Thème I. Ondes et signaux (Électricité)

Chapitre n°4 Circuits linéaires du premier ordre

De nombreuses applications nécessitent l'utilisation d'un circuit électrique contenant un condensateur et une (ou plusieurs) résistances.
À gauche : le flash d'un appareil photo s'allume lors de la décharge très rapide d'un condensateur. On constate d'ailleurs qu'il faut attendre un peu entre deux photos avec flash.
À droite : un défibrillateur automatisé externe dont la décharge du condensateur permet de délivrer un courant électrique dans le corps de la victime entre les deux électrodes.

Pré-requis

- Terminale : Thème Ondes et signaux
  - Modèle du circuit RC série : charge d'un condensateur par une source idéale de tension, décharge d'un condensateur, temps caractéristique.
  - Capacité mathématique : Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant.
  - Capacité numérique (spé maths) : Résolution par la méthode d'Euler de $y' = f$, de $y' = ay + b$.
- PCSI : Thème Ondes et signaux.
  - Chapitre n°3. Signaux électriques dans l'ARQS.

Objectifs du chapitre

— Généraliser l'étude de la charge et de la décharge du condensateur vue en terminale, à l'étude des circuits linéaires du premier ordre : établir l'équation différentielle, et la résoudre.

— Réaliser et interpréter un bilan énergétique.

Plan du cours

I Charge et décharge du condensateur **3**
I.1 Étude graphique 3
I.2 Méthodes générales 4
I.2.a) État final 4
I.2.b) Établir l'équation différentielle . . 4
I.2.c) Conditions initiales 4
I.2.d) Résoudre l'équation différentielle 5
I.3 Étude de la charge du condensateur . . . 5
I.4 Étude de la décharge du condensateur . 6

II Aspect énergétique **6**

III Étude du circuit RL **7**

IV Méthode d'Euler **8**

Ai-je bien appris mon cours ?

1 – ☺ – ☹ – Comment déterminer la constante de temps τ caractéristique de l'évolution du premier ordre à partir d'un graphe ?

2 – ☺ – ☹ – Quelles sont les grandeurs électriques qui sont des fonctions continues du temps, c'est-à-dire qui ne peuvent pas subir de discontinuité ?

3 – ☺ – ☹ – Comment se comporte un condensateur en régime permanent ? et une bobine ?

4 – ☺ – ☹ – Quelle est la forme canonique de l'équation différentielle qui régit l'évolution temporelle d'un système linéaire du premier ordre ?
Quelle constante introduit-on ? Quel est son nom ? Son unité ?

5 – ☺ – ☹ – Quelle est la solution générale d'une équation différentielle qui régit l'évolution temporelle d'un système linéaire du premier ordre ?

6 – ☺ – ☹ – Établir l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur au cours de sa charge à travers une résistance R.

7 – ☺ – ☹ – Résoudre complètement l'équation différentielle précédente pour déterminer l'évolution temporelle de la tension aux bornes du condensateur au cours de sa charge, s'il est initialement déchargée.

8 – ☺ – ☹ – Établir l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur au cours de sa décharge à travers une résistance R.

9 – ☺ – ☹ – Résoudre complètement l'équation différentielle précédente pour déterminer l'évolution temporelle de la tension aux bornes du condensateur au cours de sa décharge s'il a été préalablement chargé sous une tension U_0.

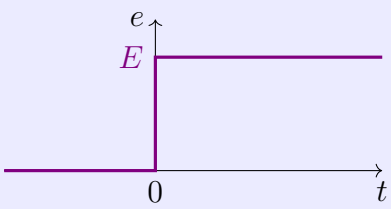
10 – ☺ – ☹ – Établir l'équation différentielle vérifiée par l'intensité du courant dans un circuit RL soumis à un échelon de tension.

11 – ☺ – ☹ – Établir l'évolution temporelle de l'intensité du courant dans un circuit RL soumis à un échelon de tension, si initialement aucun courant ne circule dans le circuit.

Définitions

Dans ce chapitre, nous étudierons les **régimes transitoires du premier ordre** :

- **Réponse à un échelon de tension** : le circuit comporte une source de tension de f.é.m. nulle jusqu'à l'instant initial choisi, puis constante à partir de cet instant. Cela peut correspondre en pratique à l'allumage d'un générateur de tension constante, ou à la fermeture d'un interrupteur.



- **Régime libre** : le circuit ne comporte aucun générateur. Les grandeurs électriques évoluent néanmoins au cours du temps si on connecte dans le circuit un condensateur chargé (par ex.).
- Lorsqu'un changement brutal intervient dans un circuit (fermeture d'un interrupteur par ex.), les tensions et intensités mettent un certain temps à s'établir et à atteindre un nouveau régime permanent : c'est le **régime transitoire**, au cours duquel les tensions et intensités évoluent dans le temps entre un premier régime permanent et le nouveau régime permanent.

I Retour sur la terminale : Charge et décharge du condensateur

I.1 Étude graphique

Méthodes : Comment déterminer graphiquement τ ?

1re méthode en utilisant la valeur de $u_c(\tau)$:

τ est la durée au bout de laquelle, le régime transitoire a eu lieu à 63 %, autrement dit il en reste 37 %.

1. Déterminer la valeur de la tension finale $u_c(\infty)$ atteinte au bout d'un temps très long (resp. $u_c(0^+)$).
2. Calculer $0,63 \times u_c(\infty)$ (resp. $0,37 u_c(0^+)$).
3. Déterminer l'abscisse τ du point de la courbe $u_c(t)$ d'ordonnée $0,63 \times u_c(\infty)$ (resp. $0,37 u_c(0^+)$).

Attention – Erreur à ne pas commettre

ATTENTION $\cancel{\tau = 0,63E}$ N'A AUCUN SENS !

2e méthode en utilisant la tangente à l'origine :

1. Tracer la tangente à l'origine à la courbe $u_c(t)$.
2. Tracer l'asymptote à la courbe $u_c(t)$ (valeur atteinte pour $t \to +\infty$).
3. L'abscisse du point d'intersection de la tangente à l'origine avec l'asymptote est τ.

Exercice à maîtriser n°1 – Lectures graphiques

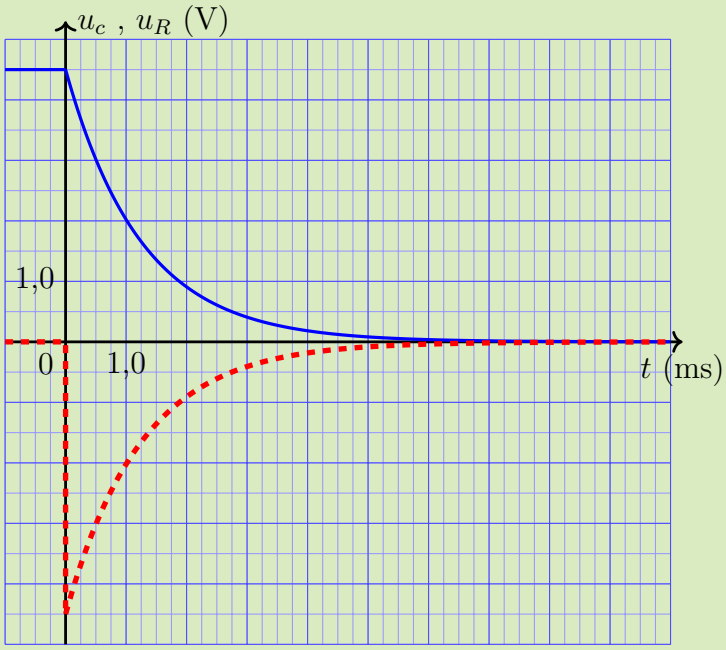
On donne les évolutions de la tension aux bornes du condensateur (en trait plein) et de la tension aux bornes de la résistance (en traits pointillés) au cours du temps.

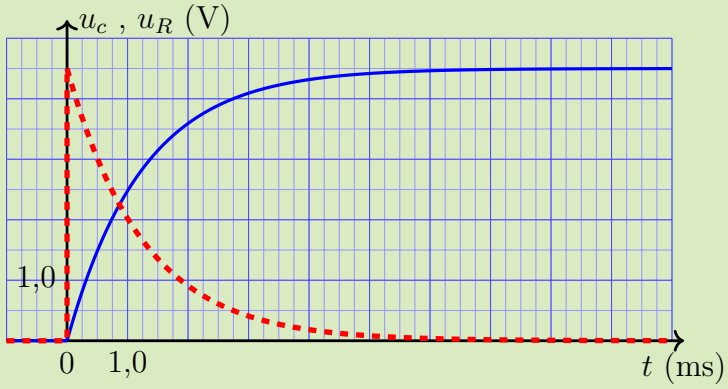
Q1. Commenter le comportement de ces deux tensions à $t = 0$.

