

Cours d'électrocinétique

EC1-Lois en régime quasi-stationnaire

Table des matières

1	Introduction	2
2	Qu'est-ce que l'électrocinétique ?	2
3	Rappels sur les grandeurs intensité et tension	2
3.1	Intensité du courant	2
3.1.1	Sens conventionnel	2
3.1.2	Définition	2
3.2	Tension	3
3.2.1	Définition et mesure	3
3.2.2	Convention	3
4	ARQS	3
4.1	Régimes continus ou variables	3
4.2	Approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)	3
4.2.1	Définition	3
4.2.2	Validité	3
5	Loi des nœuds et loi des mailles	4
5.1	Loi des mailles	4
5.2	Loi des noeuds	4
6	Puissance, générateur, récepteur	5
7	Caractéristique d'un dipôle	5
8	Dipôle actif ou passif	5
9	Les conducteurs ohmiques	6
9.1	Loi d'Ohm	6
9.2	Effet Joule	6
9.3	Association de conducteurs ohmiques	6
9.3.1	Association en série : montage diviseur de tension	6
9.3.2	Association en parallèle : montage diviseur de courant	7
10	Théorème de Millman	7

11 Les générateurs	8
11.1 Générateur de tension idéal	8
11.2 Générateur de courant idéal	8
11.3 Association de générateurs	9
11.4 Modélisation linéaire des générateurs réels	9
11.4.1 Modèle de Thévenin	9
11.4.2 Modèle de Norton	9
11.4.3 Passage d'un modèle à l'autre	10
12 Intérêt des modèles de Thévenin et Norton	10
12.1 Méthode des mailles	10
12.2 Méthode des nœuds	10

1 Introduction

Ce chapitre sera l'occasion de définir les bases de l'électrocinétique, de revoir les grandeurs physiques comme la tension et le courant, ainsi que les lois qui les concernent dans un circuit quelconque.

2 Qu'est-ce que l'électrocinétique ?

L'électrocinétique est l'étude du mouvement d'ensemble des porteurs de charge dans un circuit que l'on appelle courant électrique. Les charges se déplacent sous l'effet d'un champ électrique extérieur.

3 Rappels sur les grandeurs intensité et tension

3.1 Intensité du courant

3.1.1 Sens conventionnel

On a attribué un sens conventionnel au courant électrique qu'il convient de respecter : le courant électrique est compté positivement lorsqu'il va dans le même sens que celui dans lequel se déplaceraient des charges positives soumis à un champ extérieur.

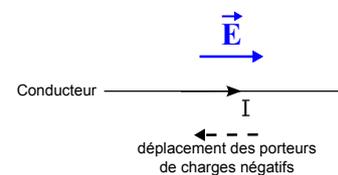


FIGURE 1 – Intensité du courant

3.1.2 Définition

Comme nous l'avons déjà vu, l'intensité du courant est la quantité de charges δq qui traverse une section S du conducteur pendant un temps δt . Son unité est l'ampère (A), 1A correspond à $1 \text{ C}\cdot\text{s}^{-1}$.

3.2 Tension

3.2.1 Définition et mesure

La tension est une différence de potentiel électrique entre deux points d'un circuit et se mesure avec un voltmètre qui la donne en Volt (V).

Il n'existe pas d'appareil pour mesurer le potentiel électrique en un point, on ne fait que mesurer des différences de potentiels : pour cela, on fixe arbitrairement le point de potentiel nul appelé la masse.

Comme on l'a vu en électrostatique, le potentiel électrique n'est défini qu'à une constante près.

3.2.2 Convention

Comme pour l'intensité du courant, on choisit un sens conventionnel pour la tension : on note $U_{AB} = V(A) - V(B)$ la tension entre les points A et B d'un circuit par une flèche dirigée de A vers B. U_{AB} est positive si $V(A) > V(B)$.

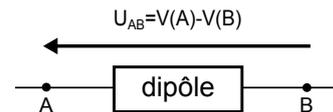


FIGURE 2 – Tension et différence de potentiels aux bornes d'un dipôle

4 Régimes continus ou variables, approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)

4.1 Régimes continus ou variables

On parle de régime continu lorsque les grandeurs électriques, notamment l'intensité et la tension ne dépendent pas du temps.

On parle de régime variable si ces grandeurs varient dans le temps, ce qui peut avoir plusieurs causes : cas du régime transitoire de la charge ou décharge d'un condensateur, cas d'un régime forcé imposé par un GBF.

