circuits linéaires du premier ordre

#### III.1 Propriétés des composants

##### a) Régime permanent

Avant d'effectuer tout calcul, il est parfois bon de savoir déterminer facilement quels seront les courants et tensions en régime permanent, lorsqu'un circuit comporte des condensateurs et des inductances. On va se servir des relations courant-tension étudiées au chapitre précédent, dans le cas d'un régime permanent indépendant du temps :

- pour une bobine caractérisée par son inductance  $L$  et par sa résistance  $r$ ,  $u_L(t) = L \frac{di}{dt} + ri$  soit  $u_L = ri$  en régime permanent ;
- pour un condensateur de capacité  $C$ , l'intensité du courant le traversant vaut  $i = C \frac{du_c}{dt} = 0$  en régime permanent.

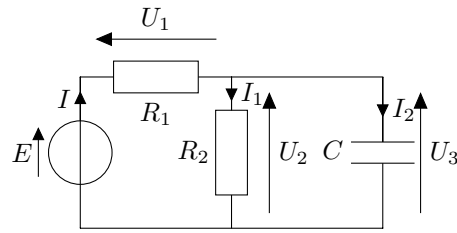
#### Comportement en régime permanent

En régime permanent où toutes les grandeurs électriques sont des constantes :

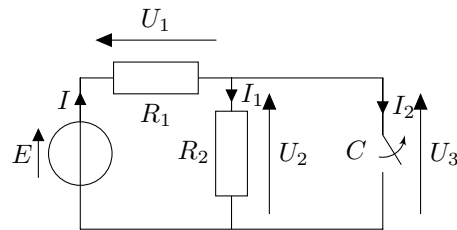
- une inductance se comporte comme un **fil** (interrupteur fermé) ou de manière plus complète comme une résistance (si cette dernière est précisée) ;
- un condensateur se comporte comme un **interrupteur ouvert** (ou une résistance infinie).



Exemple : considérons le circuit suivant :



En régime permanent, le circuit devient :



\* Alors les deux résistances sont en série,  $I = I_1$  et  $U_2 = U_3 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}E$  en régime permanent.

### b) Continuité ou discontinuité de grandeurs électriques

Au sein d'un circuit, la présence de composants tels qu'inductances et condensateurs ont une grande influence sur les variations temporelles de grandeurs électriques. Afin de le montrer, partons du constat qu'en physique, **l'énergie est une grandeur continue** : en effet, toute discontinuité d'énergie impliquerait une puissance infinie, ce qui n'est physiquement pas acceptable.

Par conséquent, en reprenant les expressions des énergies stockées dans les composants usuels :

- pour une inductance :  $\mathcal{E}_L = \frac{1}{2}Li^2$  implique que **l'intensité du courant circulant dans la bobine est continue** ;
- pour un condensateur :  $\mathcal{E}_C = \frac{1}{2}Cu_C^2 = \frac{q^2}{2C}$  implique que **la tension aux bornes du condensateur comme la charge portée par chacune de ses armatures est continue** ;
- néanmoins la tension aux bornes d'une inductance comme l'intensité du courant dans la branche contenant un condensateur peuvent être discontinues.

\* Cela permet de justifier les conditions initiales lors de la résolution d'équations différentielles du premier ordre. Dans l'exemple de la section précédente, la tension aux bornes du condensateur avant fermeture de l'interrupteur valant 0, on peut donc écrire  $u_c(t) = 0$  pour  $t < 0$ . Il vient alors que  $u_c(t = 0^-) = 0$ , puis par continuité,  $u_c(t = 0^+) = u_c(t = 0^-) = 0$ .

Cette notation «  $t = 0^-$  » signifie que l'on prend la limite de la fonction  $u_c(t)$  pour  $t$  tendant vers 0 par valeurs inférieures

### Exercice

Sur le même circuit, justifier que le courant est non nul à  $t = 0^+$  en obtenant son expression à l'aide de la loi des mailles.

$i(t = 0^-) = 0$  car l'interrupteur était ouvert. On peut ensuite écrire la loi des mailles à  $t = 0^+$  :

$$E_0 = Ri(t = 0^+) + u_c(t = 0^+) \iff E_0 = Ri(t = 0^+) \iff i(t = 0^+) = C \frac{du_c}{dt}(t = 0^+) = \frac{E_0}{R} \quad (2.22)$$

### c) Influence d'une bobine ou d'un condensateur dans un circuit

On peut noter d'après les observations précédentes, que le condensateur impose la continuité de la tension à ses bornes, et toute variation des conditions extérieures (passage d'une tension nulle à non nulle par la fermeture de l'interrupteur du circuit 2.2) est « freinée » par la présence du condensateur. Un **condensateur s'oppose aux variations de tensions à ses bornes**, selon un temps caractéristique généralement proportionnel à sa capacité  $C$ .