Q2. Identifier la courbe correspondant à la charge du condensateur (=réponse à un échelon de tension), et celle correspondant à la décharge (=régime libre).

Q3. Identifier sur chaque courbe le régime permanent initial, le régime transitoire et le régime permanent final.

Q4. (voir § I.1) Déterminer graphiquement le temps caractéristique du circuit.





I.2 Méthodes générales

Méthode : Tout exercice d'électricité DOIT COMMENCER par :

- la **représentation du schéma du circuit étudié** ;
- l'**indication** sur le circuit de **toutes les intensités** (une par branche) et **tensions** (une aux bornes de chaque dipôle) : **flèche et nom**.

I.2.a) État final

Méthode : Comment déterminer le régime permanent ?

Avant de réaliser de longs calculs (équations différentielles et résolutions), il est tout à fait possible de déterminer complètement l'état final du circuit, c'est-à-dire les tensions et intensités dans le circuit une fois le nouveau régime permanent atteint.

1. Reproduire le circuit électrique une fois le nouveau **régime permanent** atteint en remplaçant les **condensateurs par un interrupteur ouvert** et les **bobines par un fil**.
2. En déduire les tensions aux bornes des fils et les intensités à travers les interrupteurs ouverts qui sont nulles.
3. Appliquer les lois des nœuds, les lois des mailles et les relations intensité-tension pour déterminer les autres grandeurs électriques.

I.2.b) Établir l'équation différentielle

Méthode : Comment établir l'équation différentielle d'un système du premier ordre ?

Objectif : établir l'équation différentielle vérifiée par la grandeur électrique s.

1. Lister les grandeurs électriques (tension, intensité) inconnues (qui ont du être représentées sur le circuit précédemment).
   Le nombre de grandeurs électriques inconnues vous donne le nombre d'équations indépendantes à écrire.
2. Écrire toutes les relations indépendantes possibles :
   - lois des mailles indépendantes (attention aux redondances) ;
   - lois des nœuds (attention aux redondances) ;
   - relations entre intensité et tension pour tous les dipôles.
3. Combiner ces relations entre elles pour ne conserver que la grandeur électrique qui nous intéresse.
4. L'écrire sous forme canonique :
   $$\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} + \frac{s}{\tau} = \frac{s(\infty)}{\tau}$$
   avec s la grandeur électrique qui nous intéresse (une tension ou une intensité ou une charge) ;
   τ la constante de temps du circuit ;
   $s(\infty)$ la valeur qu'atteint s en régime permanent.

I.2.c) Conditions initiales

Méthode : Comment déterminer les conditions initiales ?

1. Déterminer les valeurs des intensités et tensions AVANT la fermeture de l'interrupteur.
2. Utiliser la continuité de la tension aux bornes du condensateur et de l'intensité du courant à travers une bobine, pour déterminer ces valeurs JUSTE APRÈS la fermeture de l'interrupteur ($t = 0^+$).
3. Les autres grandeurs électriques à $t = 0^+$ se déterminent en appliquant les relations intensité/tension à $t = 0^+$ et les lois des mailles et des nœuds à $t = 0^+$.

I.2.d) Résoudre l'équation différentielle

Méthode : Comment résoudre l'équation différentielle $\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} + \dfrac{y}{\tau} = B$ (E) ?

La **solution générale** d'une telle équation différentielle s'écrit :

$$y(t) = y_H(t) + y_P$$

avec

1. y_H la **solution générale de l'équation homogène (sans second membre)** $\dfrac{\mathrm{d}y_H}{\mathrm{d}t} + \dfrac{y_H}{\tau} = 0$ (EH) qui s'écrit :
$$y_H(t) = Ke^{-t/\tau} \quad \text{avec } K \in \mathbb{R} \text{ une constante d'intégration}$$
2. y_P une **solution particulière de (E), recherchée sous la forme du second membre**, ici constant. On recherche une solution y_P constante qui vérifie (E) : $0 + \dfrac{y_P}{\tau} = B$, soit $y_P = B\tau$.
3. Ainsi la solution générale de (E) s'écrit :
$$y(t) = y_H(t) + y_P \quad \text{soit} \quad y(t) = Ke^{-t/\tau} + B\tau$$
4. Il reste à **déterminer la constante d'intégration** K à l'aide de la condition initiale $y(t = 0)$.

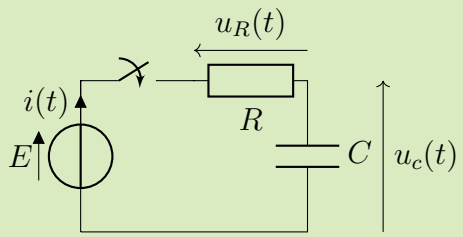
Attention – Erreur à ne pas commettre

La constante d'intégration se détermine sur la **solution générale de l'équation différentielle complète** et JAMAIS sur une partie de la solution, donc JAMAIS sur la solution homogène.

I.3 Étude de la charge du condensateur

Exercice à maîtriser n°2 – Charge du condensateur

On étudie la charge d'un condensateur de capacité C à travers une résistance R par un générateur idéal de fem E.
Le condensateur est initialement déchargé (pour $t < 0$).
À $t = 0$, on ferme l'interrupteur, et le générateur débite alors dans l'ensemble série $\{R - C\}$.



Q1. (voir § I.2.a)) Déterminer u_c, u_R et i une fois le nouveau régime permanent atteint.

Q2. (voir § I.2.b)) Établir l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur.

Q3. (voir § I.2.b)) L'écrire sous forme canonique :

$$\frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t} + \frac{u_c}{\tau} = \frac{u_c(\infty)}{\tau}$$

et identifier la constante de temps τ et la tension $u_c(\infty)$.

Q4. (voir § I.2.d)) Déterminer les solutions générales de l'équation différentielle.

Q5. (voir § I.2.c)) Que vaut $u_c(0^-)$ (juste avant la fermeture de l'interrupteur) ? Quelle propriété particulière possède la tension aux bornes d'un condensateur ? En déduire $u_c(0^+)$.

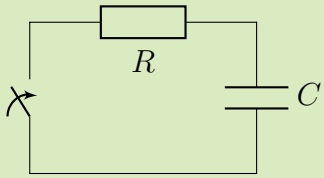
Q6. (voir § I.2.d)) Déterminer la constante d'intégration et en déduire l'expression de $u_c(t)$.

Q7. Tracer l'allure de la tension u_c en fonction du temps.

I.4 Étude de la décharge du condensateur

Exercice à maîtriser n°3 – Décharge du condensateur

On étudie la décharge d'un condensateur de capacité C dans une résistance R.
Le condensateur a été préalablement chargé sous une tension U_0.
À $t = 0$, on ferme l'interrupteur.
On parle ici de **régime libre**, car il n'y a pas de source de tension dans le circuit.



Q1. (voir § I.2.a)) Déterminer u_c, u_R et i une fois le nouveau régime permanent atteint.

Q2. (voir § I.2.b)) Établir l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur.
L'écrire sous forme canonique :

$$\frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t} + \frac{u_c}{\tau} = 0$$

et identifier la constante de temps τ.

Q3. (voir § I.2.d)) Déterminer les solutions générales de l'équation différentielle.

Q4. (voir § I.2.c)) Que vaut $u_c(0^-)$ (juste avant la fermeture de l'interrupteur) ? Quelle propriété particulière possède la tension aux bornes d'un condensateur ? En déduire $u_c(0^+)$.

Q5. (voir § I.2.d)) Déterminer la constante d'intégration et en déduire l'expression de $u_c(t)$.

Q6. Tracer l'allure de la tension u_c en fonction du temps.

II Aspect énergétique

Méthode : Comment réaliser des bilans de puissance et d'énergie ?

