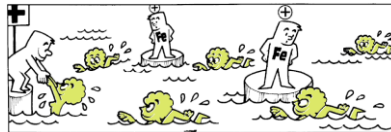
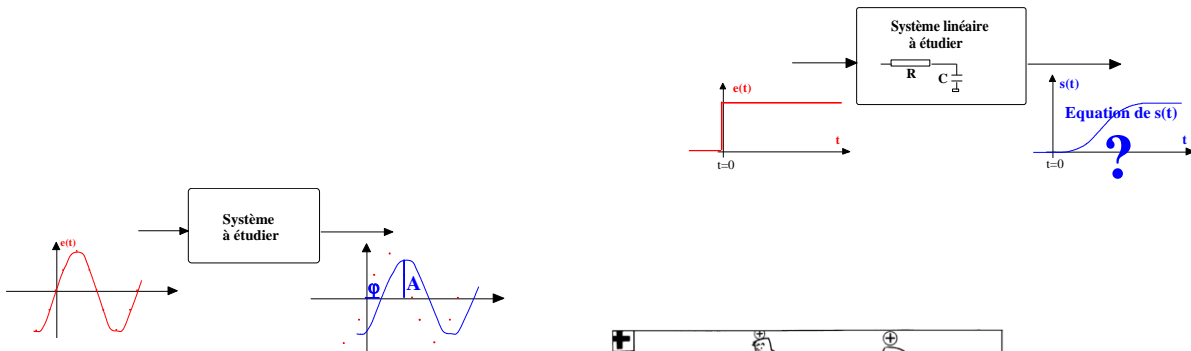


# SYSTEMES ELECTRONIQUES

## Module SE1



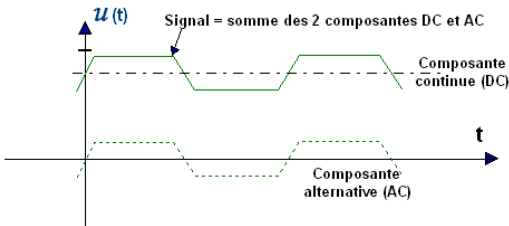
### INTRODUCTION A L'ELECTRICITE

#### Chapitre I : LES CIRCUITS ELCTRIQUES – LOIS GENERALES

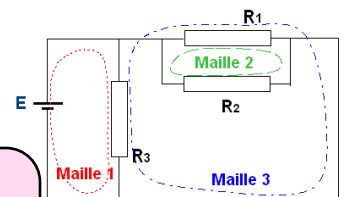
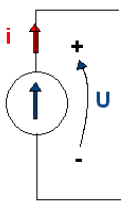
#### Chapitre II : ANALYSE INDICIELLE

#### Chapitre III : ANALYSE HARMONIQUE





# INTRODUCTION A L'ELECTRICITE



Chapitre I : INTRODUCTION A L'ELECTRICITE

Chapitre II : LES CIRCUITS ELCTRIQUES

TD

# **CHAPITRE 1**

## **INTRODUCTION A L'ELECTRICITE**

**JJ ROUSSEAU**

## SOMMAIRE

### I. STRUCTURE DE LA MATIERE

1.1 - Constitution d'un atome	3
1.2 - La mobilité des électrons	5
1.3 - Conducteur et isolant	6

### II. LE COURANT ELECTRIQUE

2.1 : Analogie avec l'eau	7
2.2 - Le courant électrique	8

### III. LA TENSION ou LA DIFFERENCE DE POTENTIEL

3.1 - Analogie avec l'eau	8
3.2 - La différence de potentiel	10

### IV. LES DIFFERENTES FORMES D'ONDES

4.1 - Régime continu	11
4.2 - Régime sinusoïdal	11
4.3 – Régime quelconque	12

### V. LES CIRCUITS ELECTRIQUES

5.1 - Les générateurs	15
5.2 - La résistance	16
5.3 - L'effet Joule	17
5.4 - Les circuits électriques	17

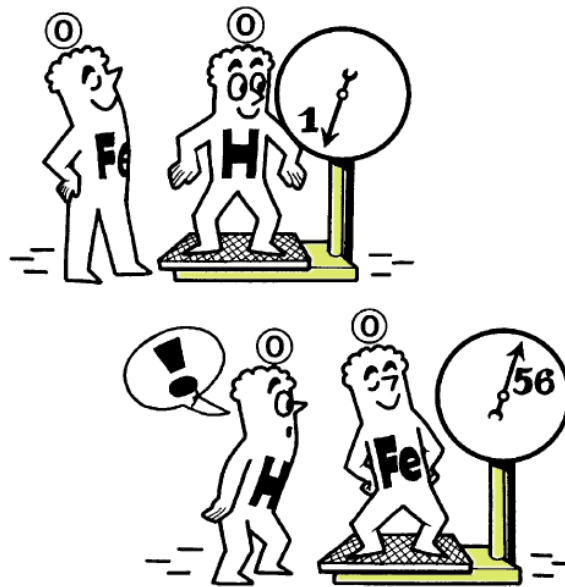


**Figures 1-9 22-23 et 25 de la Revue de l'INRS : L'ELECTRICITE. QU'EST-CE QUE L'ELECTRICITE ? ED-596 1991**

## I. STRUCTURE DE LA MATIERE

La matière qui nous entoure est constituée de particules infiniment petites et «indestructibles» : ce sont les atomes. Il existe autant d'atomes différents que d'éléments chimiques (fer, cuivre, oxygène, carbone, ...). Les atomes d'un même élément sont tous identiques. Par contre, les atomes de deux corps chimiques simples diffèrent par leurs tailles, leurs poids, leurs constitutions.