De la même manière, une **bobine s'oppose aux variations de l'intensité la traversant**, selon un temps caractéristique généralement proportionnel à son inductance  $L$ . On le montrera dans le dernier exemple du cours.

### III.2 Le régime libre et exemple de résolution

#### Régime libre

Lorsqu'un circuit a été préalablement soumis à un apport énergétique (échelon de tension par exemple), le **régime libre** consiste à éteindre toutes les sources d'énergie et regarder comment se comporte le circuit au cours du temps.

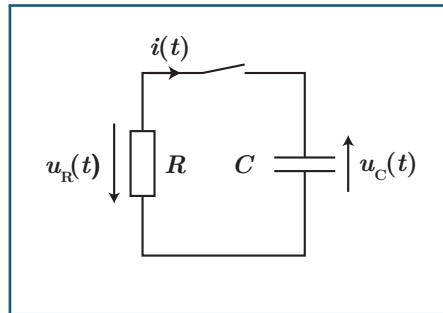


Figure 2.4 – Circuit RC dans le cas d'un régime libre

Déterminons l'évolution de  $i(t)$  dans ce circuit si initialement le condensateur a été chargé sous une tension  $E_0$  jusqu'à  $t = 0^-$ .

Appliquons donc la loi des mailles :

$$u_C + Ri = 0 \quad (2.23)$$

soit avec  $i = C \frac{du_C}{dt}$  il vient

$$i = C \frac{d(-Ri)}{dt} = -RC \frac{di}{dt} \Leftrightarrow RC \frac{di}{dt} + i(t) = 0 \quad (2.24)$$

On reconnaît une équation différentielle du premier ordre et l'on pose naturellement  $\tau = RC$ . La solution est simple, comme le second membre est nul :

$$i(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.25)$$

\*

où  $A$  est une constante à déterminer via les conditions initiales. Pour se faire, utilisons le fait que  $u_C$  est une grandeur continue. Alors

$$u_C(t = 0^-) = E_0 = u_C(t = 0^+) \quad (2.26)$$

soit à l'aide de la loi des mailles

$$Ri(t = 0^+) + u_C(t = 0^+) = 0 \Leftrightarrow i(t = 0^+) = -\frac{u_C(t = 0^+)}{R} = -\frac{E_0}{R} = A \quad (2.27)$$

La solution de l'équation s'écrit finalement  $i(t) = \frac{-E_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$ . Là encore, le temps du régime transitoire va être gouverné par  $\tau$ , comme l'illustre la figure ci-après.

L'évolution de la tension est alors telle que  $Ri(t) + u_C(t) = 0$  soit

$$u_C(t) = -Ri(t) = E_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.28)$$

On observe donc la même allure que lors de la mise en marche du moteur des essuies-glace de l'exemple introductif.

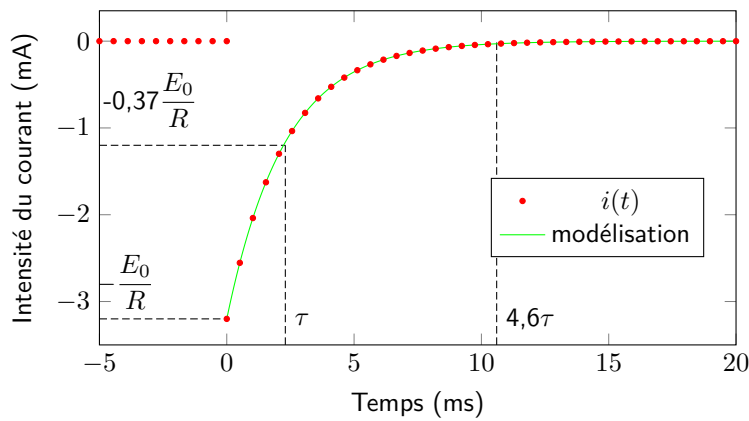
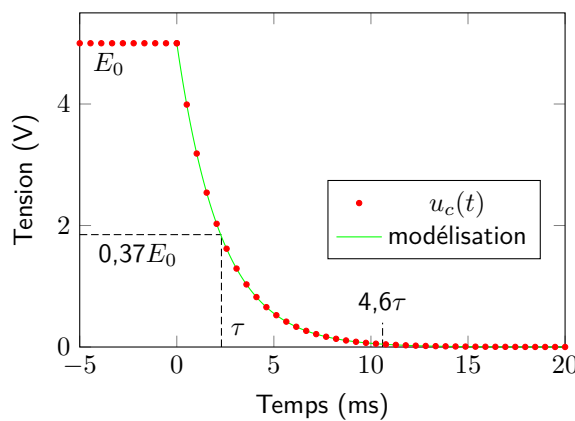