1. Écrire la loi des mailles.
2. Multiplier l'équation obtenue par l'intensité i du courant dans le circuit.
3. Identifier chaque terme de la relation obtenue en terme de puissance algébriquement fournie (dipôles en convention générateur) ou algébriquement reçue (dipôles en convention récepteur), donner leur interprétation et vérifier la conservation de la puissance, donc de l'énergie.
4. Intégrer par rapport au temps pour obtenir un bilan énergétique.

Exercice à maîtriser n°4 – Bilans énergétiques du circuit RC

Bilan énergétique de la charge

Q1. En suivant la méthode précédente, établir le bilan de puissance de la charge du condensateur que l'on mettra sous la forme : $\mathscr{P}_G = \mathscr{P}_{\text{Joule}} + \mathscr{P}_{\text{reçue par C}}$, on précisera l'expression et la signification des différents termes.

Q2. Exprimer l'énergie fournie par le générateur au circuit sur toute la durée du régime transitoire. Pour le calcul de l'intégrale on pourra utiliser le fait que $i = C\dfrac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}$.
Exprimer l'énergie initialement stockée dans le condensateur, et l'énergie stockée dans le condensateur à la fin du régime transitoire.
En déduire l'énergie dissipée par effet Joule dans la résistance.

Bilan énergétique de la décharge

Q3. Établir le bilan de puissance de la décharge. L'écrire sous la forme $\mathscr{P}_{....} = \mathscr{P}_J$, interpréter les deux termes et le bilan.

Q4. Exprimer l'énergie initialement stockée par le condensateur, et l'énergie stockée à la fin du régime transitoire.
Qu'est devenue cette énergie ?

III Étude du circuit RL

Exercice à maîtriser n°5 – Établissement du courant dans un circuit RL

On étudie la réponse d'un circuit RL série ($R = 2,0\,\mathrm{k\Omega}$ et $L = 39,96\,\mathrm{mH}$) constitué d'une résistance et d'une bobine en série alimenté par un générateur qui délivre à un échelon de tension de force électromotrice $E = 1,0\,\mathrm{V}$.

Q1. Représenter le circuit en supposant la bobine idéale.

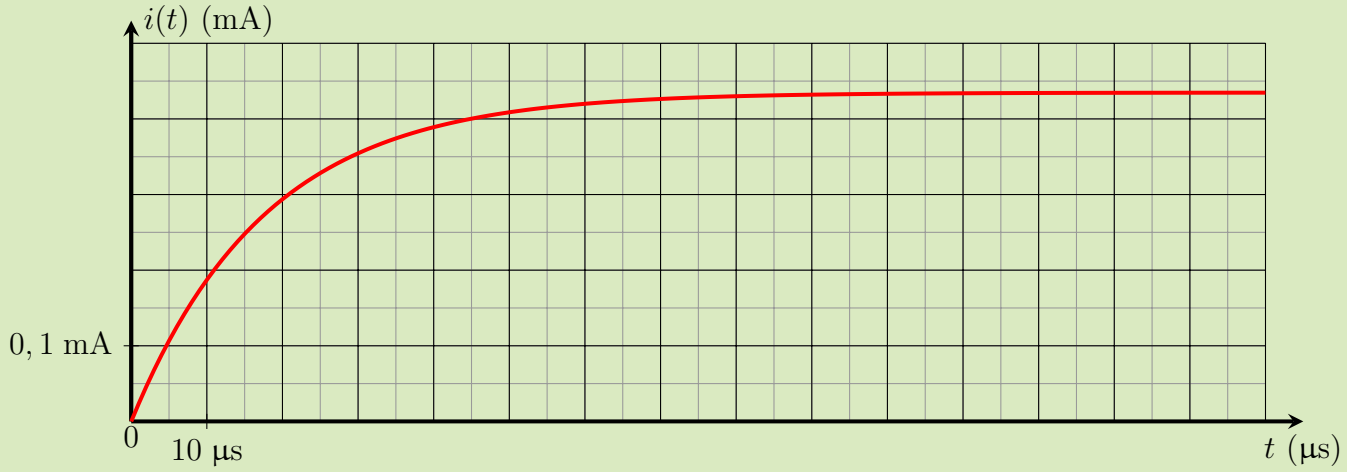
Q2. Déterminer, en utilisant le comportement en régime permanent de la bobine, la valeur finale $i(\infty)$ atteinte par l'intensité.

Q3. Établir l'équation différentielle vérifiée par l'intensité i du courant électrique.

Q4. Résoudre l'équation différentielle.

Q5. On définit le temps de montée à 95 %, qui correspond à l'instant auquel l'intensité du courant ne diffère que de 5 % de la valeur finale. Exprimer ce temps t_m en fonction de τ.

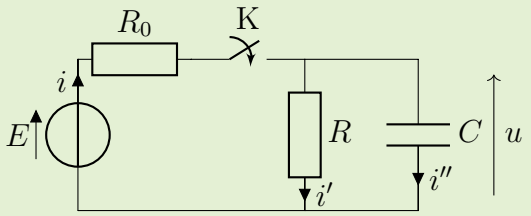
Q6. Analyser les résultats expérimentaux de la figure ci-dessous : déterminer $i(\infty)$ et τ. Comparer aux valeurs attendues. Commenter.



Q7. Établir le bilan de puissance, et commenter.

Activité n°6 – Un exemple plus subtil : Conditions initiales et finales du circuit R-R//C

On étudie le circuit ci-contre, dans lequel, pour $t < 0$, l'interrupteur est ouvert, aucun courant ne circule et le condensateurs est déchargé.



Q1. Déterminer les expressions de i, i', i'' et u juste après la fermeture de l'interrupteur, c'est-à-dire à $t = 0^+$.

Q2. Déterminer les expressions de i, i', i'' et u une fois le régime permanent atteint.

IV Méthode d'Euler pour la résolution approchée des équations différentielles

<u>Capacité exigible</u> : 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.

On souhaite déterminer la réponse du circuit RC à une excitation de forme quelconque, qui répond à l'équation différentielle sur l'intervalle de temps $[t_0, t_f]$:

$$\frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t} = -\frac{u_c}{\tau} + \frac{e(t)}{\tau}$$

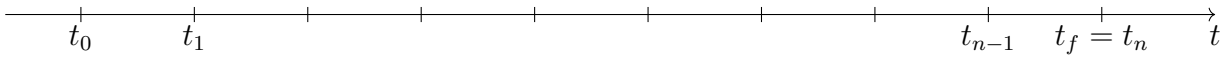
Où e est une fonction du temps.