Exemple : l'Atome de fer a une masse 56 fois plus élevée que de l'atome d'hydrogène.



*Figure 1*

### 1.1 - Constitution d'un atome

On trouve à l'intérieur de chaque atome, trois types de particules élémentaires :

- Le proton
- Le neutron
- L'électron

Chaque particule possède des caractéristiques physiques et électriques précises :

- Le proton, de masse légèrement inférieure au neutron, est le «grain d'électricité» positif le plus petit.

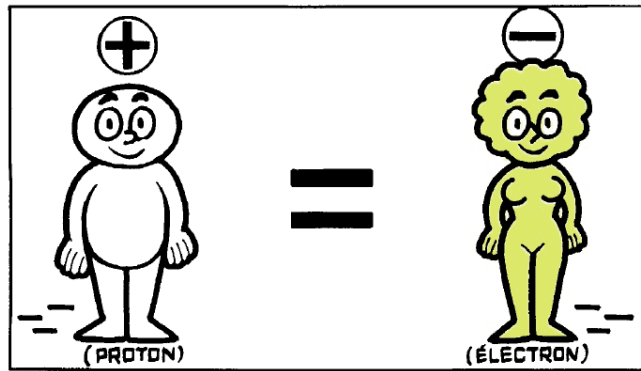


Figure 2

- Le neutron, électriquement neutre donc sans intérêt pour les phénomènes électriques, est la particule la plus lourde.
- L'électron de masse beaucoup plus petite que les particules précédentes constitue la charge électrique négative élémentaire. Sa charge est identique à celle du proton mais de signe opposé.

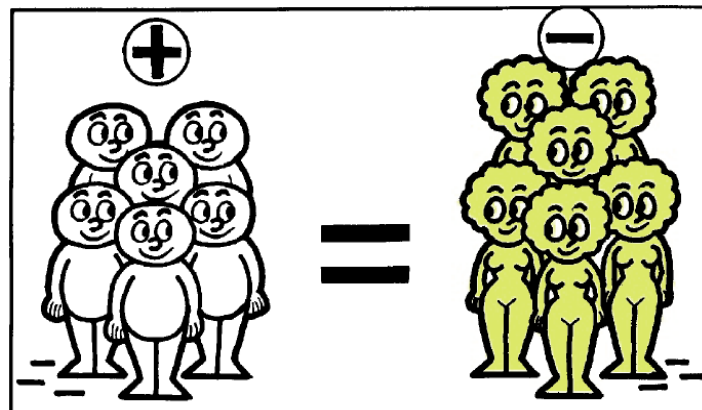
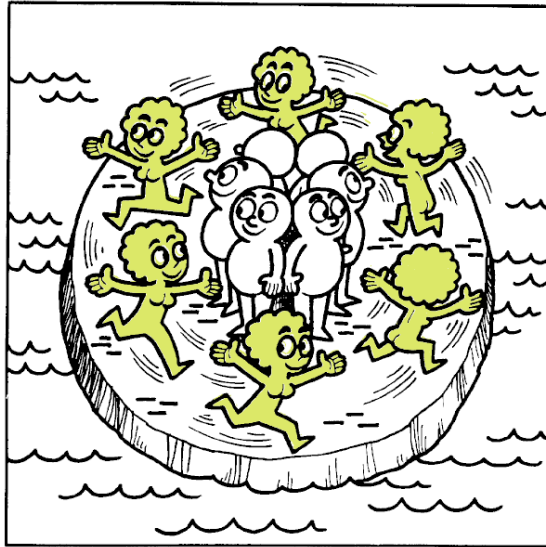


Figure 3

Il y a autant d'électrons que de protons dans un atome. L'organisation d'un atome répond à des lois bien précises :

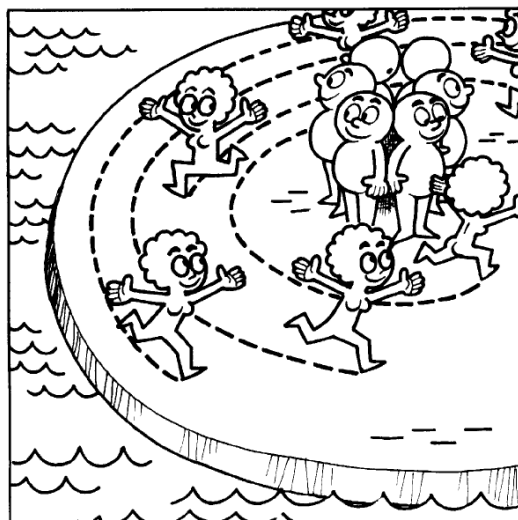
- Les protons et les neutrons constituent le noyau de l'atome. Ils sont indissociables.
- Les électrons tournent, dans une ronde perpétuelle, autour du noyau et sur eux-mêmes.