4.2 Approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)

4.2.1 Définition

Cette approximation consiste à dire que quel que soit le régime, l'intensité du courant est la même en tout point d'une branche de circuit.

4.2.2 Validité

Cette approximation est valable pour un régime variable si le temps caractéristique de sa variation (τ pour la charge ou décharge d'un condensateur, T pour un signal sinusoïdal imposé par un GBF) est grand devant le temps de propagation de l'intensité.

Cette approximation sera possible si les dimensions du circuit ne sont pas trop grandes, car l'intensité se propageant à une vitesse proche de celle de la lumière, le temps de propagation est $\frac{L}{c}$ ce qui fait 10^{-8} s pour un circuit d'1 mètre de longueur.

Les régimes variables étudiés ont des temps caractéristiques bien plus grand (ex : régime transitoire de la décharge d'un condensateur de capacité $1 \mu\text{F}$ dans une résistance de 500Ω :

$$5 \times \tau = 5 \times RC = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ ms} \gg 10^{-8} \text{ s}.$$

Dans tout ce qui suit, on considérera les conditions de l'ARQS réalisées.

5 Loi des nœuds et loi des mailles

Avant d'écrire ces lois, définissons quelques notions relatives au circuit électrique :

- Une branche est constituée d'une association en série d'un ou plusieurs dipôles (fils, résistance, bobine, ...) : dans le circuit ci-contre, AB est une branche, BC également, ...
- Un nœud est un point du circuit où se retrouvent plusieurs branches : le nœud B réunit les branches AB, BC et BE.
- Une maille est une série de branches qui part d'un nœud pour revenir au même nœud : on définit la maille ABCD ou BEFC ou AEFD ...

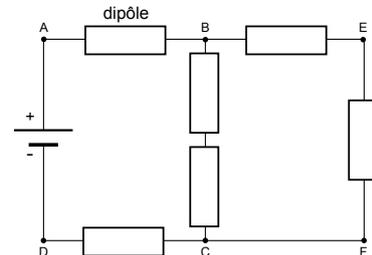


FIGURE 3 – Un circuit électrique quelconque

5.1 Loi des mailles

La somme des tensions à l'intérieur d'une maille est nulle.

Sur la maille ABCD, on a :

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} + U_{DA} = 0 \quad (1)$$

En effet :

$$V_A - V_B + V_B - V_C + V_C - V_D + V_D - V_A = 0 \quad (2)$$

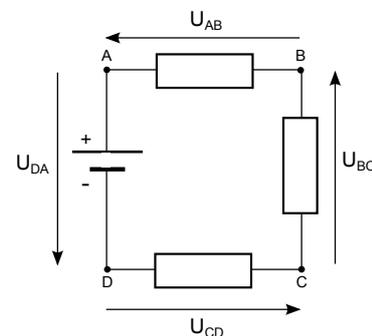


FIGURE 4 – Loi des mailles

5.2 Loi des noeuds

Cette loi traduit la conservation de la charge électrique.

La somme des courants qui arrivent sur un nœud est égale à la somme des courants qui en repart :

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (3)$$

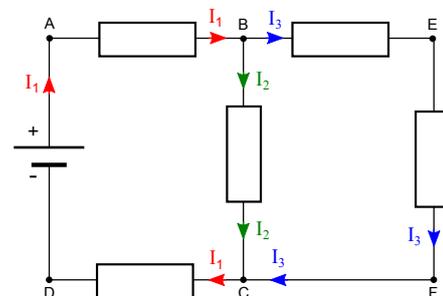


FIGURE 5 – Loi des noeuds

6 Puissance reçue, conventions générateur et récepteur

Soit un dipôle dans la configuration ci-contre.

La puissance reçue par ce dipôle est définie par :

$$P = U \times I \quad (4)$$

Cette puissance est positive dans le cas d'un dipôle récepteur.

Ainsi, la configuration présentée ci-contre est appelée **convention récepteur** : les sens de I et U sont opposés.

Alors, si la puissance reçue est négative, c'est que le dipôle fournit de l'énergie. C'est un générateur et on utilisera la **convention générateur** : I et U sont dans le même sens.

