

Chapitre E1 : Bases de l'électrocinétique dans l'ARQS

Plan du cours

I. Charge, courant électrique et tension dans les circuits électriques	2
I. 1 - Charge électrique	2
I. 2 - Courant électrique	2
I. 3 - Tension électrique	4
I. 4 - Masse d'un circuit électrique	5
II. ARQS et lois de Kirchhoff	6
II. 1 - Qu'est-ce que l'ARQS ?	6
II. 2 - Loi des nœuds	8
II. 3 - Loi des mailles	9
III. Association de dipôles dans les circuits électriques	10
III. 1 - Résistances en série	10
III. 2 - Résistances en parallèle	11
III. 3 - Ponts diviseurs	12
III. 4 - Résistance d'entrée et de sortie d'un dipôle électrique	14
III. 5 - Convention récepteur, convention générateur	15
III. 6 - Précisions sur les fils et les interrupteurs ouverts	16

Introduction

▷ L'électrocinétique est le domaine de la physique qui étudie le mouvement des électrons et des charges, autrement dit les courants électriques. Cette étude se limite à celle des faibles puissances électrique, autrement dit nous n'étudions pas dans ce cadre les moteurs et machines tournantes. Son étude est fondamentale, vu les nombreux développements modernes de l'électronique.

Après les nombreux travaux au XVII^{ème} siècle sur la conception de machines électrostatiques pour produire des charges électriques, les études suivantes ont surtout concerné le stockage de l'électricité à l'aide de condensateurs, dont le premier, appelé bouteille de LEYDE fabriqué en 1745 dans la ville portant le même nom.

C'est en 1800, avec VOLTA, que naît la première pile électrique, obtenue en empilant les disques de cuivre et de zinc séparés par des disques de feutre imbibés d'acide. Sa découverte, fondamentale pour l'utilisation de l'électricité de manière continue, a permis de nombreux et rapides développements. Les premières lois sur le courant et la tension électriques, termes introduits par AMPÈRE, voient le jour en 1827 avec la loi d'OHM, et en 1845 les deux principales lois sur les circuits ont été établies par KIRCHHOFF.



Problématique :

Quelles sont les grandeurs caractérisant un système électrique ? Quelles sont les lois régissant le comportement des circuit électriques dans le cadre de l'ARQS ?

I. Charge, courant électrique et tension dans les circuits électriques

I. 1 - Charge électrique



Définition n°1 : Charge électrique



Remarque

▷ Les quarks, particules élémentaires constituant les protons et les neutrons, portent des charges fractionnaires $2e/3$ et $-e/3$, mais ils vont toujours par trois et ne peuvent pas être isolés séparément.

I. 2 - Courant électrique

▷ Un conducteur est un matériau dans lequel il existe des particules chargées pouvant se déplacer sur des distances très supérieures à la distance entre atomes, appelées porteurs de charge libres. Un matériau dans lequel il n'en existe pas est un isolant.



Exemples



Définition n°2 : Courant électrique

▷ Un courant électrique est un mouvement d'ensemble de porteurs de charges (particules chargées positivement ou négativement) comme les électrons dans un milieu conducteur. Par convention, le sens du courant est le sens de déplacement des porteurs de charge positifs, et opposé au sens de déplacement des porteurs de charge négatifs.

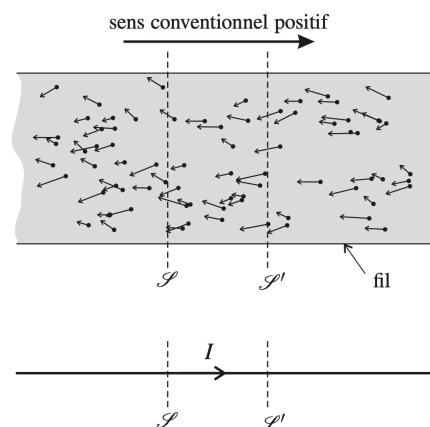


FIGURE 1 – Déplacement des électrons au sein d'un conducteur et sens conventionnel du courant électrique