*Figure 4*

## 1.2 - La mobilité des électrons

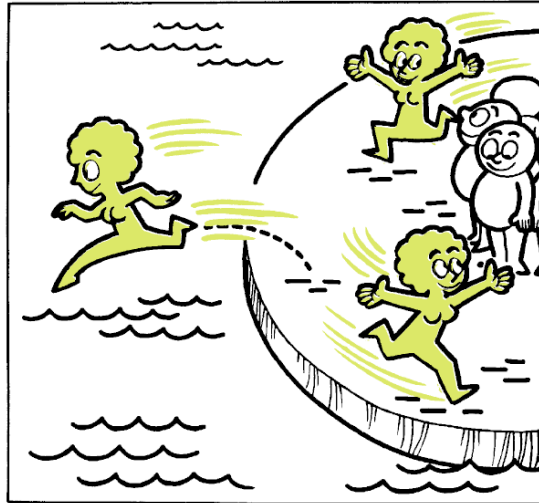
Lorsqu'il existe de nombreux électrons dans un atome, ceux-ci se répartissent sur des orbites. Les électrons les plus proches du noyau sont intimement liés au noyau. Par contre, ceux de la couche externe peuvent dans certaines conditions rompre leur liaison avec l'atome. Ils se séparent et deviennent électrons libres. Pour arracher un électron de l'atome, il faut fournir une énergie au moins égale à celle qui lie l'électron au noyau. Cette énergie peut prendre des formes diverses (thermique, mécanique, électrique, optique).



*Figure 5*

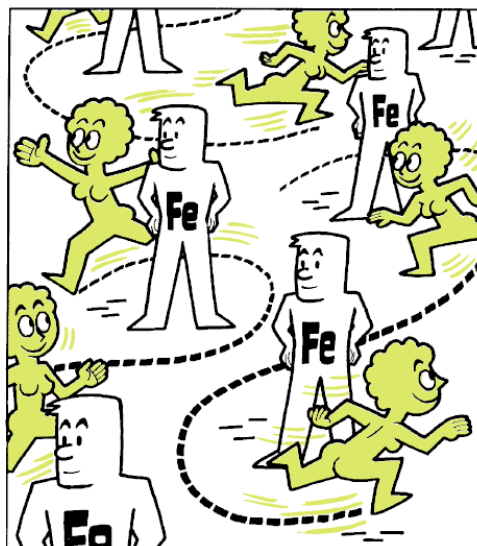
### 1.3 - Conducteur et isolant

Dans un matériau conducteur (cuivre, fer, aluminium, ...), certains électrons situés à la périphérie de l'atome font preuve d'une grande indépendance. Ils acquièrent facilement une liberté totale et se déplacent de façon aléatoire au milieu des atomes.



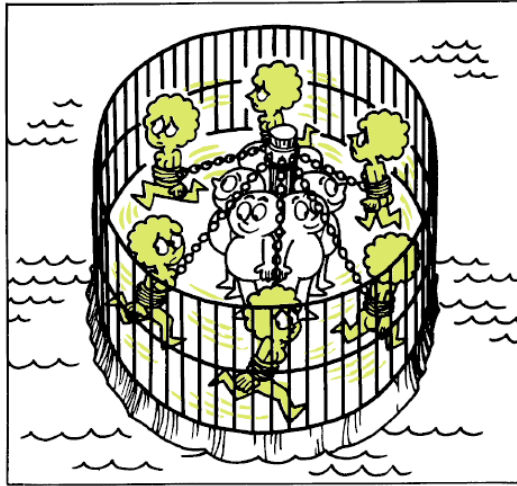
*Figure 6*

Leurs déplacements sont totalement désordonnés. Un conducteur est caractérisé par la présence d'électrons libres, c'est-à-dire capable de se déplacer pour donner naissance à un courant électrique.



*Figure 7*

Par contre, dans les matériaux isolants (air, matières plastiques, ...), la force d'attraction entre les électrons et le noyau est trop importante pour qu'un électron puisse s'éloigner de l'atome. Il est prisonnier. Aucun courant électrique ne pourra circuler.



***Figure 8***

## **II. LE COURANT ELECTRIQUE**

### **2.1 Analogie avec l'eau**

L'eau est une source d'énergie depuis bien longtemps. Elle permet la mise en mouvement de systèmes mécaniques (moulin à eau, turbine pour la production d'électricité ...). Cette énergie est due à un déplacement (chute d'un torrent en montagne, flux et reflux de l'océan, écoulement de l'eau dans une rivière).

Dans une rivière, les molécules d'eau ne se déplacent pas toutes dans le même sens. Il existe des mouvements désordonnés (remous, tourbillons). On peut cependant ne considérer que le mouvement d'ensemble qui s'effectue dans une direction privilégiée.

L'énergie transmise au moulin, à la turbine sera d'autant plus importante que le mouvement de l'eau, que le courant sera élevé. Il est d'ailleurs possible de chiffrer l'importance du courant. On parle alors de débit que l'on exprime en mètre cube par seconde  $m^3/s$ .

$$\text{Débit} = \frac{\text{Quantité d'eau déplacée}}{\text{temps}}$$

## 2.1 - Le courant électrique

Il correspond à un déplacement de particules électriques dans un conducteur (mouvement de l'eau dans le lit d'une rivière). Nous avons vu au paragraphe précédent que les seules particules électriques susceptibles de se déplacer dans un solide sont les électrons.

Il ne peut y avoir courant électrique que s'il existe des électrons libres, donc uniquement dans les matériaux conducteurs.

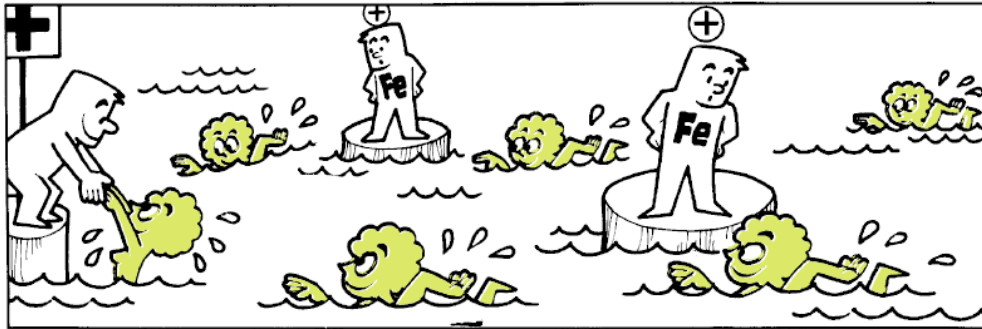


Figure 9

Comme nous l'avons fait pour l'eau, il est également possible de chiffrer l'importance du courant. On parle alors d'intensité.

$$\text{Intensité} = \frac{\text{Quantité d'électricité}}{\text{temps}} \quad I = \frac{Q}{t}$$

$$\text{Intensité} = \frac{\text{Nombre d'électrons} \times \text{Charge d'un électron}}{\text{temps}}$$

L'intensité **I** d'un courant s'exprime en ampère (A).