Figure 2.5 – Évolution du courant lors de l'évolution libre d'un circuit RC



### III.3 Exemple d'un circuit RL

Étudions brièvement un circuit RL pour montrer que l'on retrouve le même type d'équation : on considère donc un circuit électrique alimenté par un générateur de tension  $E_0$ , en série avec une bobine d'inductance  $L$  et une résistance  $R$ . À  $t = 0$  on ferme l'interrupteur.

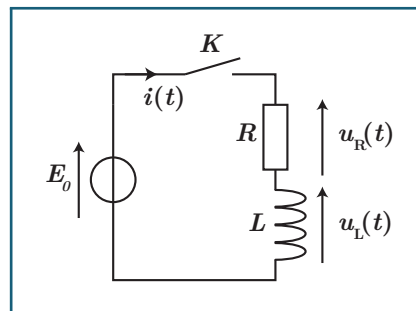


Figure 2.6 – Circuit composé d'une inductance en série avec une résistance, couramment appelé circuit RL

#### Exercice

Déterminer l'équation différentielle pour le courant  $i(t)$  et le résoudre en justifiant les conditions initiales. Appliquons la loi des mailles au circuit :

$$E_0 = u_R + u_L = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2.29)$$

que l'on peut mettre sous la forme

$$\tau \frac{di}{dt} + i(t) = \frac{E_0}{R} \quad (2.30)$$

où l'on introduit une constante de temps  $\tau = \frac{L}{R}$ . On retrouve à nouveau une équation différentielle d'ordre 1 de la même forme que celles obtenues précédemment. On constate ainsi que plus la valeur de l'inductance est élevée, plus le régime transitoire est long, ce qui signifie que l'inductance va s'opposer d'autant plus fortement aux variations d'intensité la traversant : on l'expliquera plus en détail lors de l'étude des phénomènes d'induction.

En se servant de la condition initiale à l'aide de la continuité du courant dans une bobine :  $i(t = 0^+) = i(t = 0^-) = 0$ , il vient finalement

$$i(t) = \frac{E_0}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (2.31)$$

On peut enfin effectuer de la même manière que pour le circuit RC un bilan de puissance  $P_{\text{généré}} = P_{\text{joule}} + P_{\text{bob}}$  où  $P_{\text{bob}} = \frac{d\mathcal{E}_L}{dt}$ . La seule nuance est que l'énergie fournie par le générateur ne cesse jamais car il y a un courant non nul en régime permanent (à la différence d'un circuit RC).

### III.4 Résolution numérique pour un signal d'entrée de forme quelconque

Considérons le cas où le généralteur de tension du circuit précédent n'est pas continu, mais créneau, ou triangulaire, ou même quelconque. On peut alors résoudre numériquement l'équation différentielle linéaire du premier ordre à l'aide de la méthode d'Euler (cf. fiche annexe).