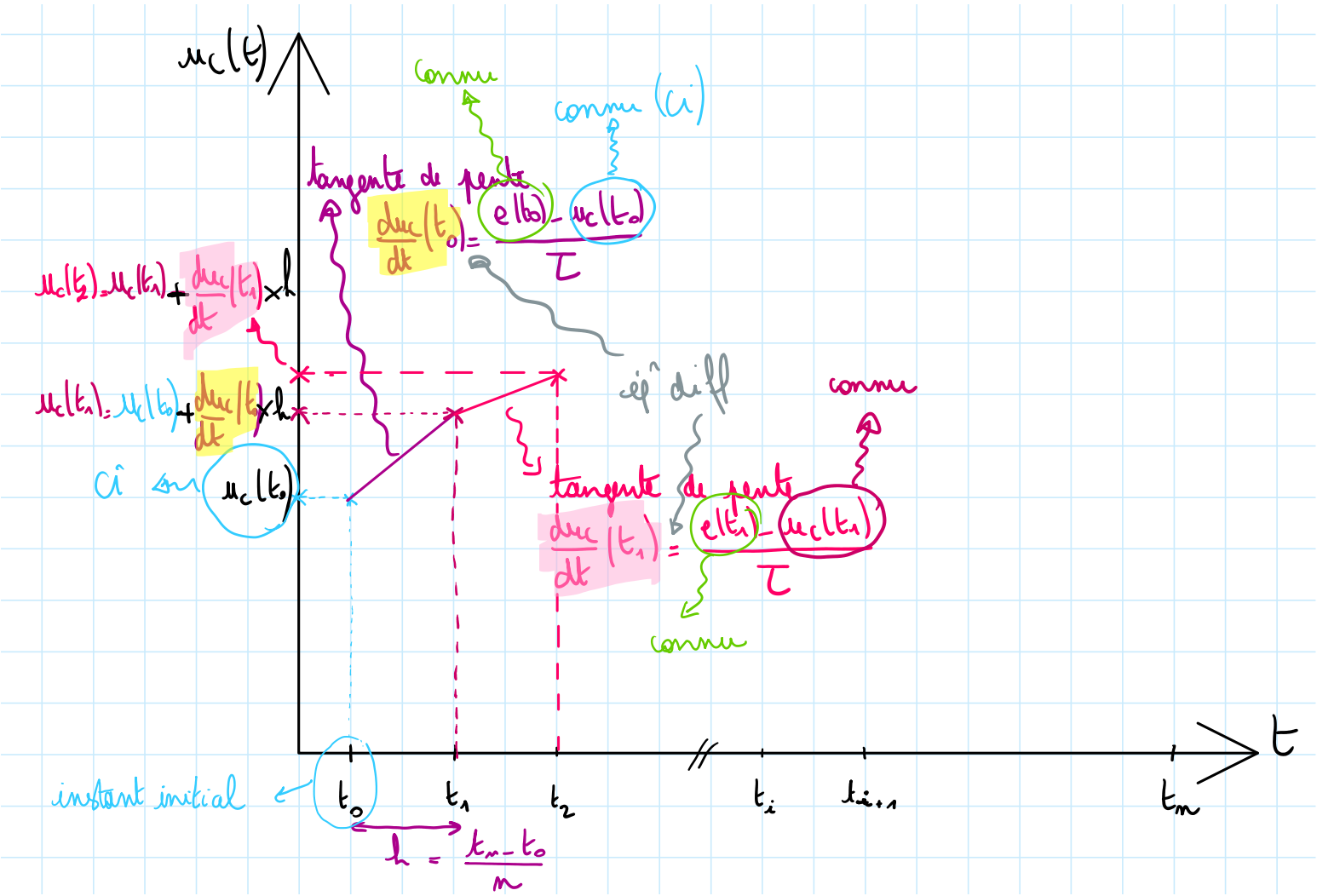
Au cours de la charge du condensateur, $e(t) = E$, une constante pour $t > 0$. Au cours de la décharge, $e(t) = 0$. e peut dépendre également du temps (fonction créneau, ou sinusoïdale,...)

La méthode d'Euler est une méthode numérique de résolution approchée des équations différentielles du premier ordre.

On découpe l'intervalle $[t_0, t_f]$ de résolution, en n intervalles de largeur $h = \dfrac{t_f - t_0}{n}$.

La valeur approchée de la solution est déterminée en $(n+1)$ instants, qui s'écrivent $t_i = t_0 + i \times h = t_0 + i \times \dfrac{t_f - t_0}{n}$ (pour $i \in [\![0, n]\!]$).





Les valeurs approchées de u_c se déterminent de proche en proche en partant de l'instant initial.

— Partons de l'instant initial t_0 où on connait la tension $u_c(t_0)$ (c'est la condition initiale).

Le nombre dérivé à l'instant t_0, noté $\frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t}(t_0)$, s'exprime, d'après l'équation différentielle, selon :

$$\frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t}(t_0) = -\frac{u_c(t_0)}{\tau} + \frac{e(t_0)}{\tau}$$

il correspond à la **pente de la tangente à la courbe à l'instant t_0.** Ce nombre dérivé est connu à t_0, puisque $u_c(t_0)$ est connu (CI) et $e(t_0)$ est connu (on connait ce que fournit le générateur au circuit).

L'idée de la méthode d'Euler est d'**approximer sur l'intervalle $[t_0, t_1]$ la fonction u_c par sa tangente à t_0.**

Connaissant la valeur de la pente et le point $\big(t_0, u_c(t_0)\big)$ de cette tangente, on peut déterminer la valeur de $u_c(t_1)$ (équation d'une droite) :

$$\begin{aligned}
u_c(t_1) &\approx u_c(t_0) + \text{pente}_0 \times (t_1 - t_0) \\
u_c(t_1) &\approx u_c(t_0) + \frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t}(t_0) \times h \\
u_c(t_1) &\approx u_c(t_0) + \left(-\frac{u_c(t_0)}{\tau} + \frac{e(t_0)}{\tau}\right) \times h \\
u_1 &\approx u_0 + \frac{e(t_0) - u_0}{\tau} \times h
\end{aligned}$$

— On connait maintenant $u_c(t_1)$ à l'instant t_1.

Le nombre dérivé à l'instant t_1, s'exprime, d'après l'équation différentielle, selon :

$$\frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t}(t_1) = -\frac{u_c(t_1)}{\tau} + \frac{e(t_1)}{\tau}$$

il correspond à la **pente de la tangente à la courbe à l'instant t_1.** Ce nombre dérivé est connu à t_1, puisque $u_c(t_1)$ est connu (étape précédente) et $e(t_1)$ est connu (on connait ce que fournit le générateur au circuit).

L'idée de la méthode d'Euler est d'**approximer sur l'intervalle $[t_1, t_2]$ la fonction u_c par sa tangente à t_1.**

Connaissant la valeur de la pente et le point $\big(t_1, u_c(t_1)\big)$ de cette tangente, on peut déterminer la valeur de $u_c(t_2)$ (équation d'une droite) :

$$\begin{aligned}
u_c(t_2) &\approx u_c(t_1) + \text{pente}_1 \times (t_2 - t_1) \\
u_c(t_2) &\approx u_c(t_1) + \frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t}(t_1) \times h \\
u_c(t_2) &\approx u_c(t_1) + \left(-\frac{u_c(t_1)}{\tau} + \frac{e(t_1)}{\tau}\right) \times h \\
u_2 &\approx u_1 + \frac{e(t_1) - u_1}{\tau} \times h
\end{aligned}$$

— Et ainsi de suite...

— Pour $i \in [\![0, n-1]\!]$, On connait maintenant $u_c(t_i)$ à l'instant t_i.

Le nombre dérivé à l'instant t_i, s'exprime selon : $\frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t}(t_i) = -\frac{u_c(t_i)}{\tau} + \frac{e(t_i)}{\tau}$, il correspond à la **pente de la tangente à la courbe à l'instant t_i.** Ce nombre dérivé est connu à t_i, puisque $u_c(t_i)$ est connu (étape précédente) et $e(t_i)$ est connu (on connait ce que fournit le générateur au circuit).

L'idée de la méthode d'Euler est d'**approximer sur l'intervalle $[t_i, t_{i+1}]$ la fonction u_c par sa tangente à t_i.**

Connaissant la valeur de la pente et le point $\big(t_i, u_c(t_i)\big)$ de cette tangente, on peut déterminer la valeur de $u_c(t_{i+1})$ (équation d'une droite) :

$$\begin{aligned}
u_c(t_{i+1}) &\approx u_c(t_i) + \text{pente}_i \times (t_{i+1} - t_i) \\
u_c(t_{i+1}) &\approx u_c(t_i) + \frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t}(t_i) \times h \\
u_c(t_{i+1}) &\approx u_c(t_i) + \left(-\frac{u_c(t_i)}{\tau} + \frac{e(t_i)}{\tau}\right) \times h \\
u_{i+1} &\approx u_i + \frac{e(t_i) - u_i}{\tau} \times h
\end{aligned}$$

On note u_i la valeur approchée déterminée par la méthode d'Euler de u_c à l'instant t_i : $u_c(t_i) \approx u_i$.

$$\boxed{\forall i \in [\![0, n-1]\!] \ : \ u_{i+1} \approx u_i + \frac{e(t_i) - u_i}{\tau} \times h}$$

Cette relation de récurrence permet de déterminer successivement les valeurs approchées de u_c connaissant la tension e imposée à chaque instant par le générateur, et la valeur de u_c à $t = 0$.

Activité n°7 – Activité numérique : Charge du condensateur

Q1. Compléter l'expression de la ligne 10.

Q2. Que contient la liste `t` ? Combien contient-elle d'éléments ?

Q3. Expliquer le rôle (potentiel) de la ligne 15.

Q4. Expliquer les limites du `range` ligne 17.

Q5. Compléter la ligne 18.