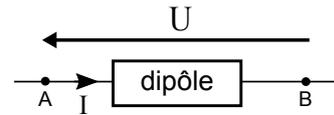


FIGURE 6 – Puissance reçue par un dipôle

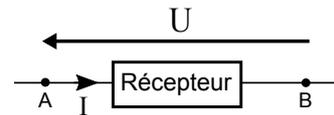


FIGURE 7 – Convention récepteur

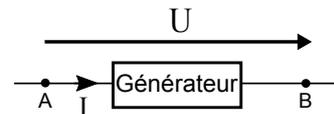


FIGURE 8 – Convention générateur

7 Caractéristique d'un dipôle

Lorsque l'on souhaite tracer la caractéristique d'un dipôle, on s'intéresse à la **fonction** $u=f(i)$ (caractéristique tension-courant). Si cette fonction est une **droite**, on parle de **dipôle linéaire**.

8 Dipôle actif ou passif

Un dipôle passif est un dipôle qui convertit toute l'énergie électrique qu'il reçoit en énergie thermique (conducteur ohmique, diode, ...).

Sa caractéristique passera forcément par l'origine.

Un dipôle actif fournit à l'extérieur de l'énergie thermique et une autre forme d'énergie :

- Un générateur fournira de l'énergie thermique et de l'énergie électrique ;
- Un récepteur comme un moteur fournit de l'énergie thermique et de l'énergie mécanique à partir d'énergie électrique.

La caractéristique de ces dipôles ne passe pas par l'origine.

9 Les conducteurs ohmiques

9.1 Loi d'Ohm

Un conducteur ohmique est un dipôle dont la caractéristique est une droite passant par l'origine. Il répond donc à la loi d'Ohm qui s'écrit :

$$u = Ri \quad (5)$$

Avec u , la tension en Volt(V), i , l'intensité en ampère (A) et R la résistance du conducteur ohmique exprimée en Ohm (Ω).

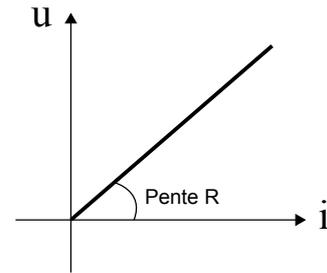


FIGURE 9 – Caractéristique d'un conducteur ohmique

9.2 Effet Joule

On appelle effet Joule la dissipation de l'énergie électrique reçue par énergie thermique dans un dipôle.

Le conducteur ohmique dissipe sous forme de chaleur la puissance :

$$P = Ri^2 \quad (6)$$

9.3 Association de conducteurs ohmiques

9.3.1 Association en série : montage diviseur de tension

Lorsque l'on associe plusieurs conducteurs ohmiques en série, leurs résistances s'ajoutent : La résistance globale est appelée "résistance équivalente".

Pour la situation ci-contre, on a :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (7)$$

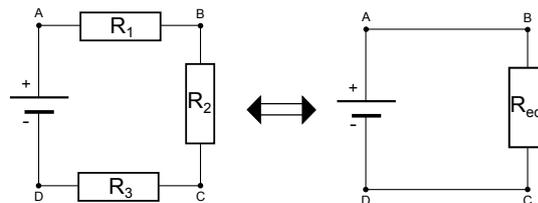


FIGURE 10 – Association de conducteurs ohmiques en série

Dans cette association en série de conducteurs, on peut utiliser la propriété "diviseur de tension". Elle consiste à exprimer la tension aux bornes d'un conducteur en fonction de sa résistance, de la résistance équivalente et de la tension aux bornes de l'ensemble.

Voici un exemple :

$$U_{R_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E = \frac{R_1}{R_{\text{eq}}} E \quad (8)$$

$$U_{R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E = \frac{R_2}{R_{\text{eq}}} E \quad (9)$$

U_{R_1} et U_{R_2} ne sont qu'une fraction de la tension E , le montage s'appelle un diviseur de tension.