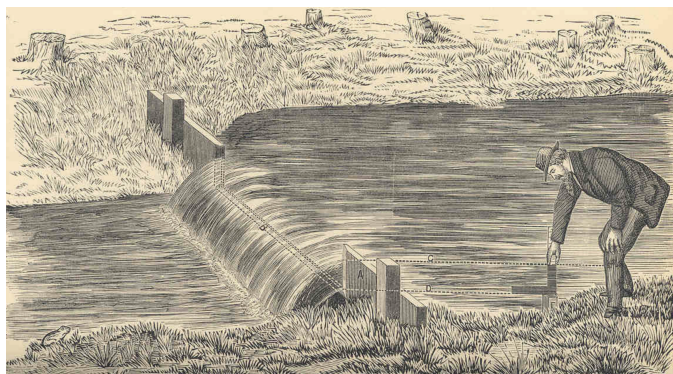


FIGURE 2 – Homme mesurant le débit d'un cours d'eau

▷ Nous allons maintenant quantifier l'intensité du courant électrique. Procédons à une analogie :

Considérons un fleuve. Le débit du fleuve est déterminé par la quantité de mètres cubes d'eau qui s'écoulent devant un observateur fixe sur la rive par seconde : il s'agit du débit volumique, noté D , qui s'exprime en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Le débit D est donc lié au volume ΔV qui passe à travers une section S du fleuve (observée par la personne sur la rive) durant une durée Δt : $D = \frac{\Delta V}{\Delta t}$. On fera attention au sens de déplacement, le débit peut changer de signe en fonction du point de vue : si on compte positivement l'eau qui se trouve à gauche mais que l'eau s'écoule de la gauche vers la droite, le débit sera compté négatif.



Propriété n°1 : Intensité du courant électrique (rappel de Terminale Spé)



Remarque

▷ Dans un métal ou dans une solution aqueuse, pour que les porteurs de charges se déplacent et soient à l'origine d'un courant électrique, ils doivent être soumis à un champ électrique. En effet, ils subissent alors une force $\vec{F} = q\vec{E}$ ce qui les contraint à se diriger dans le sens du vecteur champ électrique $\vec{E}$. Sans champ électrique extérieur, les porteurs de charge sont, à l'échelle microscopique, animés d'un mouvement aléatoire sous l'effet de l'agitation thermique (ils possèdent une énergie $\varepsilon_{\text{th}} \propto k_B T$ cf. cours de thermodynamique). Leur mouvement s'annule en moyenne, ce qui ne peut pas donner naissance à un courant électrique.

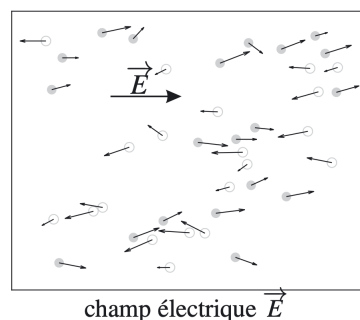
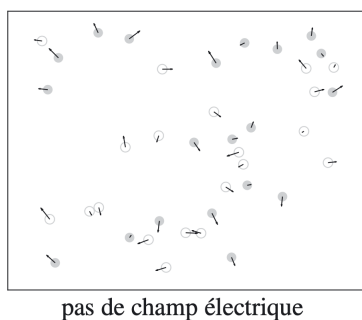


FIGURE 3 – Déplacement de porteurs de charges au sein d'un milieu conducteur en présence/absence d'un champ électrique



Propriété n°2 : Sens conventionnel du courant

▷ Dans un circuit relativement complexe (plusieurs embranchements, régime sinusoïdal,...), on ne peut pas connaître *a priori* le sens du déplacement des porteurs de charge. Il convient alors de définir arbitrairement le sens positif du courant (**sens conventionnel**), pour permettre de fixer les idées et réaliser les calculs. On indique ce sens par une flèche sur le schéma :

- si le sens réel du courant coïncide avec le sens conventionnel, $i > 0$;
- si le sens réel du courant est opposé au sens conventionnel, $i < 0$.



Propriété n°3 : Mesure de l'intensité du courant électrique (rappel de 2nde)

▷ Le courant électrique peut être mesuré à l'aide d'un ampèremètre. Cet appareil est polarisé c'est-à-dire qu'il possède une borne + (A/mA) et une borne - (souvent désignée par "COM"). On le branche en série, dans la branche dont on souhaite mesurer l'intensité électrique.