Q6. On peut jouer sur la valeur de n : quel est son impact ?

```
1  import matplotlib.pyplot as plt # pour le tracé graphique
2  ## paramètres du circuit
3  R = 10**3     # Ohm
4  C = 3*10**-7  # F
5  tau = R*C     # constante de temps
6  ## paramètres de résolution
7  t0 = 0                # instant initial
8  tf = 10*tau           # résolution sur l'intervalle [0,10*RC]
9  n = 1000              # nombre d'intervalles
10 h =                   # à compléter : pas de calcul
11 ## Utilisation de l'algorithme d'Euler pour l'étude de la charge du
   condensateur
12 e = 5 # Volt (Si E=5V)
13 t = [ t0 + i*h for i in range(0,n) ] # initialisation de la liste des
   instants
14 u = [ 0 for i in range(0,n) ] # initialisation de la liste des tensions
15 u[0] = 0   # condition initiale sur la tension u
16 ## Remplissage de la liste avec les valeurs de u(ti)
17 for i in range(0,n):
18     u[i+1] =                                    # à compléter avec la
   relation de récurrence
19 ## Tracé de u en fonction de t
20 plt.plot(t,u) # tracé des valeurs de u en fonction des valeurs de t
21 plt.xlabel("t (s)")        # nom de l'axe des abscisse
22 plt.ylabel("uc (V)")       # nom de l'axe des ordonnées
23 plt.title("Evolution temporelle de la tension aux bornes du condensateur
   lors de sa charge")
24 plt.show()                 # affiche le graphe
```

Les défibrillateurs implantables

Philippe CHEVALIER

En une dizaine d'années, le défibrillateur implantable est devenu un auxiliaire précieux pour des milliers de victimes d'arythmies cardiaques sévères.

Le défibrillateur automatique implantable a été utilisé pour la première fois chez l'homme le 4 février 1980 à l'Hôpital John Hopkins à Baltimore. Depuis, des progrès techniques et des études de validation clinique ont contribué à l'expansion de cette thérapeutique électrique qui sauve quantité de victimes d'arythmie cardiaque. Aujourd'hui, environ 2 000 appareils sont implantés chaque année en France, 8 000 en Allemagne. Selon le climat médico-économique, on estime que 6 000 implantations annuelles seront effectuées dans un futur proche. L'élargissement de l'utilisation de l'appareil est en effet préconisé par de nombreux cardiologues qui voient dans l'efficacité des nouveaux appareils un moyen de sauver plus de malades cardiaques.

En dix ans, l'acceptabilité du défibrillateur a cru de manière exponentielle. Les raisons en sont triples : une validation de son efficacité en termes d'espérance de vie, une miniaturisation notable et une facilité d'utilisation améliorée. Le défibrillateur automatique est actuellement employé non seulement chez les patients avec une tachycardie sévère, mais aussi, à titre préventif, chez des personnes avec des indices de risque d'arythmie, comme l'insuffisance cardiaque ou des antécédents familiaux.

Des indications élargies

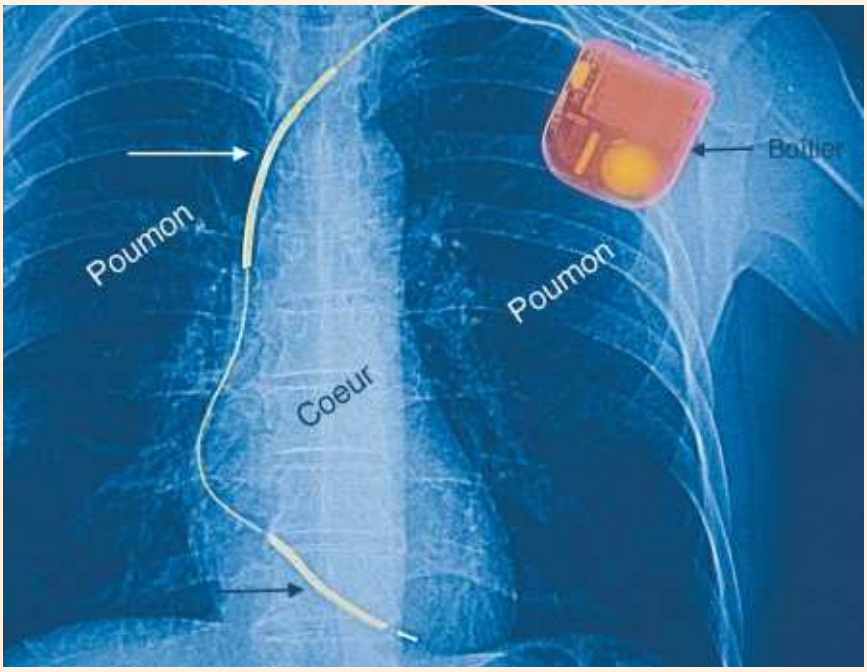
Une décennie a été nécessaire afin de valider l'efficacité du défibrillateur implantable. Par des études cliniques, les médecins ont établi que le défibrillateur augmentait l'espérance de vie de certains patients appareillés. Ces études ont comparé deux thérapeutiques : le défibrillateur et le traitement classique médicamenteux. Pour les rescapés d'arrêt cardio-circulatoire par arythmie ventriculaire, le défibrillateur est un meilleur choix que le traitement médicamenteux. Il est admis aussi, qu'après un infarctus du myocarde, en présence d'une arythmie ventriculaire non soutenue et d'une altération sévère de la fonction cardiaque, le défibrillateur diminue l'incidence de mort subite. Enfin, la mortalité des insuffisants cardiaques est diminuée lorsque ces patients bénéficient d'un appareil de dernière génération associant défibrillation et stimulation à l'intérieur des cavités cardiaques. En revanche, en cas de cardiopathie héréditaire compliquée de trouble du rythme cardiaque, les indications ne sont pas aussi tranchées, principalement en raison du faible nombre de patients atteints. Ces derniers sont pourtant jeunes et il sera impératif de déterminer dans des études ultérieures le bénéfice potentiel d'un défibrillateur.

Malgré ces succès, le défibrillateur ne doit pas devenir une solution de facilité pour médecin pressé et patient mal informé. Chez tous les bénéficiaires potentiels, un bilan hémodynamique, électrophysiologique, voire génétique, reste indispensable. Ces investigations permettent d'identifier une atteinte cardiaque et d'analyser le contexte environnant l'arythmie.

La puissance d'un choc dans une carte de crédit

Le progrès le plus impressionnant de ces dernières années est la miniaturisation de l'appareil. Il y a dix ans, le défibrillateur se présentait sous la forme d'un boîtier rectangulaire de la taille d'un baladeur de deux centimètres d'épaisseur qui pesait jusqu'à 250 grammes ; les défibrillateurs les plus récents ont la taille d'une carte de crédit, de forme ovale (mieux adaptée à l'enfouissement sous la peau devant le muscle pectoral), d'un peu plus d'un centimètre d'épaisseur et pèsent 90 grammes *(voir la figure 2)*. Tout appareil de défibrillation comprend au moins quatre parties : la source d'énergie, les circuits électroniques, le condensateur et, enfin, l'électrode (ou les électrodes) placée sur le cœur.

La source d'énergie assure le fonctionnement de base des circuits et les opérations de charge du condensateur



1. Radiographie du thorax avec défibrillateur implanté. On distingue le boîtier sous-cutané et, dans le ventricule droit, l'électrode placée à la pointe du ventricule droit. Les deux renflements de la sonde (flèches) permettront de délivrer le courant de haute énergie qui rétablira un rythme normal en cas d'arythmie.

© POUR LA SCIENCE

qui produit le choc de défibrillation. Les besoins élevés en courant nécessaires à cette charge (un à deux ampères durant dix secondes) ont abouti à l'utilisation de piles chimiques au lithium-argent-pentoxyde de vanadium. Avec ce type de pile, la durée de vie moyenne d'un appareil est passée en une décennie de trois à sept ans.

Les condensateurs, en se déchargeant, produisent une brève charge électrique destinée à stopper une arythmie ventriculaire. La taille de ces condensateurs a limité (et limite encore) la miniaturisation du défibrillateur : plus un condensateur est grand, plus la charge qu'il peut stocker – et donc l'intensité de décharge – est grande. Comme pour une batterie de voiture, les condensateurs perdent leur puissance s'ils ne sont pas utilisés. Aussi est-il nécessaire de charger et de décharger régulièrement le condensateur. Cette procédure est maintenant effectuée automatiquement, de sorte que les patients ne sont plus obligés de se rendre tous les trois mois à l'hôpital.