On part donc de  $\frac{di}{dt} = \frac{e(t)}{L} - \frac{1}{\tau}i(t)$  en remplaçant  $E_0$  par  $e(t)$ . On peut donc poser  $f(y, t) = \frac{e(t)}{L} - \frac{1}{\tau}y$ .

```

1  ## Modules ##
2  import numpy as np
3  import matplotlib.pyplot as plt
4
5  ## Variables ##
6  e0=1
7  n=1000
8  tau=1e-5
9  L=1e-3 #L=1mH
10 e1=np.ones(n)*e0
11
12 y0=0
13
14 ## Mise en place de l'algorithme d'Euler ##
15 def f(y,e,i): #on utilise plutôt une indexation à partir de e qu'un temps
16     return e[i]/L-y/tau
17
18 def euler(f,a,b,y0,n,e):
19     t=np.linspace(a,b,n)
20     h=(b-a)/(n-1) #on veut n points, donc il faut n-1 intervalles
21     y=np.zeros(n)
22     y[0]=y0
23     for i in range(n-1):
24         y[i+1]=y[i]+h*f(y[i], e ,i)
25     return (t,y)
26
27 ## Résolution ##
28 solution=euler(f,0,5*tau,y0,n,e1)
29 plt.plot(solution[0]*1e6,e1*tau/L*1000,'k--')
30 plt.plot(solution[0]*1e6,solution[1]*1000)
31 plt.title("$i(t)$ dans le cas d'une tension constante")
32 plt.title("Courant (mA)")
33 plt.xlabel("Temps (en $\mu$s)")
34 plt.show()
35
36 ##### Réponse du système à un signal créneau #####
37

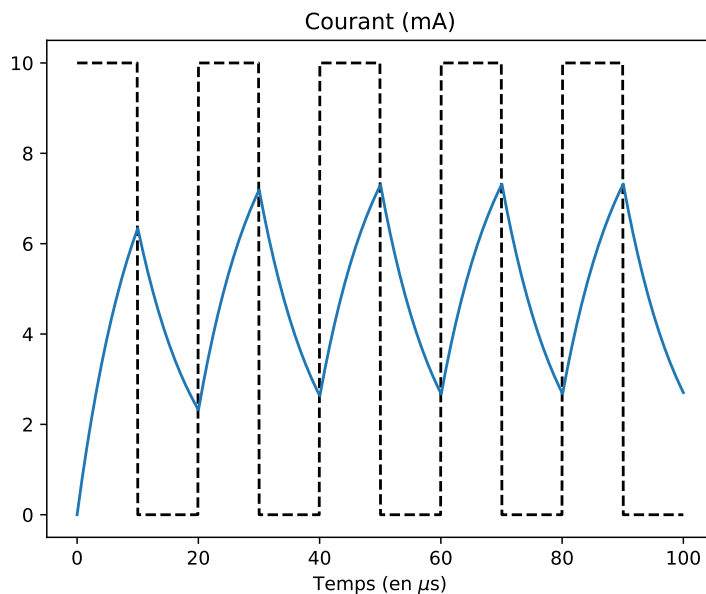
```

```

38 temps=np.linspace(0,10*tau,n)
39
40 def creneau(t,T,A):
41     t0=t-(t//T)*T
42     if 0<=t0<=T/2:
43         return A
44     else:
45         return 0
46
47 vcreneau=np.vectorize(creneau)
48
49 e2=vcreneau(temps,2*tau,e0)
50
51 solution2=euler(f,0,10*tau,y0,n,e2)
52 plt.plot(solution2[0]*1e6,e2*tau/L*1000,'k--')
53 plt.plot(solution2[0]*1e6,solution2[1]*1000)
54 plt.title("$i(t)$ dans le cas d'une tension créneau")
55 plt.title("Courant (mA)")
56 plt.xlabel("Temps (en $\mu$s)")
57 plt.show()

```

On aboutit, dans le cas d'un signal créneau,   l'allure suivante (conforme aux observations expérimentales) :

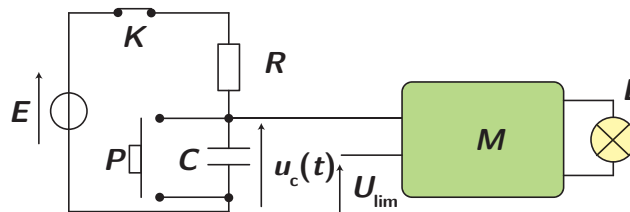


# Exercices

## 2.1 Minuterie d'une lampe

On étudie le principe de fonctionnement d'une minuterie permettant d'éteindre une lampe automatiquement au bout d'une durée  $t_0$  réglable. Dans le montage suivant, un composant  $M$  permet l'allumage de la lampe  $L$  tant que la tension du condensateur est inférieure à une tension limite, notée  $U_{\text{lim}}$  fixée ici à 20 V. Ce composant possède une alimentation électrique propre qui lui fournit l'énergie nécessaire à l'allumage de la lampe. On admettra qu'il ne perturbe pas le fonctionnement du circuit RC alimenté par un générateur de tension  $E = 30$  V.