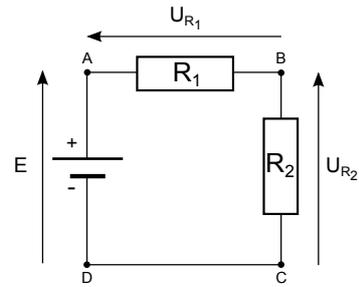


FIGURE 11 – Diviseur de tension

9.3.2 Association en parallèle : montage diviseur de courant

Lorsque l'on associe plusieurs conducteurs ohmiques en parallèle, leurs conductances définies par $G = \frac{1}{R}$ s'ajoutent :

Pour la situation ci-contre, on a :

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (10)$$

$$G_{\text{eq}} = G_1 + G_2 + G_3 \quad (11)$$

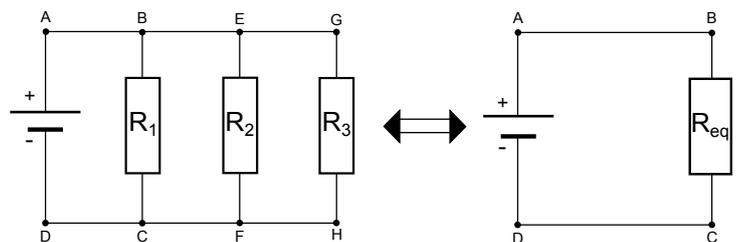


FIGURE 12 – Association de conducteurs ohmiques en parallèle

Dans cette configuration en parallèle, on peut utiliser le diviseur de courant :

$$I_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} I = \frac{G_1}{G_{\text{eq}}} I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \quad (12)$$

En effet, pour deux résistances en parallèle, on a

$$R_{\text{eq}} = \frac{1}{G_{\text{eq}}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \text{ donc :}$$

$$I_1 = \frac{G_1}{G_{\text{eq}}} I = \frac{1}{R_1} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \quad (13)$$

I_1 n'est qu'une fraction de l'intensité I , le montage s'appelle un diviseur de courant.

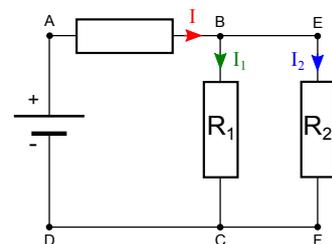


FIGURE 13 – Diviseur de courant

10 Théorème de Millman

Ce théorème exprime la loi des noeuds en terme de potentiels électriques :

Si on applique la loi d'Ohm à chaque dipôle, on a :

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{V_A - V_B}{R_1} \quad (14)$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{V_C - V_B}{R_2} \quad (15)$$

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{V_D - V_B}{R_3} \quad (16)$$

On applique ensuite la loi des noeuds :

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (17)$$

$$\Leftrightarrow \frac{V_A - V_B}{R_1} + \frac{V_C - V_B}{R_2} + \frac{V_D - V_B}{R_3} = 0 \quad (18)$$

Et le théorème de Millman s'écrit :

$$V_B \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{V_A}{R_1} + \frac{V_C}{R_2} + \frac{V_D}{R_3} \quad (19)$$

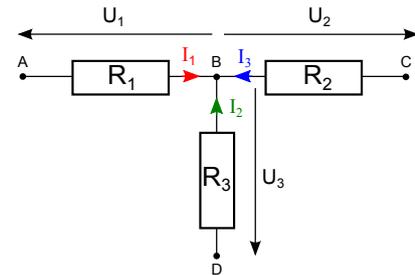


FIGURE 14 – Théorème de Millman

11 Les générateurs

11.1 Générateur de tension idéal

Un générateur de tension idéal est un générateur qui délivre une tension constante quel que soit l'intensité débitée.

La tension délivrée est appelée force électromotrice, elle est notée E et s'exprime en Volt (V).

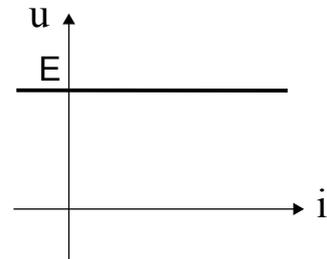


FIGURE 15 – Caractéristique d'un générateur de tension idéal

11.2 Générateur de courant idéal

Un générateur de courant idéal est un générateur qui délivre une intensité constante quel que soit la tension à ses bornes.

Le courant délivré est appelé courant électromoteur, il est notée η et s'exprime en Ampère (A).

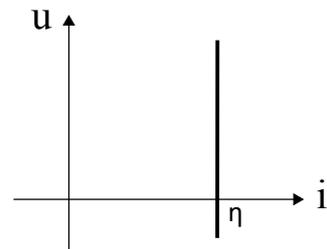


FIGURE 16 – Caractéristique d'un générateur de courant idéal

11.3 Association de générateurs

- L'association en série de deux générateurs de tension idéaux de fém E_1 et E_2 est équivalente à un générateur de tension idéal qui délivre la force électromotrice $E_1 + E_2$.
- L'association en parallèle de deux générateurs de courant idéaux de cém η_1 et η_2 est équivalente à un générateur de courant idéal qui délivre le courant électromoteur $\eta_1 + \eta_2$.