La quantité d'électricité en coulomb (C), le temps en seconde (s).

Une intensité de 1A correspond au déplacement d'une charge électrique de un coulomb pendant une seconde.

$$1\text{C} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ charge d'un électron} \quad \text{Charge d'un électron} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

### III. LA TENSION OU LA DIFFERENCE DE POTENTIEL

#### 3.1 - Analogie avec l'eau

##### 3.1.1 - L'eau en équilibre

Si l'on réunit par une conduite deux réservoirs de telle façon que les niveaux soient identiques, il n'y aura pas d'écoulement d'un réservoir à l'autre quelle que soit l'altitude à laquelle sont situés ces réservoirs.

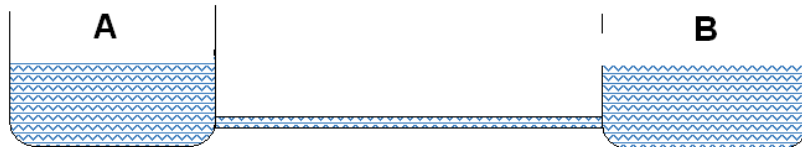


Figure 10

##### 3.1.2 - Niveaux différents

Supposons que les deux plans d'eau soient à des niveaux différents. L'eau contenu dans le réservoir le plus élevé (A) s'écoulera dans le réservoir le plus bas (B), jusqu'à ce que les deux plans d'eau soient au même niveau (ou jusqu'à ce que le réservoir A soit vide).

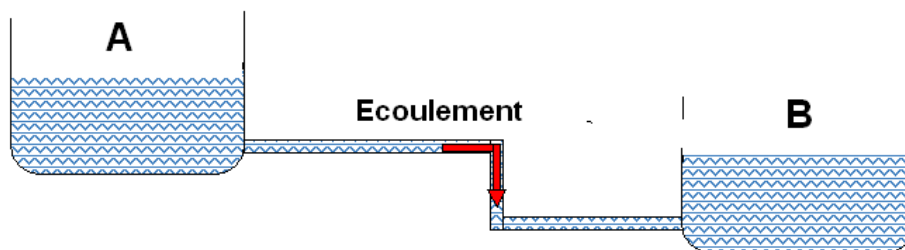


Figure 11

##### 3.1.3 - Obtention d'un courant permanent

Si nous voulons entretenir le courant, il faut alimenter en permanence le réservoir A. Une solution consiste à prélever au moyen d'une pompe l'eau du réservoir B et à la renvoyer dans le réservoir A.

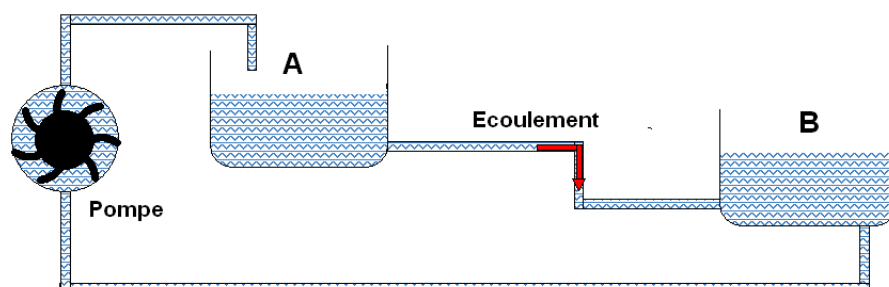


Figure 12

### 3.2 - La différence de potentiel

La nécessité d'avoir une différence de niveau pour obtenir un courant d'eau suggère que la circulation d'un courant électrique doit être due à une «différence de niveau électrique». On l'appelle différence de potentiel ou tension électrique. Il s'agit d'une grandeur définie entre deux points :

- La différence de potentiel (d.d.p.) entre les deux bornes d'une pile
- La tension aux bornes d'une batterie.

Cette grandeur se note U ou V et s'exprime en volt (V).

## IV. LES DIFFERENTS REGIMES

En électricité, en électronique on distingue 3 régimes différents :

- Régime continu
- Régime sinusoïdal pur
- Régime quelconque

Chaque régime est caractérisé par des notations différentes et les lois d'Ohm (loi reliant la tension aux bornes d'un composant au courant qui le traverse) utilisent des notations et des outils mathématiques différents.