À l'instant initial, le condensateur est déchargé par l'appui sur le bouton poussoir, et l'interrupteur  $K$  se ferme.



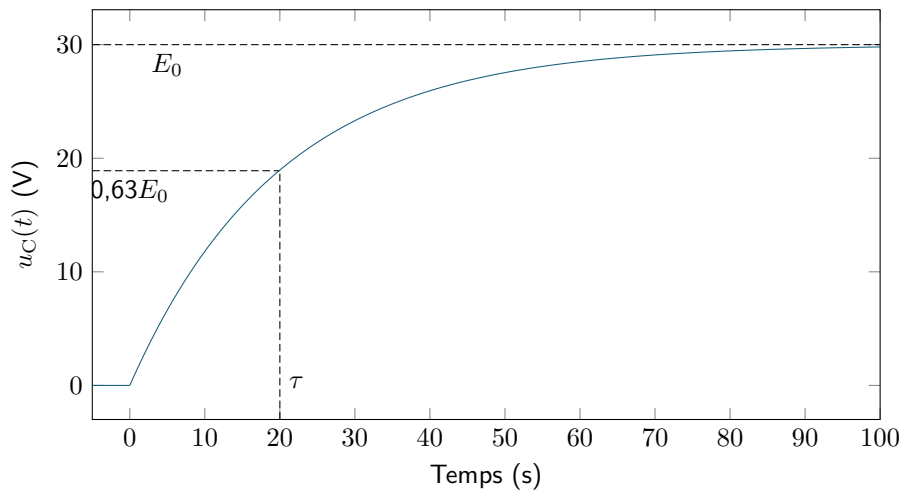
1. Établir l'équation différentielle donnant les variations de  $u_C(t)$  aux bornes du condensateur en fonction du temps.
2. Quelle est la valeur  $U_C$  en régime permanent ?
3. Résoudre l'équation différentielle précédente, en ayant défini une constante de temps  $\tau$ .
4. Tracer le graphique de  $u_C(t)$  en faisant apparaître la tension  $E$  et la constante de temps  $\tau$ .
5. Calculer la valeur de  $\tau$  pour  $R = 100$  k $\Omega$  et  $C = 200$   $\mu$ F.
6. Donner l'expression littérale de la date  $t_0$  à laquelle la tension aux bornes du condensateur atteint la valeur limite  $U_{\text{lim}}$ . Calculer  $t_0$  et vérifier la validité du résultat à l'aide du tracé de la question 4).
7. On a fixé  $U_{\text{lim}} = 20$  V pour obtenir une durée d'allumage  $t_0$  voisine de  $\tau$ . Pour quelle raison choisir  $t_0$  très supérieure à  $\tau$  n'aurait-il pas été judicieux pour un tel montage ?
8. Quels paramètres du montage peut-on modifier afin d'augmenter la durée d'allumage de la lampe ?

- 
1. Lorsque l'interrupteur P n'est pas actionné, le condensateur est relié à une résistance et au générateur. Le circuit d'allumage de lampe ne perturbant pas le condensateur, on a donc un circuit RC comme dans le cours. La loi des mailles conduit donc à  $\tau \frac{du_C}{dt} + u_C = E$  avec  $\tau = RC$ .
  2. En régime permanent, le condensateur est un interrupteur ouvert et le courant dans le circuit est donc nul. Par une loi des mailles,  $E = U_{mC}$ .
  3. On intègre l'équation différentielle :

- l'équation homogène admet pour solution  $u_{C,h}(t) = \lambda e^{-\frac{t}{\tau}}$  ;
- la solution particulière est cherchée sous la forme d'une constante, le second membre étant constant donc  $u_{C,p} = E$  ;
- la solution générale est donc  $u_C(t) = \lambda e^{-\frac{t}{\tau}} + E$ . Le condensateur est initialement déchargé donc  $u_C(t = 0^-) = 0$ . Par continuité de la tension aux bornes du condensateur,  $u_C(t = 0^+) = 0 = \lambda + E$  donc  $\lambda = -E$ .

Donc la solution s'écrit  $u_C(t) = E \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$ .

- 4.



5.  $\tau = RC = 20$  s.