11.4 Modélisation linéaire des générateurs réels

Même si la caractéristique générale d'un générateur n'est pas une droite, les conditions d'utilisation des générateurs montrent que l'on peut localement considérer leur caractéristique comme étant linéaire.

11.4.1 Modèle de Thévenin

Définition Tout générateur réel peut être modélisé par un générateur **idéal de tension** de fém E **en série** avec une résistance r appelée **résistance interne** du générateur et exprimée en Ohm (Ω).

Sa caractéristique a pour équation :

$$u = E - r \times i \quad (20)$$

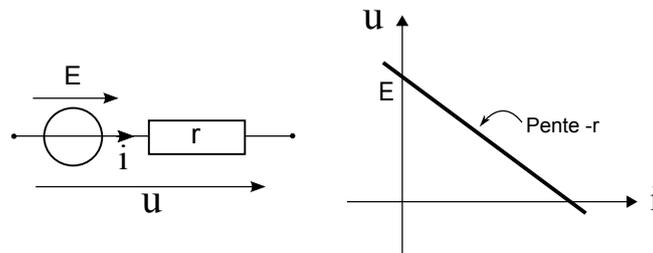


FIGURE 17 – Modèle de Thévenin d'un générateur réel

Association Si deux générateurs de Thévenin (E_1, r_1) et (E_2, r_2) sont associés en série, l'ensemble est équivalent à un générateur de Thévenin de fém $E_1 + E_2$ et de résistance interne $r_1 + r_2$.

11.4.2 Modèle de Norton

Définition Tout générateur réel peut être modélisé par un générateur **idéal de courant** de cém η **en parallèle** avec une résistance r appelée **résistance interne** du générateur et exprimée en Ohm (Ω).

On peut aussi introduire g , conductance interne du générateur exprimée en Siemens (S).

Sa caractéristique a pour équation :

$$i = \eta - g \times u = \eta - \frac{u}{r} \quad (21)$$

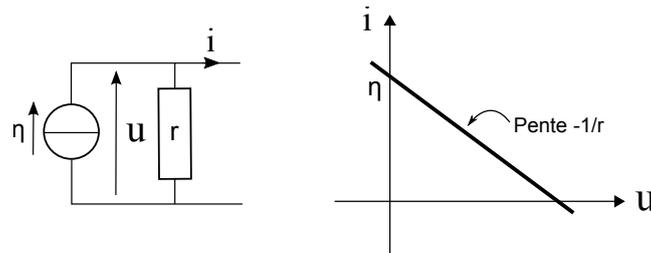


FIGURE 18 – Modèle de Norton d'un générateur réel

Attention ici, c'est une caractéristique intensité-tension qui est représentée.

Association Si deux générateurs de Norton identiques (η_1, g_1) et (η_2, g_2) sont associés en parallèle, l'ensemble est équivalent à un générateur de Norton de cém $\eta_1 + \eta_2$ et de conductance interne $g_1 + g_2$.

11.4.3 Passage d'un modèle à l'autre

Les modèles de Thévenin et de Norton sont équivalents, on peut passer de l'un à l'autre à l'aide de la relation :

$$\boxed{E = r \eta} \quad (22)$$

12 Intérêt des modèles de Thévenin et Norton

La transformation Thévenin-Norton permet de mettre en œuvre la méthode des nœuds et la méthode des mailles qui permettent de calculer toutes les tensions entre les nœuds du circuit ou toutes les intensités dans les branches de celui-ci.

12.1 Méthode des mailles

On cherche à calculer les intensités dans les branches. Dans cette méthode, **on transforme tous les générateurs en modèle de Thévenin**, puis on mène les calculs en appliquant à bon escient la loi des mailles et la loi des nœuds vues précédemment.

12.2 Méthode des nœuds

Celle-ci permet de calculer les tensions entre les nœuds du circuit. Il faudra pour l'appliquer **transformer tous les générateurs en modèle de Norton**, puis appliquer la loi des nœuds et la loi des mailles à bon escient.

Bien souvent c'est un mélange de la méthode des nœuds et de la méthode des mailles qui permet de résoudre le problème posé.