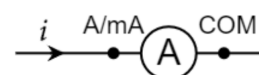


FIGURE 4 – Branchement d'un ampèremètre



Remarques

- Le choix du calibre d'un ampèremètre est extrêmement important, car il détermine la plage d'intensité de courant que l'instrument peut mesurer de manière précise et sécurisée. Le calibre approprié doit être sélectionné en fonction du courant attendu dans le circuit que vous souhaitez mesurer.
- Si on ne connaît pas l'ordre de grandeur de l'intensité du courant dans le circuit, on branche l'ampèremètre sur le plus grand calibre possible puis on le réduit (pour ne pas l'endommager, sinon il y a de grandes chances que le fusible interne saute).

I. 3 - Tension électrique

▷ Le courant électrique décrit le mouvement des charges, mais n'explique pas pourquoi les charges se mettent à se déplacer. Cela n'est en fait pas si simple à expliquer ! On peut s'en faire une image toujours par analogie avec l'écoulement d'un fleuve. Le sens spontané d'écoulement de l'eau se fait des zones de haute altitude (grande énergie potentielle de pesanteur) vers les zones de plus basse altitude (faible énergie potentielle de pesanteur). L'argument est semblable pour les charges électriques : il existe des zones de haute énergie potentielle électrique, et d'autres zones d'énergie potentielle électrique plus faible. On admet (on le justifiera dans le cours de mécanique) qu'il existe un potentiel électrique V tel que $E_{p,elec}(M) = qV(M)$ soit l'énergie potentielle électrique d'une particule de charge q placée en un point (au nœud) M ♥. En suivant cette logique, le courant électrique s'écoule des zones de haut potentiel électrique vers des zones de bas potentiel électrique.

Si l'intensité du courant électrique est assimilable à un débit, le potentiel électrique est assimilable à une altitude. Sur le schéma ci-contre, si $z_A > z_B$, un courant hydraulique s'établit pour faire circuler l'eau de A vers B . Si $V_A > V_B$, un courant électrique s'établit et circule de A vers B .

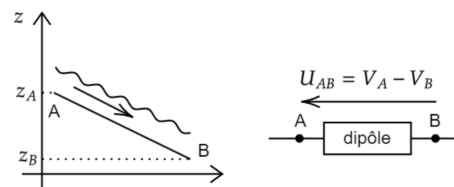


FIGURE 5 – Analogie hydraulique illustrant le principe de tension électrique

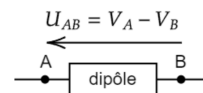
**Définition n°3 : Tension électrique**

FIGURE 6 – Tension électrique

**Attention !**

▷ La tension électrique n'est pas un vecteur, bien que l'emploi d'une flèche soit nécessaire pour la représenter entre deux points du circuit électrique.

**Propriété n°4 : Mesure d'une tension électrique (rappel de 2nde)**

▷ Le courant électrique peut être mesuré à l'aide d'un ampèremètre. Cet appareil est polarisé c'est-à-dire qu'il possède une borne + (A/mA) et une borne – (souvent désignée par "COM"). On le branche en série, dans la branche dont on souhaite mesurer l'intensité électrique.

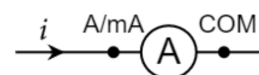


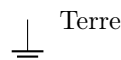
FIGURE 7 – Branchement d'un ampèremètre

I. 4 - Masse d'un circuit électrique

▷ Nous allons désormais nous intéresser à un point extrêmement important du cours d'électrocinétique : la masse d'un circuit électrique. Il est impossible de mesurer directement le potentiel électrique, seules les tensions, c'est-à-dire des différences de potentiel sont accessibles. Un oscilloscope mesure usuellement la tension d'un dipôle en calculant la différence de potentiel entre les deux bornes du dipôle. Choisir une masse, c'est fixer cette constante arbitraire en décrétant $V = 0$ en un point précis. Une fois ce choix fait, chaque nœud du circuit se voit attribuer un potentiel unique et bien défini, et toute tension entre deux points s'obtient simplement par différence de ces potentiels.

**Définition n°4 : Masse d'un circuit électrique****Remarque**

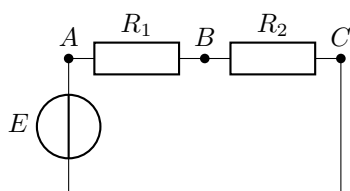
▷ La Terre est un fil profondément enfoui. La masse est généralement reliée au fil de Terre. Si ce n'est pas le cas, elle est reliée à une armature métallique d'un des appareils.



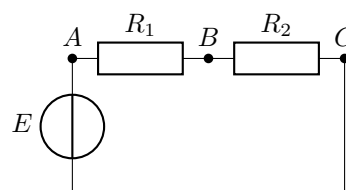


Attention !