Troisième partie du défibrillateur : le circuit électronique. Il assure la coordination entre les différents systèmes de reconnaissance des arythmies. La sensibilité de l'appareil à détecter des signaux cardiaques anormaux a ainsi été perfectionnée et apparaît maintenant très fiable et programmable.

Lorsqu'une arythmie dangereuse est décelée, les condensateurs déchargent vers des électrodes reliées au cœur. Le dispositif utilisé initialement comportait des électrodes appliquées directement sur le cœur, deux plaques de près de 30 centimètres carrés cousues à la surface du cœur. Le choc de défibrillation était émis entre ces deux électrodes. Ce système était complété par deux électrodes vissées dans le muscle cardiaque destinées à surveiller l'activité électrique cardiaque. La lourdeur de mise en place d'un tel système expliquait la mortalité importante liée au geste. Aujourd'hui, le système de défibrillation s'est simplifié. La plupart des systèmes ont un unique cathéter relié au boîtier du défibrillateur. Le boîtier est maintenant dit actif et se comporte comme une électrode. Ce progrès a permis une économie d'énergie en diminuant les seuils de défibrillation.

Décider et agir

Le principe de la défibrillation consiste, lors de la détection d'une fibrillation, à produire un choc électrique censé resynchroniser l'activité électrique anarchique du cœur. Avec les anciens systèmes, les patients souffraient fréquemment de chocs électriques inappropriés : l'appareil intervenait à tort pour des tachycardies physiologiques ou des arythmies sans danger qui pouvaient s'interrompre spontanément. Les progrès dans la spécificité de la détection de l'activité électrique cardiaque ont réduit l'incidence de ces chocs intempestifs et désagréables. Aujourd'hui, les algorithmes distinguent finement les arythmies ventriculaires délétères et les tachycardies auriculaires (bénignes). L'adjonction d'une sonde dans la cavité de l'oreillette droite (là où se situe la zone de départ des impulsions électriques) aide parfois cette discrimination et évite que l'appareil ne soit leurré par une banale tachycardie sinusale, lors d'un effort chez un sujet jeune, par exemple.

Pour chaque patient, selon son profil, on programme les fonctions anti-tachychardiques. Les appareils savent maintenant mettre fin à une crise de tachycardie ventriculaire soutenue avant sa transformation en fibrillation ventriculaire (la cardioversion). Le contrôle des tachycardies ventriculaires prévient la survenue de syncope ou d'arrêt cardiaque et l'émission de chocs de défibrillation de haute énergie. Le bénéfice est double : l'absence de chocs de haute énergie est plus confortable pour le patient et augmente la durée de vie des appareils.

Les défibrillateurs de dernière génération associent, par l'intermédiaire d'électrodes spécifiques, des fonctions agissant sur les cavités des oreillettes avec détection, stimulation, mais aussi défibrillation. Alors que, pour des raisons d'accessibilité, c'est à l'intérieur du ventricule droit que l'on place la sonde, le ventricule gauche peut lui aussi bénéficier de la stimulation

P. Chevalier

2. Deux défibrillateurs à dix ans d'intervalle (échelle réelle). Il y a une décennie, les défibrillateurs étaient gros, peu commodes à implanter. Aujourd'hui, ils ont la taille d'une carte de crédit et sont adaptables à chaque type de patient.

des nouveaux défibrillateurs, notamment en cas d'insuffisance cardiaque. La sonde supplémentaire est placée dans ce cas à l'extérieur du ventricule gauche, sur l'épicarde. Le vaste domaine d'action de ces appareils leur donne l'avantage de pouvoir être personnalisé et adapté aux besoins de chaque patient. Cette souplesse est primordiale dans le suivi du patient cardiaque.

Implantation et suivi simplifié

Aujourd'hui, l'implantation se fait en une heure. Une ponction de la veine sous-clavière permet l'introduction d'une électrode qui est glissée dans la veine cave supérieure, jusqu'à la pointe du ventricule droit. Le boîtier du défibrillateur est ensuite placé sur le muscle pectoral, directement sous la peau, et relié à la sonde électrode *(voir la figure 1)*.

Une fois l'appareil implanté, on vérifie l'intégrité du circuit de haute énergie en déclenchant une arythmie ventriculaire : le patient est endormi pendant quelques minutes et la tachycardie est obtenue par une brève stimulation électrique du ventricule à grande fréquence. De la sorte, on évalue la capacité de l'appareil à reconnaître une arythmie, mais aussi à la traiter efficacement. On estime aussi l'énergie électrique minimale capable de terminer une fibrillation ventriculaire, ce que l'on nomme le seuil de défibrillation.

Ce dernier doit être le plus bas possible pour une marge de sécurité minimale de dix joules. C'est-à-dire que la différence entre l'énergie maximale que peut délivrer le défibrillateur (habituellement 35 joules) et le seuil de défibrillation devra dépasser dix joules. La prise de certains médicaments augmente dangereusement le seuil de défibrillation. S'il est trop élevé, le défibrillateur ne parvient plus à émettre suffisamment d'énergie, de sorte que l'appareil devient inefficace et ne prévient pas la mort subite.

Autre atout des appareils récents : la possibilité de récupérer dans la mémoire de l'appareil les épisodes d'arythmies dont ont souffert les patients. L'analyse de cette mémoire permet de vérifier que le défibrillateur s'est déclenché bien à propos, et non en réponse à un leurre, comme des parasites dus à une anomalie de la sonde. Par ailleurs, l'analyse du début de la tachycardie est aussi précieuse, car sa nature déterminera la programmation anti-tachycardique. Les symptômes décrits par les patients seront mieux analysés grâce à cette fonction mémoire qui peut, dans certains appareils, enregistrer jusqu'à 90 minutes d'activité électrique cardiaque avant la survenue d'une tachycardie.

On recherche actuellement, grâce à ces fonctions mémoires, des signes avant-coureurs des tachycardies qui permettraient de prévenir le patient de l'imminence d'un choc, afin d'administrer des thérapeutiques préventives. Ainsi, grâce à l'analyse par ondelettes du signal électrique qui précède des fibrillations, nous avons noté la présence d'anomalies qui seraient les précurseurs de la fibrillation.

Pour quelques appareils récents, le patient n'a même pas à se déplacer à l'hôpital : la surveillance se fait à distance, le plus souvent par l'envoi d'un compte rendu des performances électriques sur le fax du médecin grâce à un relais satellite.

La qualité de vie

Si la plupart des patients acceptent bien leur appareil – les indices de qualité de vie étant inchangés et même quelquefois améliorés après l'implantation –, un interrogatoire minutieux révèle de nombreux sujets d'inquiétudes. Les patients craignent la survenue des chocs électriques, la perspective d'une nouvelle intervention et la déformation corporelle due à l'appareil, la présence de cicatrice chez les femmes jeunes et la compatibilité du traitement électrique avec une grossesse et un accouchement normaux.

Les chocs électriques donnent lieu le plus souvent à une perception désagréable, comparée à celle d'une secousse dans la poitrine. La douleur ressentie ne semble pas liée à l'intensité de l'énergie du choc, les chocs de basse énergie entraînant des réactions toutes aussi marquées. Chez des patients recevant de multiples chocs, on assiste à des manifestations anxieuses, de l'agressivité ou encore de la dépression. Certains, soucieux de rassurer leur médecin sur la pertinence du choc, vont jusqu'à imaginer des symptômes précédents celui-ci. D'autres, très irrités par cette fâcheuse expérience, jurent que l'appareil a déchargé de façon totalement inopportune (ce que les enregistrements démentent). Des comportements de panique, des phobies accompagnées de perception de choc imaginaire peuvent aussi survenir. Une aide auprès de psychologues spécialistes du traitement de l'anxiété est alors souhaitable pour aider le patient à surmonter son trouble.

Autre sujet d'inquiétude : les interférences électromagnétiques dues aux téléphones portables. Sont-elles dangereuses pour les stimulateurs et les défibrillateurs ? En fait non. À vrai dire, c'est surtout l'environnement électronique des hôpitaux qui pose problème, car, dans la vie courante, de telles interférences sont rarement à l'origine d'effets néfastes pour les patients appareillés. Le problème de la conduite automobile est fréquemment soulevé par les patients porteurs d'un défibrillateur automatique implantable, en raison des risques de syncopes. Habituellement, on conseille simplement une conduite automobile prudente et si possible accompagnée, mais tout dépend du contexte médical.