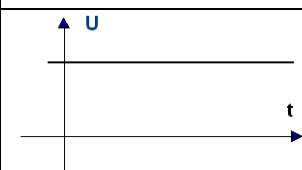
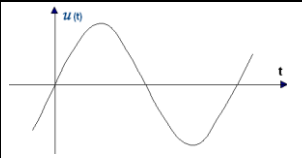
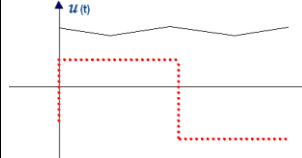
Type de régime	Notations	Allure des signaux
<b>Continu</b>	Majuscule U I	
<b>Sinus pur</b>	Notation de Fresnel = Vecteur = $\vec{U}$ $\vec{I}$ Notation complexe : $\underline{U}$ $\underline{I}$	
<b>Quelconque</b>	Minuscule $u(t) = u$ $i(t) = i$	

Figure 13

#### 4.1 – Régime continu

Le régime continu est caractérisé par des grandeurs constantes, indépendantes du temps comme le précise la figure ci-après :

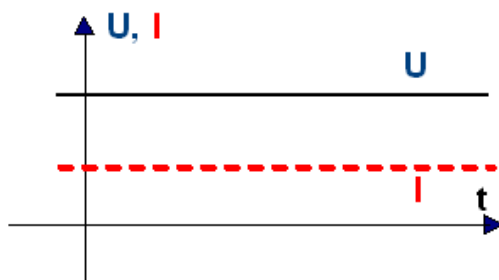


Figure 14

Il peut être obtenu à partir d'une pile, d'une batterie, d'une dynamo.

#### 4.2 - Régime sinusoïdal pur

C'est la forme d'onde délivrée par le réseau EDF. On l'obtient à partir d'alternateurs. Il s'agit d'un signal dont l'amplitude varie en fonction du temps, mais de façon sinusoïdale et répétitive. On dit qu'il est périodique. La *période*  $T$  du réseau EDF est  $T = 20$  ms. En une seconde, on obtient 50 périodes ce qui correspond à la fréquence du réseau. La *fréquence*  $F$  d'un signal périodique est le nombre de fois qu'il se reproduit en une seconde, son unité est le Hertz (Hz). La relation liant période et fréquence est donnée ci-dessous :

$$f = \frac{1}{T} \quad f \text{ en Hertz (Hz) et } T \text{ en seconde (s)}$$

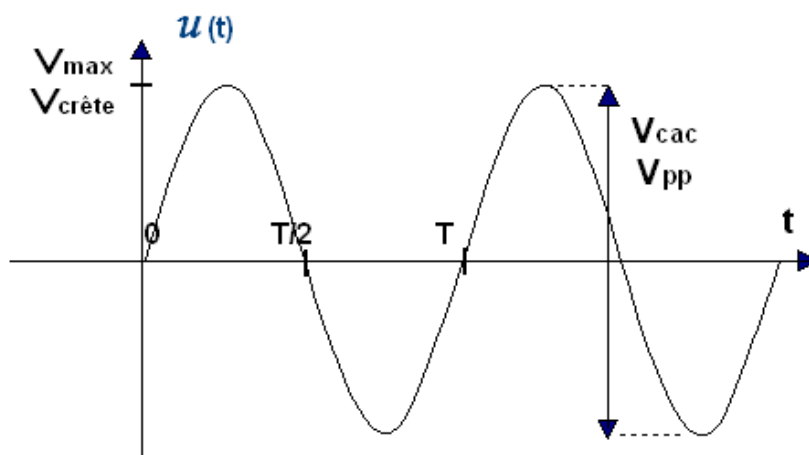


Figure 15

On définit également d'autres grandeurs :

- La valeur maximale se nomme amplitude ( $V_{Max}$ ) ou valeur crête ( $V_c$ ). L'amplitude du réseau domestique vaut  $V_{Max} = 325V$ .

- La valeur crête à crête (ou pic à pic) :  $V_{cac}$

- La valeur efficace d'un signal (courant ou tension) est la valeur que devrait avoir un signal continu, pour dissiper dans la même résistance la même puissance. En régime sinusoïdal, la valeur efficace est égale à la valeur maximale (l'amplitude) divisée par  $\sqrt{2}$ .

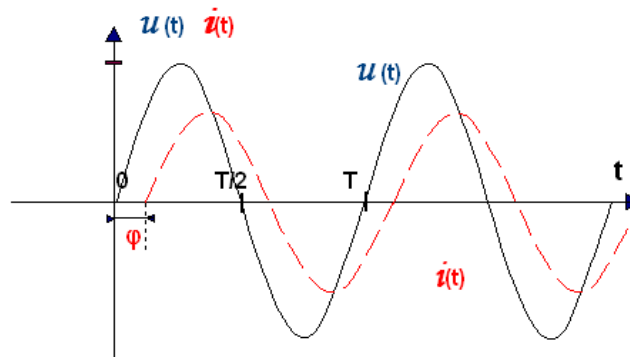
Pour le réseau EDF la valeur efficace est 230V et la valeur crête est  $\sqrt{2} \cdot 230 = 325V$ .

- la phase du signal sinusoïdal : D'une façon générale une fonction sinusoïdale a pour l'expression :  $u(t) = U_M \cdot \sin(\omega t + \varphi)$  où

-  $U_M$  représente l'amplitude

-  $\varphi$  la phase (en radian : rd)

-  $\omega$  la pulsation ( $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  en rd/s et  $f$  en Hz)

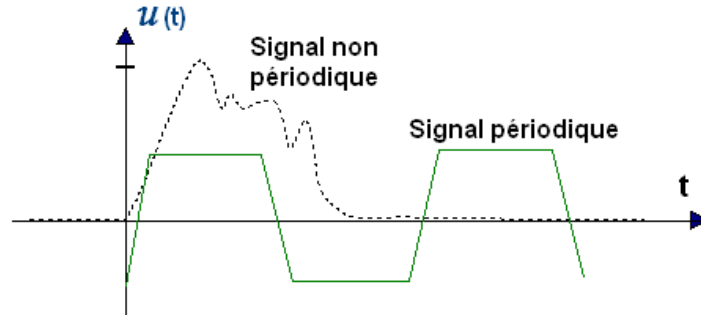


**Figure 16**

Sur la figure ci-dessus on peut observer que la phase de la tension est égale à 0, tandis que la phase du courant est d'environ  $45^\circ$ .