Un problème apparaît quand on veut utiliser deux masses différentes dans un même montage — typiquement lorsqu’on branche plusieurs voies d’un oscilloscope sur des points différents d’un circuit. En interne, les pinces de masse de toutes les voies d’un oscilloscope sont reliées entre elles (et souvent à la terre via le secteur) : ce ne sont pas des points isolés, mais un seul et même conducteur. Si on place ces pinces de masse sur deux points du circuit qui ne sont pas censés être au même potentiel, alors ils sont reliés de force par un fil de résistance quasi- nulle : un court-circuit involontaire est créé entre ces deux points. Le circuit ainsi formé n’est alors plus le circuit que l’on voulait étudier — des courants parasites apparaissent, pouvant fausser complètement la mesure, voire endommager des composants. Ce genre de problème sera fréquemment observé en TP ! Il ne peut donc y avoir qu’une seule masse par circuit connecté : c’est une convention globale et unique, pas une propriété locale que l’on pourrait fixer indépendamment en plusieurs endroits.



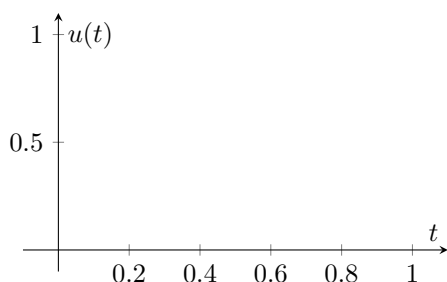
masse commune : pas de court-circuit



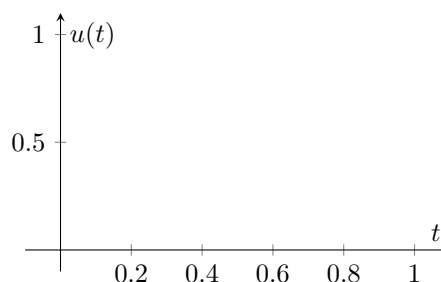
CH1- $\neq$ CH2- : R_2 court-circuité !

▷ Voici ce que l'on observerait à l'oscilloscope !

masses communes (correct)



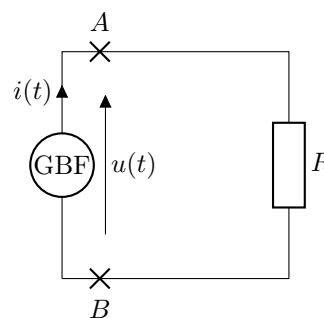
masses différentes (R_2 court-circuité)



II. ARQS et lois de Kirchhoff

II. 1 - Qu'est-ce que l'ARQS ?

▷ Cette notion est **FONDAMENTALE**.

[illegible]

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

**Propriété n°5 : Approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)****Remarque**

Lorsque l'ARQS est valable, la charge électrique comprise entre deux sections quelconques d'un fil ne varie pas au cours du temps. On dit que la portion de fil entre les deux sections ne stocke pas de charge. ♥

**Application n°1 : ARQS validée ou invalidée ?**

- Q 1.** L'électronique interne d'un téléphone de taille $\ell \simeq 10$ cm met en jeu des fréquences de l'ordre de 100 kHz. Peut-elle être analysée dans l'ARQS ?
- Q 2.** Jusqu'à quelle distance d'une centrale le réseau électrique peut-il être traité dans l'ARQS ?

II. 2 - Loi des nœuds



Propriété n°6 : Loi des nœuds (LDN) - 1ère loi de Kirchhoff



Démonstration :

II. 3 - Loi des mailles

▷ Avant de s'attaquer à la loi des mailles, il convient de repréciser certaines notions de vocabulaire.

♥ Définition n°5 : Rappels de vocabulaire en électrocinétique (collège et classe de 2nde)

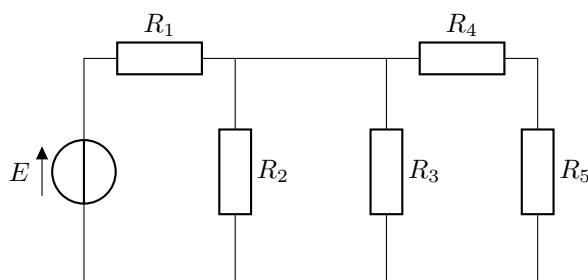
- On appelle **dipôle** un composant électrique connecté au reste du circuit par deux bornes.
- On appelle **branche** un ensemble de dipôles montés bout à bout entre deux nœuds consécutifs.
- On appelle **maille** un ensemble de branches formant une boucle fermée.
- Deux dipôles appartenant à une même branche sont dits montés en **série**.
- Deux dipôles dont les bornes sont connectées aux deux mêmes nœuds sont dits montés en **parallèle** ou en **dérivation**.