Ainsi, les progrès techniques ont été rapides et les nouveaux appareils combinent stimulations anti-bradycardique et anti-tachycardique, une extrême souplesse de programmation avec capacités de détections et de stockage des signaux cardiaques très élaborées. Enfin, la disponibilité d'une surveillance à distance du défibrillateur séduit et contribuera certainement à ce que de plus en plus d'appareils soient implantés.

Quelques écueils doivent cependant tempérer un enthousiasme d'implantation à tous crins qui peut être néfaste aux patients et risque de discréditer la technique. La qualité de vie et l'impact psychologique continuent d'être sous-estimés. En ce domaine, des efforts de recherche sont nécessaires. La complexité croissante des appareils nécessite des experts afin que la programmation soit optimale pour un patient donné. L'implantation apparemment facile, comme pour un simulateur cardiaque, ne doit pas faire oublier la nécessité d'un bilan préalable rigoureux. Cette étape est indispensable et ne doit en aucun cas être bâclée sous prétexte de la bénignité de la procédure de mise en place du défibrillateur. C'est un traitement à vie qui est engagé, et la décision doit être prise en toute sérénité par le patient, après une information complète donnée par son médecin, avec du recul et en dehors de toute précipitation. Enfin, l'impact financier est considérable avec un appareil dont le coût avoisine 15 000 euros et qui doit être changé tous les six ans en moyenne. Cette considération invite là encore à de la rigueur dans la décision ou non d'implantation.

Philippe CHEVALIER, professeur de médecine, exerce au Service de rythmologie et soins intensifs de l'Hôpital cardiologique de Lyon.

© POUR LA SCIENCE

IDÉES DE PHYSIQUE

Charges en stock

Les supercondensateurs permettent d'emmagasiner ou de libérer rapidement de l'énergie électrique. Ils constituent des alternatives intéressantes aux batteries.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Recharger un véhicule électrique en seulement quelques minutes ? Si l'énergie est stockée dans des batteries, cela reste irréaliste. Mais de nouveaux types d'accumulateurs électriques, les supercondensateurs, le rendent possible. Ces dispositifs, dont la capacité est un millier de fois supérieure à celle des condensateurs classiques, deviennent incontournables dès qu'une application requiert une puissance instantanée très élevée ou répétée, de l'ouverture d'urgence des portes de l'Airbus A380 à l'alimentation d'une perceuse électrique. À quoi tiennent leur capacité décuplée et leur rapidité d'action ?

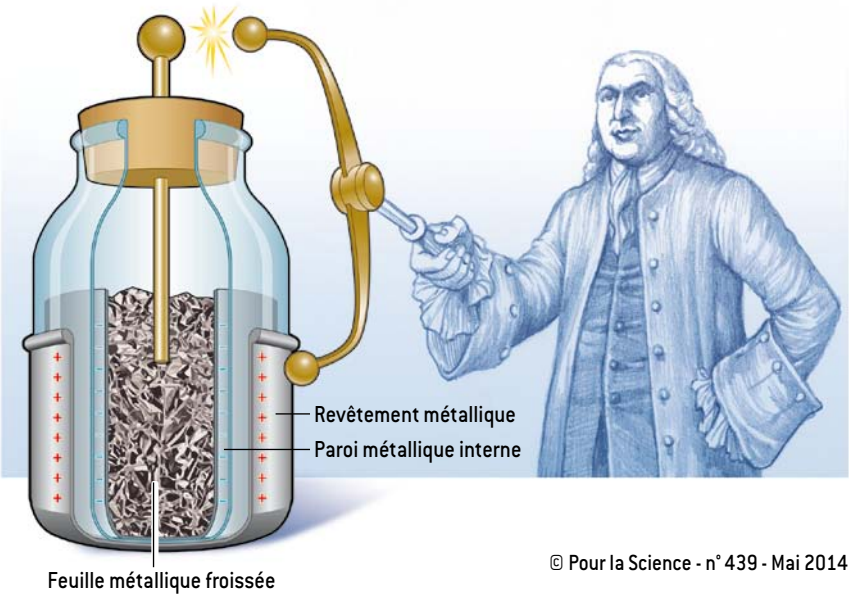
Une bouteille difficile à remplir

Un condensateur est un dispositif permettant de stocker des charges électriques. Son ancêtre, la bouteille de Leyde, inventée en 1745, va nous permettre d'en saisir le principe. Dans sa forme initiale, il s'agit d'une bouteille de verre emplie de feuilles d'étain chiffonnées et recouverte d'une feuille métallique à l'intérieur et à l'extérieur *(voir la figure 1)*. Comment fonctionne-t-elle ? Imaginons qu'à l'aide d'un générateur, nous recueillions à l'intérieur de la bouteille le « fluide électrique », des électrons par exemple. Ces charges négatives, qui circulent au sein de l'étain, un très bon conducteur, se repoussent mutuellement jusqu'à atteindre la paroi métallique interne.

Quelle charge électrique totale la bouteille peut-elle contenir ? Elle est proportionnelle au potentiel électrique du générateur, et le coefficient de proportionnalité est la « capacité » du consensateur. En l'absence de feuille métallique extérieure, on constate que la capacité ne dépend essentiellement que du diamètre de la bouteille, et non de son volume. Avec une capacité de l'ordre d'un centième de nanofarad pour une dimension de dix centimètres, on ne stocke que 10^{-11} coulomb sous une tension de un volt, c'est-à-dire 60 millions d'électrons ! Pourquoi aussi peu ?

Les charges de même signe se repoussant, il est difficile de les amasser. C'est pourquoi on recouvre la bouteille d'une feuille métallique. Cette dernière est reliée à la masse (il suffit de la tenir à la main !) lors de la charge. Soumise au champ électrique des charges à l'intérieur de la bouteille, la surface au contact du verre se couvre de charges opposées, jusqu'à ce que les charges en vis-à-vis se compensent. Cette astuce permet d'augmenter sensiblement la capacité, typiquement d'un facteur 100.

En pratique, pour réaliser un condensateur, nul besoin de bouteille : il suffit de disposer face à face deux conducteurs électriques, séparés par de l'air ou un autre isolant électrique. La capacité est alors proportionnelle à l'aire en vis-à-vis



1. LA BOUTEILLE DE LEYDE est l'ancêtre du condensateur électrique. Ses deux pôles sont constitués par ses surfaces métalliques interne et externe, isolées l'une de l'autre par la paroi de verre. En les reliant avec un conducteur électrique, le manipulateur crée un court-circuit et décharge le condensateur.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

et inversement proportionnelle à l'épaisseur (l'écart entre les deux surfaces). On réalise ainsi des condensateurs en enroulant dans un petit cylindre scellé deux feuilles d'aluminium séparées par une feuille d'isolant d'épaisseur micrométrique. Sur ce même principe, on fabrique des condensateurs en céramique mesurant quelques millimètres et ayant des capacités de l'ordre du microfarad.

Du charbon poreux pour emmagasiner les charges

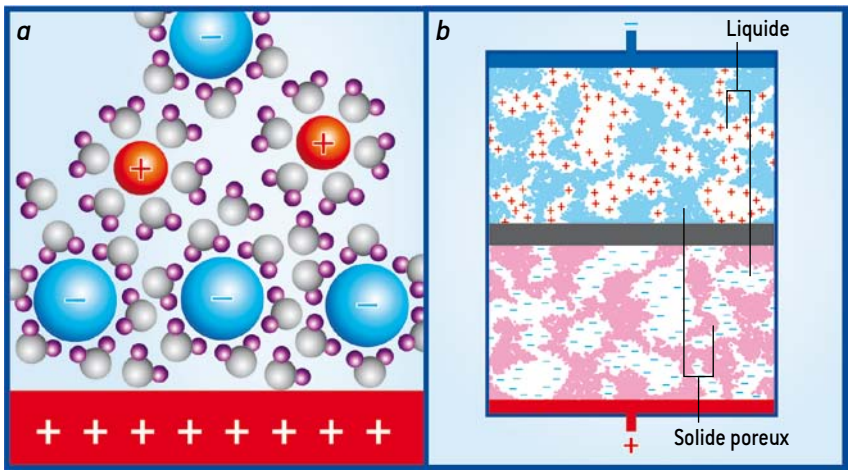
Tout cela est fort utile pour réaliser des circuits électroniques, mais ne suffit pas pour stocker une quantité substantielle de charges. Pour obtenir des capacités bien supérieures, il faut augmenter la surface du condensateur et réduire son épaisseur.