6. On doit vérifier  $u_C(t = t_0) = U_{\text{lim}} = E \left( 1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}} \right)$ . Il faut commencer par isoler l'exponentielle, puis on applique la fonction  $\ln$  :

$$\frac{U_{\text{lim}}}{E} = 1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}} \iff e^{-\frac{t_0}{\tau}} = 1 - \frac{U_{\text{lim}}}{E} \iff t_0 = -\tau \ln \left( 1 - \frac{U_{\text{lim}}}{E} \right) \quad (2.32)$$

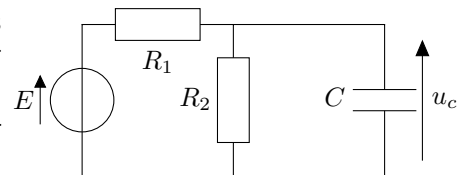
Numériquement,  $t_0 = 22$  s, confirmé graphiquement.

7. Cela n'aurait pas été judicieux car avec le bruit électronique, on définirait mal  $t_0$  vu que  $u_C(t_0 \gg \tau) \simeq E$ .

8. On peut modifier  $R$ ,  $C$ , ou encore  $U_{\text{lim}}$  dans une moindre mesure vue la question précédente.

## 2.2 Condensateur chargé avec deux résistances

Considérons le circuit ci-contre. Le condensateur est initialement chargé sous une tension  $E$  et à  $t = 0$  il est mis en connexion avec le circuit présenté par un dispositif non représenté.



1. Déterminer l'expression de  $U_C$  en régime permanent. Le condensateur va-t-il se charger ou décharger durant le régime transitoire ?

2. Déterminer l'équation différentielle vérifiée par  $u_c$ . On pourra poser  $\tau = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C$ .

3. Résoudre l'équation différentielle et déterminer l'expression littérale de  $u_c(t)$  pour  $t > 0$ .

4. Représenter graphiquement l'allure de  $u_c(t)$ .

5. A l'aide de Python, résoudre l'équation différentielle entre  $t = 0$  et  $t = 5\tau$ . On effectuera plusieurs simulations pour différentes valeurs de  $\tau$ .

## 2.3 Production de fortes surtensions

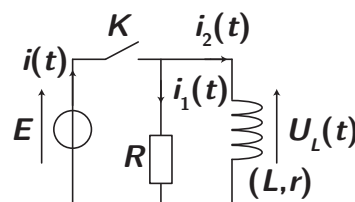
On constitue un circuit en branchant en parallèle aux bornes d'une bobine réelle d'inductance  $L$  et de résistance  $r$  un conducteur ohmique de résistance  $R \gg r$  et une source idéale de tension. À la date  $t = 0$ , on ferme l'interrupteur  $K$ , à la date  $t = t_0$ , on le rouvre.

1. Faire les schémas équivalents en régime permanent en position ouverte et en position fermée, et en déduire les valeurs de  $i_1$  et  $i_2$  en régime permanent dans les deux cas.

2. Pour  $t \in [0; t_0]$  donner l'équation vérifiée par  $i_2(t)$  en fonction de  $E$ ,  $r$  et  $L$  et la résoudre. On appellera  $\tau_1$  la constante de temps concernée.

3. On suppose que  $t_0 \gg \tau_1$ . Que vaut alors approximativement  $i_2(t_0)$  ?

4. Faire de même pour  $t \geq t_0$  et trouver la nouvelle expression de  $i_2(t)$ . On appellera  $\tau_2$  la nouvelle constante de temps.

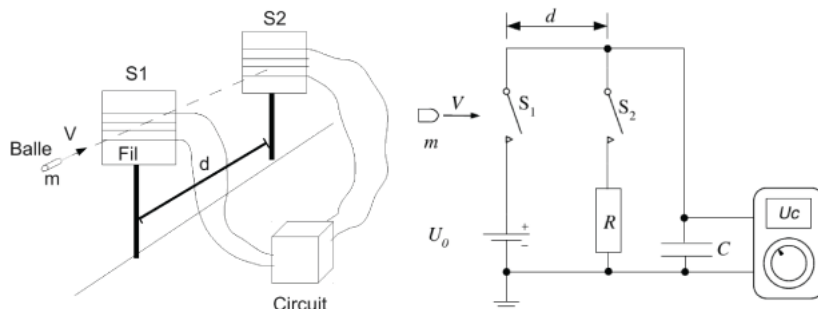


5. En déduire l'expression de la tension  $u_L(t)$  pour  $t > t_0$  puis tracer la courbe de  $u_L(t)$ . Montrer qu'elle peut prendre une valeur supérieure à  $E$  (**en valeur absolue**) pendant un court instant. Commenter.