📎 Remarque

▷ Précisons quelques notions sur le dipôle électrocinétique.

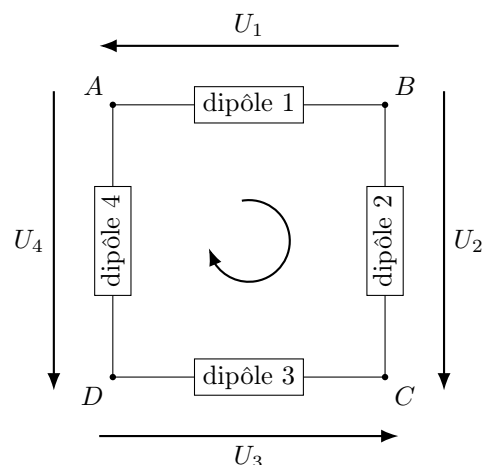
- On appelle **caractéristique** d'un dipôle la courbe représentant les variations de l'intensité le traversant en fonction de la tension à ses bornes : $i = f(u)$. Tout point sur cette courbe correspond à un couple (i, u) atteignable pour ce dipôle.
- Un dipôle sera dit **actif** si sa caractéristique ne passe pas par l'origine.
- Un dipôle sera dit **passif** si sa caractéristique passe par l'origine.
- Un dipôle sera dit **linéaire** si sa caractéristique est une droite.

🔧 Application n°2 : Analyser un circuit électrique



- Q 1. Repasser en bleu une branche du circuit contenant deux dipôles.
- Q 2. Repasser en rouge et en noir deux mailles différentes auxquelles la branche précédente appartient.
- Q 3. Indiquer sur le schéma le nœud A commun aux résistances R_1 et R_2 . Lister les dipôles connectés au nœud A.
- Q 4. Les résistances R_4 et R_5 sont-elles montées en série ? Même question pour les résistances R_1 et R_2 .
- Q 5. Les résistances R_2 et R_3 sont-elles montées en parallèle ? Même question pour les résistances R_3 et R_5 .

♥ Propriété n°7 : Loi d'additivité des tensions


Propriété n°8 : Loi des mailles (LDM) - 2ème loi de Kirchhoff

Démonstration :

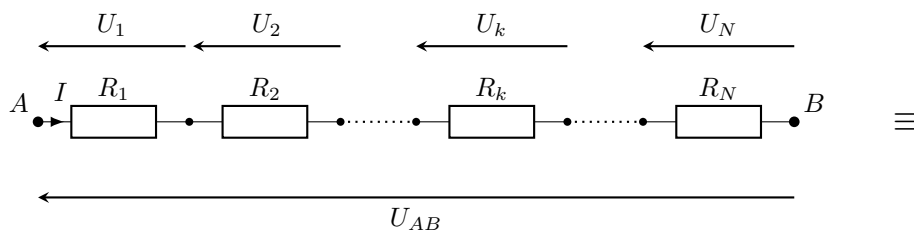
▷ En utilisant la formule d'additivité des tensions, on a d'une part : $U_1 + U_2 + U_3 = U_{AB} + U_{AD} + U_{DC} = U_{BC}$.
D'autre part, $U_2 = U_{BC}$, donc $U_2 = U_1 + U_3 + U_4$. Ceci est conforme à l'orientation de la maille.

III. Association de dipôles dans les circuits électriques

III. 1 - Résistances en série


Propriété n°9 : Résistance équivalente à une association de résistances en série

▷ Considérons une association de N résistances placées en série sur une même branche. Ces résistances sont parcourues par un courant électrique d'intensité I . On peut montrer que ce montage est équivalent à une résistance que l'on notera R_{eq} .