### 4.3 – Régimes quelconques

Tous les régimes qui ne sont ni continus ni sinusoïdaux sont classés comme régimes quelconques. On distingue les régimes périodiques et les régimes non périodiques comme illustrés sur la figure suivante :



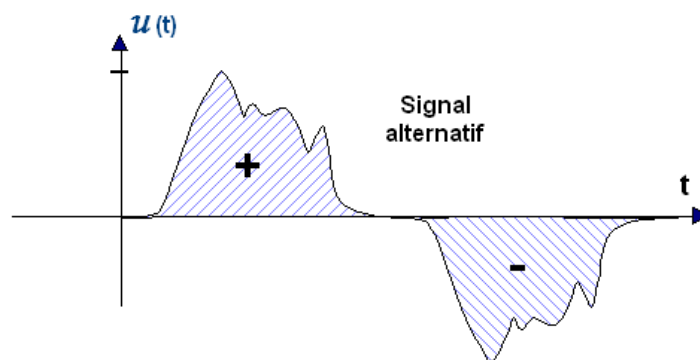
**Figure 17**

Parmi les régimes quelconques il convient de préciser quelques particularités :

- Signal alternatif
- Composante continue et composante alternative
- Grandeur (courant/tension) unidirectionnelle

*Signal alternatif*

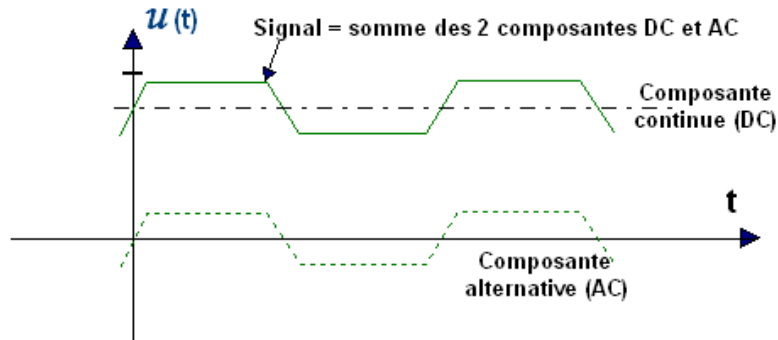
Un signal alternatif est un signal dont la valeur moyenne est nulle comme illustré figure 18 ci-dessous ; les deux aires hachurées + et - sont identiques en surface, la valeur moyenne est donc nulle.



**Figure 18**

*Composante continue et composante alternative*

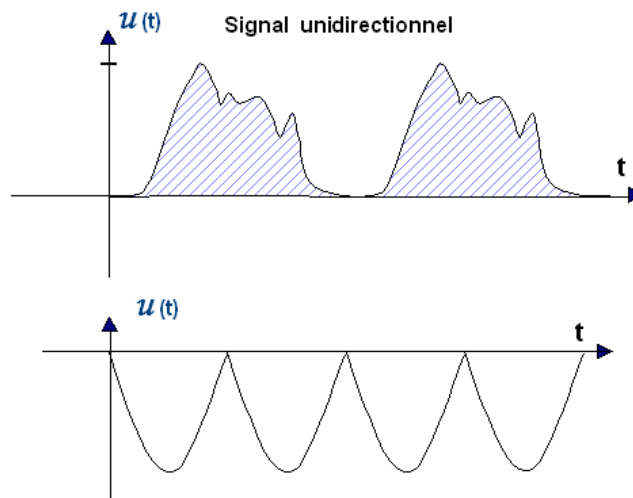
La figure ci-après précise les notions de composante continue et composante alternative. Le signal en trait plein correspond à la somme de 2 signaux, l'un constant correspondant à la valeur moyenne (composante continue), l'autre correspondant à la composante alternative : la somme des 2 signaux en traits pointillés correspond au signal en trait plein.



**Figure 19**

### *Grandeur (courant/tension) unidirectionnelle*

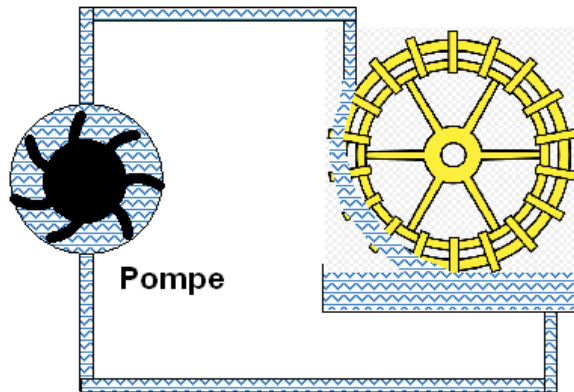
La figure 20 montre diverses grandeurs unidirectionnelles (toujours positives ou toujours négatives, la valeur moyenne est dans le premier cas positive et négative pour le signal redressé double alternance (demi-sinusoïde).