Pour ce qui est de l'épaisseur, les supercondensateurs exploitent un phénomène connu sous le nom de double couche électrochimique, qui advient lorsqu'un électrolyte (un solvant contenant des ions) se trouve en contact avec une surface chargée *(voir la figure 2)*.

Imaginons que la charge de cette plaque soit positive. Elle attire les ions négatifs, les anions, qui viennent à proximité de la surface tandis que les ions positifs sont repoussés. Or chacun des anions est solvaté, c'est-à-dire entouré par des molécules du solvant, qui forment comme une cage protectrice autour de lui. Si la tension de la plaque n'est pas trop importante (en pratique, de l'ordre du volt), il n'y aura pas de transfert de charges entre la surface et les anions (cela évite en outre de déclencher des réactions d'électrolyse, qui requièrent des tensions seuils).

Le résultat est que, face à la plaque chargée positivement, se forme une couche d'anions, la plaque positive et la couche d'anions étant séparées par l'épaisseur d'une molécule de solvant. On a ainsi réalisé un condensateur d'épaisseur inférieure au nanomètre, soit une capacité d'une dizaine de microfarads par centimètre carré.

Reste à augmenter la surface. Comment ? En utilisant un matériau poreux, tels les charbons actifs qui peuvent présenter des surfaces de 1 000 à 2 000 mètres carrés par gramme – ce qui laisse espérer une capacité de 100 farads par gramme de matériau poreux. Le stockage en surface, caractéristique d'un condensateur classique, devient un stockage en volume.



Dessins de Bruno Vacaro

2. LES SUPERCONDENSATEURS mettent à profit le phénomène de « double couche électrochimique » *(a)*. Une surface chargée, mettons positivement, est mise au contact d'un liquide contenant des ions solvatés (entourés de molécules du solvant). Se constitue alors une couche d'anions, séparée de la surface positive par une épaisseur moléculaire. Cette configuration équivaut à un condensateur de très faible épaisseur. Dans un supercondensateur *(b)*, cet effet de double couche électrochimique est reproduit sur toute la surface offerte par un matériau poreux baignant dans un liquide contenant des ions. La faible épaisseur des doubles couches et la grande surface effective confèrent au dispositif une très grande capacité électrique.

Un supercondensateur typique est ainsi constitué de deux électrodes de charbon actif imprégnées d'une solution électrolytique et séparées par une membrane isolante, mais perméable aux ions *(voir la figure 2)*. Par rapport aux batteries usuelles, l'absence de réactions chimiques autorise une stabilité de charge et de décharge bien plus importante, avec une durée de vie supérieure à un million de cycles de charge/décharge (contre quelques milliers de cycles pour une batterie lithium-ion).

Par ailleurs, comme le processus de charge ou de décharge met en jeu la mobilité des ions, mais ne transforme pas ces derniers, il peut s'effectuer en quelques secondes – durée à comparer aux minutes nécessaires à la décharge d'une batterie et aux dizaines de minutes, voire aux heures, pour la recharger. En revanche, la tension de fonctionnement (le volt) limite assez fortement la densité d'énergie

LES AUTEURS

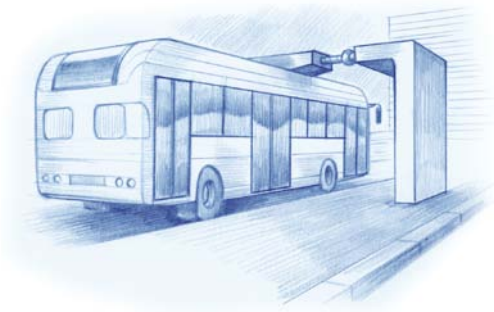
Jean-Michel COURTY
et Édouard KIERLIK
sont professeurs de physique
à l'Université Pierre
et Marie Curie, à Paris.
Leur blog : http://blog.idphys.fr

BIBLIOGRAPHIE

S. Kondrat *et al.*, **Accelerating charging dynamics in subnanometre pores**, *Nature Materials*, vol. 13, pp. 387-393, 2014.

P. Jampani *et al.*, **Advancing the supercapacitor materials and technology frontier for improving power quality**, *Interface*, vol. 19(3), pp. 57-62, 2010.

Retrouvez la rubrique Idées de physique sur www.pourlascience.fr



3. DES AUTOBUS TOUT ÉLECTRIQUES fonctionnant grâce à des supercondensateurs voient peu à peu le jour. La recharge des supercondensateurs, placés sur le toit du véhicule, est effectuée durant l'arrêt à chaque station, *via* une borne électrique installée en hauteur. L'énergie ainsi emmagasinée permet à l'autobus de se déplacer jusqu'à la station suivante.

électrique stockable : on atteint la dizaine de wattheures par kilogramme, soit un dixième de la densité d'énergie des batteries lithium-ion. Autrement dit, le dispositif est idéal pour stocker et fournir dans un temps record de l'énergie, mais en quantité modeste.

Parmi les nombreuses applications envisageables, on peut citer le domaine des transports *(voir la figure 3)* : les supercondensateurs servent désormais à récupérer l'énergie du freinage d'une voiture, qui sinon était perdue sous forme de chaleur. À la clef : des économies d'énergie pour les métros, les tramways (jusqu'à 40 pour cent), les véhicules disposant d'un système *Stop & Start* (extinction à l'arrêt et redémarrage), ou une poussée des performances des voitures de course, telle la *Toyota Supra HV-R*, ou de tourisme, telle la *Toyota Yaris Hydrid-R*. Cette dernière est équipée sous sa banquette arrière d'un supercondensateur, de la taille d'une petite valise, qui fournit à deux moteurs électriques une puissance de 40 chevaux pendant dix secondes.

Le *Bluetram* du groupe Bolloré est plus ambitieux encore. Il s'agit d'un projet d'autobus entièrement électrique qui roulera en toute autonomie d'une station à une autre. Ses supercondensateurs, installés sur le toit, sont rechargés par un bras télescopique à chaque station en 90 secondes (à peine plus qu'un arrêt standard), pour une autonomie de plus d'un kilomètre. L'ensemble comporte 30 modules de 20 supercondensateurs, chacun pesant 500 grammes, de capacité 2 600 farads et de tension 2,7 volts, soit une énergie totale de 6 millions de joules environ. La mise en route est prévue d'ici 2015 à Singapour et à Bordeaux. ■

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM { Partagez les savoirs }

Entrée gratuite

CONFÉRENCES-DÉBATS

Lundi 12 mai — 18h
La météorite d'Orgueil : une chute exceptionnelle
M. Gounelle, professeur au Muséum, membre de l'Institut Universitaire de France

Cycle Le Parc zoologique de Paris

Lundi 19 mai — 18h
Le rôle des zoos dans la conservation de la biodiversité
J.-L. Berthier, docteur vétérinaire, ancien responsable scientifique des collections animales vivantes, Muséum

Lundi 26 mai — 18h
La conception paysagère du Parc zoologique
Un exemple : la serre Guyane-Madagascar
M. Mugnier, paysagiste, Atelier Jacqueline Osty & Associés,
D. Larpin, botaniste, responsable des collections végétales tropicales, Muséum

Lundi 2 juin — 18h
Le Parc zoologique de Paris, une nouvelle espèce de zoo
S. Ferreira-Le-Morvan, directrice du Parc zoologique de Paris
A. Lécu, vétérinaire et directeur scientifique du Parc zoologique de Paris
E. Quertier, responsable pédagogique et culturel du Parc zoologique de Paris

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution — 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5e

BAR DES SCIENCES

Dimanche 25 mai — 17h30
Biodiversité des îles
A. Abdou, malacologue, Muséum
B. Pisanu, chargé d'étude, espèces invasives, Muséum
M. Guillaume, écologue, spécialiste des récifs coralliens, Muséum
F. Larrey, naturaliste, photographe, association Regard du Vivant Jean-Patrick Leduc, délégué aux affaires européennes et internationales, Muséum
J.-P. Leduc, délégué aux affaires européennes et internationales, Muséum

Café-restaurant La Baleine — 47 rue Cuvier, Paris 5e

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "Les rendez-vous du Muséum"

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014