Pour un tel montage, on a :

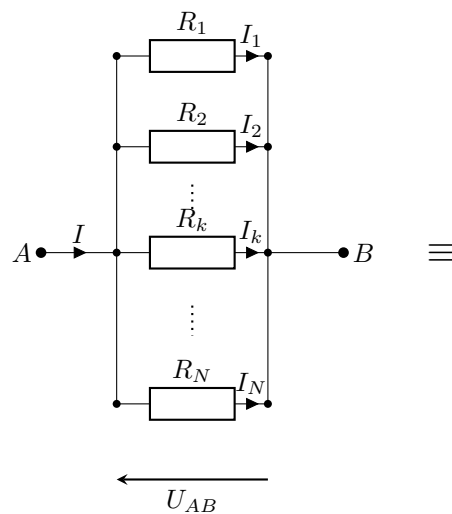

Démonstration :

.....
.....

III. 2 - Résistances en parallèle

♥ Propriété n°10 : Résistance équivalente à une association de résistances en parallèle

▷ Considérons une association de N résistances placées en parallèle. Ces résistances sont soumises à une même tension U_{AB} . On peut montrer que ce montage est équivalent à une résistance que l'on notera R_{eq} .



Pour un tel montage, on a :

🍃 Démonstration :

III. 3 - Ponts diviseurs

III. 3. a) Pont diviseur de tension



Propriété n°11 : Pont diviseur de tension

▷ Le pont diviseur de tension permet de **diminuer** la valeur d'une tension entre des résistances en série parcourues par un **même courant**. La tension se distribue proportionnellement sur les résistances.



Démonstration :

**Remarque**

▷ Ce résultat très important en électrocinétique sera utilisé de façon récurrente dans les prochains chapitres. Je vous invite donc à y prêter une attention particulière. Ce résultat peut se généraliser de la façon suivante : quand des résistances $R_1, R_2, \dots, R_k, \dots, R_N$ sont montées en série, la tension U_k aux bords de la résistance R_k est reliée à la tension U aux bornes de l'ensemble des N résistances par la relation ♥ :

$$U_k = \frac{R_k}{\sum_{i=1}^N R_i} U.$$

III. 3. b) Pont diviseur de courant**Définition n°6 : Conductance (rappel de Terminale Spé)**

▷ La conductance G est l'inverse d'une résistance : $G = \frac{1}{R}$. G s'exprime en SIEMENS (S) et on a naturellement :
 $1 \text{ S} = 1 \Omega^{-1}$.

**Propriété n°12 : Pont diviseur de courant**

▷ Le pont diviseur de courant permet de **diviser** un courant entre des résistances montées en parallèle.

**Démonstration :**

.....

.....

.....

.....

.....

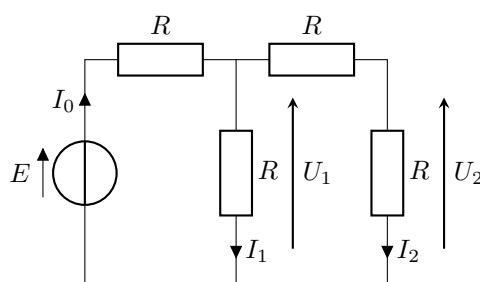
Remarque

Ce résultat précédent peut se généraliser : quand des résistances $R_1, R_2, \dots, R_k, \dots, R_N$ sont montées en parallèle, l'intensité I_k traversant la résistance R_k est reliée à l'intensité I en amont des N résistances par la relation ♥ :

$$I_k = \frac{1/R_k}{\sum_{i=1}^N 1/R_i} I \Leftrightarrow I_k = \frac{G_k}{\sum_{i=1}^N G_i} I$$

Application n°3 : Étude d'un circuit

▷ On considère le circuit ci-dessous alimenté par un générateur de tension idéale tel que $E = 5 \text{ V}$. Chaque conducteur ohmique a pour résistance $R = 150 \Omega$.



Q 1. Établir l'expression de U_2 en fonction de E . Faire l'application numérique.

Indication : On pourra d'abord exprimer U_2 en fonction de U_1 , puis U_1 en fonction de E .

Q 2. Déterminer l'intensité du courant I_0 en fonction de R et E . Faire l'application numérique.

III. 4 - Résistance d'entrée et de sortie d'un dipôle électrique

▷ Certains appareils compliqués, comme un GBF, un oscilloscope ou un multimètre, se branchent sur un circuit électrique par deux fils comme un dipôle ordinaire. Du point de vue du circuit, un tel appareil peut se comporter comme un **dipôle actif** (cas du GBF) ou un **dipôle passif** (cas de l'oscilloscope ou du multimètre). La connaissance de sa résistance de sortie dans le premier cas, ou de sa résistance d'entrée, dans le second cas, permet de prévoir l'influence de l'appareil sur le circuit. Les valeurs de ces grandeurs sont précises dans les notices fournies par les constructeurs.