**Figure 20**

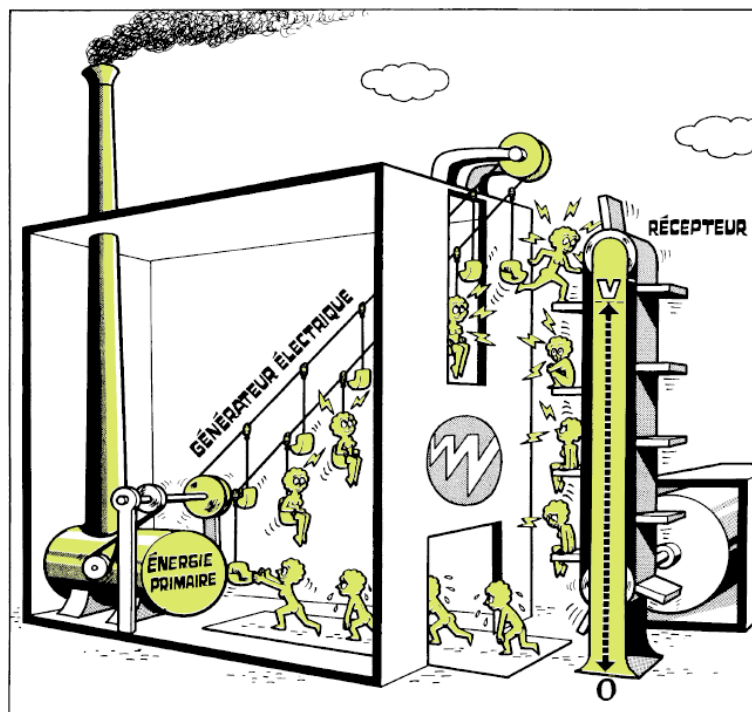
## **V. LES CIRCUITS ELECTRIQUES**

Le dispositif de la figure 21 est constitué d'une pompe ayant pour fonction de faire circuler l'eau, de tuyaux assurant la conduite de l'eau d'un endroit à une autre en présentant le moins de pertes possible, d'un récepteur (une roue à aube) présentant une certaine résistance au déplacement de l'eau. Cette roue assure l'entraînement en rotation d'un moulin.



**Figure 21**

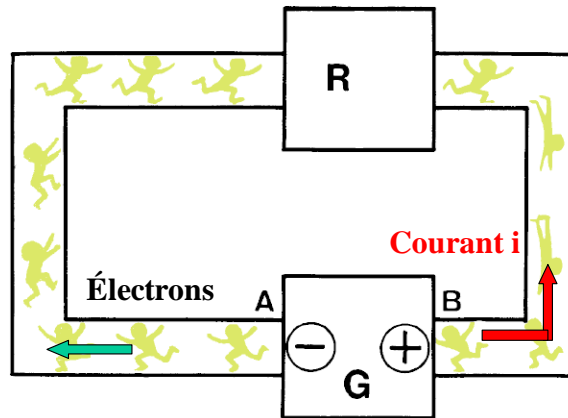
Il en est de même pour un circuit électrique qui sera également constitué d'un générateur (une pompe à électrons), de fils conducteurs et d'un récepteur qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique, thermique, optique ...



**Figure 22**

### 5.1 - Les générateurs

Pour créer un courant dans un conducteur, il faut provoquer un déplacement d'électrons. Ce déplacement est obtenu au moyen d'un générateur. Celui-ci se comporte comme une pompe à électrons.



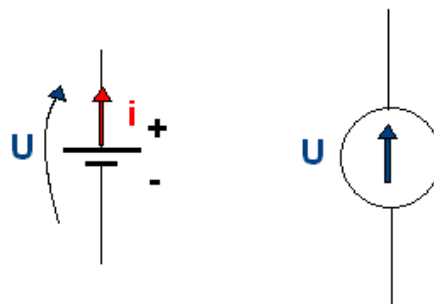
**Figure 23**

On lui donne également le nom de force électromotrice (f.e.m) : *force qui met les électrons en mouvement.*

Les électrons entrent par le pôle + du générateur et sortent par le pôle -.

Par convention, on a choisi un sens arbitraire du courant en sens inverse de celui des électrons.

Il existe différents types de générateurs : pile, batterie, dynamo, alternateur, ... le symbole d'un générateur est donné figure 24 ci-après :



**Figure 24**

## 5.2 - La résistance

### 5.2.1 - Analogie avec l'eau

Dans une rivière, dans une canalisation, le déplacement de l'eau est freiné par des obstacles (pierres, tronc d'arbres, ...), par un rétrécissement de la conduite. Plus la résistance offerte au passage de l'eau sera élevée, plus le débit sera faible. Il peut même être interrompu si la canalisation est bouchée.

### 5.2.2 - La résistance électrique

Lors du déplacement des électrons libres, dans un matériau conducteur, les électrons ne se déplacent pas aussi facilement qu'ils le souhaiteraient. Ils butent et se heurtent contre les atomes du matériau. Leur progression est désordonnée, chaotique. Le milieu dans lequel ils se déplacent offre une résistance plus ou moins grande. Un bon conducteur tel que le cuivre s'oppose très peu au déplacement des électrons : sa résistance est petite. Par contre, un isolant offre une résistance élevée au passage du courant.

Pour exprimer l'importance de cette opposition au passage du courant, on définit une grandeur : la résistance électrique que l'on note  $R$  et dont l'unité est l'Ohm ( $\Omega$ ).

La résistance  $R$  est proportionnelle :

- à la longueur  $l$  du conducteur
- à la résistivité  $\rho$  qui caractérise l'opposition plus ou moins grande d'un matériau à conduire le courant électrique.
- et inversement proportionnelle à sa section  $S$  (plus la section est grande, moins la résistance est élevée).