## 2.4 Vitesse de balle

Issu de l'épreuve de sélection suisse aux Olympiades internationales de physique

On veut mesurer la vitesse d'une balle (supposée constante) en procédant comme suit : on crée un dispositif décrit figure 1. Ce dispositif peut être simplifié par le circuit électrique proposé ci-dessous. Les sections en  $S_1$  et  $S_2$  sont des fils tendus dans un cadre et disposés sur la trajectoire de la balle de manière à ce qu'ils soient coupés par la balle, la distance  $d$  entre les deux cadres est connue ainsi que les valeurs de tension  $U_0$ , de résistance  $R$  et capacité  $C$ . On mesure la valeur de la tension  $U_C$  une fois que la balle a traversé  $S_2$ .



Déterminer l'expression de la vitesse de la balle en fonction des différents paramètres.

Il s'agit d'étudier une décharge de condensateur. En effet, en appelant  $t = 0$  le temps pour lequel la balle traverse la section  $S_1$  et ouvre ainsi l'interrupteur qui connecte le condensateur au générateur de tension, on observe pour  $t > 0$  une décharge du condensateur dans la résistance  $R$ . On peut donc écrire la loi des mailles dans le circuit :

$$u_C + Ri = 0 \quad (2.33)$$

où  $i = C \frac{du_C}{dt}$ . L'équation précédente se met donc sous la forme canonique usuelle :

$$\frac{du_C}{dt} + \frac{1}{\tau} u_C = 0 \quad (2.34)$$

où l'on pose  $\tau = RC$  la constante de temps. La solution de cette équation s'écrit :

$$u_C(t) = Ae^{-t/\tau} \quad (2.35)$$

et comme la tension est continue aux bornes d'un condensateur,  $u_C(t = 0^-) = E = u_C(t = 0^+) = A$ . Donc tant que la balle n'a pas traversé ( $S_2$ ), la tension aux bornes du condensateur vaut

$$u_{mC}(t) = Ee^{-t/\tau} \quad (2.36)$$

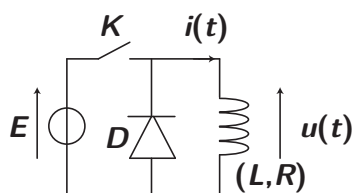
Lorsque la section ( $S_2$ ) est traversée, on rompt le contact électrique entre la résistance et le condensateur, ce dernier ne va alors plus se décharger. Cela se produit à l'instant  $t_1 = d/v$  comme on suppose un déplacement de la balle à vitesse  $v$  constante. Donc

$$U_0 = u_C(t \geq t_1) = u_C(t = t_1) = Ee^{-d/(\tau v)} \iff \ln\left(\frac{U_0}{E}\right) = -\frac{d}{\tau v} \quad (2.37)$$

d'où une vitesse de balle

$$v = \frac{d}{\tau \ln\left(\frac{E}{U_0}\right)} \quad (2.38)$$

## 2.5 Montage à diode dite de "roue libre"



On considère le montage ci-contre. On donne  $E = 12\text{V}$ ,  $L = 15\text{mH}$ ,  $R = 100\Omega$ . Le dipôle  $D$  est une diode idéale, composant ne laissant passer le courant que dans le sens de la flèche (avec alors une tension nulle à ses bornes). À la date  $t = 0$  on ferme l'interrupteur.



1. Justifier que, lorsque l'interrupteur est fermé, la diode est bloquée, c'est-à-dire qu'elle ne laisse pas passer le courant.
2. Exprimer le courant  $i(t)$  qui traverse la bobine.
3. Quelles sont les valeurs de la tension  $U_p$  et du courant  $I_p$  en régime permanent ? Dans quel état est la diode ?
4. Quelle est l'énergie  $\mathcal{E}_L$  emmagasinée par la bobine pendant le régime transitoire ?
5. À la date  $t = \theta = 10\tau$ , peut-on considérer que le régime permanent est atteint ? On ouvre alors l'interrupteur, justifier que la diode devient passante.
6. Exprimer l'intensité  $i(t)$  qui traverse l'enroulement à partir de  $t = \theta$ .
7. Comment l'énergie stockée dans la bobine est-elle dissipée ? Effectuer un bilan énergétique à partir de  $t = \theta$  jusqu'à la fin du régime transitoire ( $t \rightarrow +\infty$ ).
8. Tracer la courbe donnant l'évolution de l'intensité de 0 à 3 ms.
9. Que se passerait-il en l'absence de diode ? L'interrupteur pourrait-il être considéré comme idéal ? Pour quelle raison ?