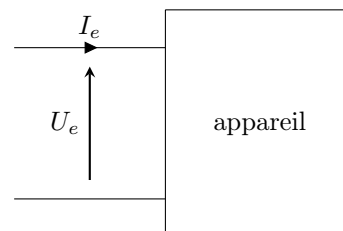
Définition n°7 : Résistance d'entrée d'un dipôle passif

▷ Un appareil se comportant vis-à-vis du circuit comme un dipôle passif (c'est-à-dire qui recueille un signal délivré par le circuit) est caractérisé par sa résistance d'entrée, définie de la manière suivante :

$$R_e = \frac{U_e}{I_e}$$

où :

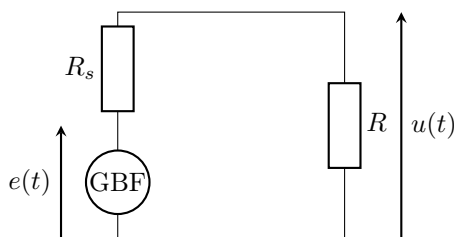
- U_e est la tension entre les fils de connexion de l'appareil,
- I_e est l'intensité du courant dans les fils de connexion de l'appareil.

**Définition n°8 : Résistance de sortie d'un dipôle actif**

▷ Un appareil se comportant vis-à-vis du circuit comme un dipôle actif (prenons ici un GBF) comporte une résistance interne, appelée résistance de sortie, notée R_s . Pour un GBF usuel, $R_s \simeq 50 \Omega$.

Application n°4 : Influence des résistances d'entrée et de sortie des dipôles électriques

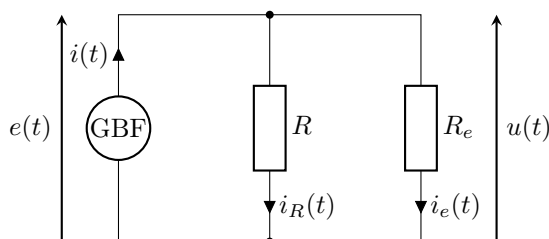
▷ On considère dans un premier temps un GBF délivrant une tension sinusoïdale : $e(t) = E_0 \cos(\omega t)$ avec $E_0 = 10 \text{ V}$. Ce GBF, non idéal, possède une résistance de sortie $R_s = 50 \Omega$. On branche aux bornes de ce GBF une résistance $R = 100 \Omega$. On souhaiterait que la tension aux bornes de la résistance vérifie $u(t) \simeq e(t)$.



Q 1. Déterminer l'expression de la tension $u(t)$ aux bornes de R .

Q 2. Calculer la valeur de l'amplitude de la tension aux bornes de R . Comment pourrait-on procéder pour avoir $u(t) \simeq e(t)$?

▷ On veut maintenant brancher un oscilloscope aux bornes d'une résistance R alimentée par un GBF supposé idéal (de résistance de sortie nulle donc). L'oscilloscope est modélisé par sa résistance d'entrée R_e .



Q 3. Déterminer l'expression de $i_e(t)$ en fonction de R , R_e et $i(t)$.

Q 4. Sachant que $R = 2\,000 \Omega$ et que $R_e = 1 \text{ M}\Omega$, la présence de l'oscilloscope perturbe-t-elle le circuit ?

III. 5 - Convention récepteur, convention générateur

▷ En électrocinétique, lorsque l'on représente la tension et l'intensité, il faut respecter deux conventions.

♥ Définition n°9 : Conventions récepteur, convention générateur

La distinction sur le plan physique entre un générateur et un récepteur se fait par des considérations énergétiques.

**Définition n°10 : Puissance électrique****Définition n°11 : Dipôle générateur/récepteur****III. 6 - Précisions sur les fils et les interrupteurs ouverts****Propriété n°13 : Caractéristique d'un fil****Propriété n°14 : Caractéristique d'un interrupteur ouvert****Attention !**

▷ La tension aux bornes d'un interrupteur ouvert n'est pas nulle ! Elle est en général inconnue, et il faut faire un calcul (loi des mailles) pour la déterminer.