1. Lorsque l'interrupteur se ferme, supposons la diode passante et montrons qu'il y a une contradiction : la tension à ses bornes est donc nulle (ce qui déjà est très gênant pour le générateur de tension...), donc  $u(t) = 0 = L \frac{di}{dt} + Ri(t)$ . Avec la condition initiale de courant  $i(t = 0^-) = 0$  et la continuité du courant dans une bobine, il vient alors  $i(t > 0) = \lambda e^{-t/\tau} = 0$  car  $\lambda = 0$ . On a donc  $i(t) = 0$ , et le courant doit être positif dans le sens de la diode. Ainsi, en utilisant la loi des nœuds, le courant issu du générateur est donc négatif, en convention générateur : ce n'est pas possible. La diode est donc bloquée.

2. La loi des mailles dans la grande maille, dans la mesure où la diode est bloquée, s'écrit :

$$E = Ri(t) + L \frac{di}{dt} \quad (2.39)$$

dont la résolution classique conduit à  $i(t) = \frac{E}{R} (1 - e^{-t/\tau})$  en posant  $\tau = \frac{L}{R}$ .

3. En régime permanent, la bobine peut être remplacée par la résistance  $R$  seule. On a donc d'après la loi d'Ohm et la loi des mailles  $E = U_p = RI_p$ . La diode est toujours bloquée pour les mêmes raisons qu'à la question 1.

4. La bobine a emmagasiné l'énergie  $\mathcal{E}_L = \frac{1}{2} LI_p^2 = \frac{LE^2}{2R^2}$ , on peut bien entendu le redémontrer si c'est demandé.

5. Pour  $t = \theta = 10\tau \gg \tau$ ,  $e^{-t/\theta} \simeq 0$  donc le régime permanent est atteint. Lorsque l'interrupteur est ouvert, la diode est forcément passante : si elle était bloquée, le courant dans la bobine serait donc nul et contredit la continuité du courant traversant la bobine (ou alors il y a une étincelle au niveau de l'interrupteur !). Il faudra juste bien vérifier dans la suite que  $u(t) = 0$  tout en ayant  $i(t) \geq 0$  (sens du courant orienté dans le sens de la flèche de la diode, quand on n'a plus qu'une seule maille à droite).

6. On doit alors vérifier  $u(t) = 0 = Ri(t) + L \frac{di}{dt}$ , donc :

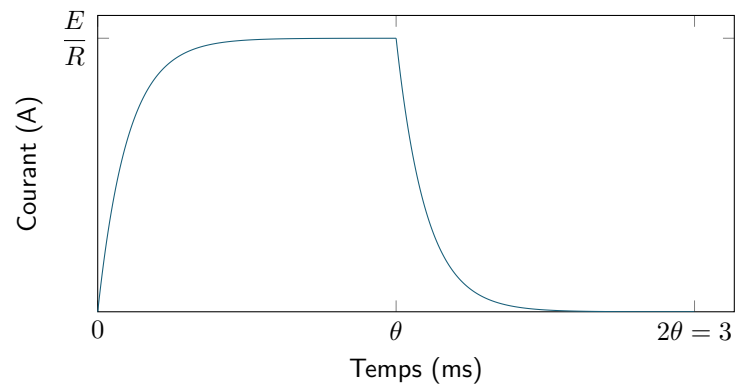
$$i(t) = \lambda e^{-t/\tau} \quad \text{avec} \quad i(t = \theta) = \frac{E}{R} = \lambda e^{-\theta/\tau} \quad (2.40)$$

d'où :

$$i(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{t-\theta}{\tau}} \quad (2.41)$$

7. Elle est dissipée par effet Joule dans sa propre résistance interne, et éventuellement dans la diode si elle n'est pas idéale.

8. Calculons  $\tau = \frac{L}{R} = 0,15$  ms (il y avait une erreur dans l'énoncé de base, c'est bien  $R = 100 \Omega$ ). On trace donc l'évolution du courant sur une durée de  $20\tau$  :



9. En l'absence de diode, de part la continuité du courant traversant la bobine, on verrait une étincelle au niveau de l'interrupteur, lié au fait que l'air devient localement conducteur au niveau des contacteurs qui s'écartent lors de son ouverture.