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad R (\Omega) \quad l (m) \quad S (m^2) \quad \rho (\Omega.m)$$

### 5 3 - L'effet Joule

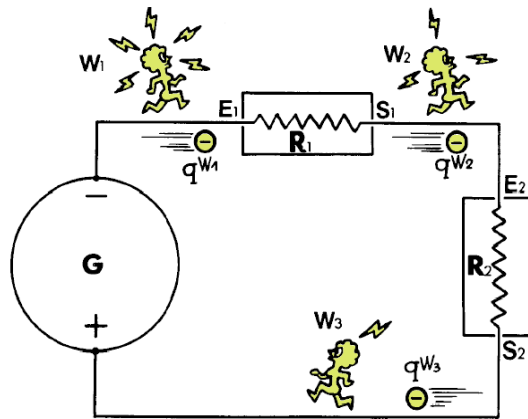
En mécanique, les chocs, les frottements produisent de la chaleur (les freins d'un véhicule par exemple). Le dégagement de chaleur, la transformation d'énergie électrique en énergie thermique est appelée effet Joule. La puissance dégagée sous forme de chaleur dépend de la résistance  $R$  et de l'intensité du courant  $I$ , la puissance a pour expression :

$$P = R \cdot I^2$$

**P puissance en Watt (W)    R résistance en Ohm ( $\Omega$ )    I Intensité en Ampère (A)**

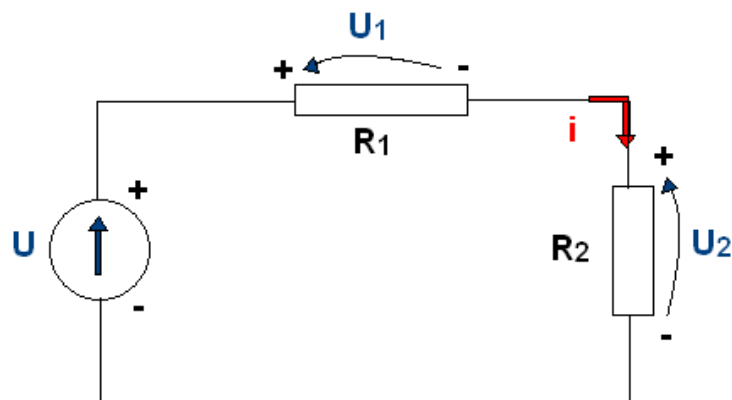
### 5.4 - Les circuits électriques

Un circuit électrique est constitué au moins d'un générateur et d'un récepteur. Ces éléments sont reliés entre eux par des fils conducteurs dont on néglige la résistance. Le courant circulant dans le circuit dépend de la valeur et de la f.e.m du générateur et de la résistance du récepteur.



**Figure 25**

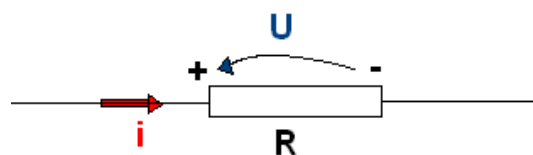
D'un point de vue schéma électrique on représentera la figure précédente par le schéma ci-après : Les éléments étant en série le courant est le même dans le générateur et dans les 2 résistances, en revanche les tensions aux bornes de ces 3 éléments sont différentes.



**Figure 26**

La loi d'ohm : il s'agit de la loi exprimant la différence de potentiel aux bornes d'un élément, en fonction de sa résistance et de l'intensité du courant le traversant.

$$U = R \cdot I$$



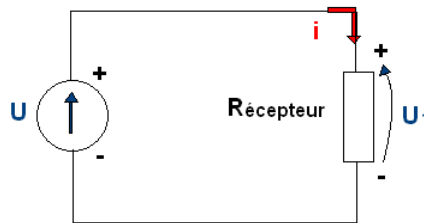
**Figure 27**

*Nota : Les figures 1-9 22-23 et 25 sont tirées de la revue «L'ELECTRICITE» éditée par l'Institut National de Recherche et de Sécurité.*

## CHAP II : LES CIRCUITS ELECTRIQUES

### I : RAPPEL «LES CIRCUITS ELECTRIQUES »

Un circuit électrique est composé au moins d'un générateur et d'un récepteur reliés par des fils classiquement considérés comme idéaux (c'est à dire sans pertes).



**Figure 1 : Circuit électrique**

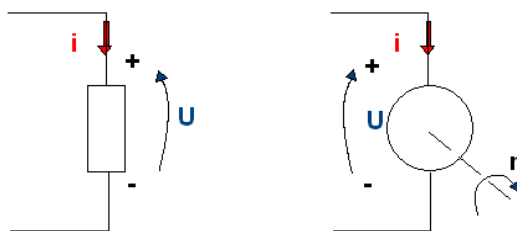
Dans ce chapitre nous nous intéressons aux générateurs, à un seul type de récepteur (la résistance) et aux lois générales des circuits électriques.

### II : RECEPTEUR - LA RESISTANCE

Un récepteur est un dispositif, un composant ... qui reçoit de l'énergie électrique et la transforme généralement en un autre type d'énergie (par exemple un moteur électrique transforme l'énergie électrique reçue en énergie mécanique, un radiateur électrique transforme l'énergie reçue en chaleur ...).

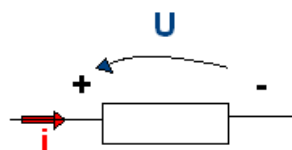
#### Symbole et convention

Par convention, le courant entre par le pôle + du récepteur et sort par le pôle -.



**Figure 2 : Convention récepteur**

En électronique on utilise très souvent des résistances pour limiter le courant dans un circuit. Le symbole de ce composant est donné à la figure suivante avec la convention récepteur.



**Figure 3 : Symbole de la résistance et convention récepteur**

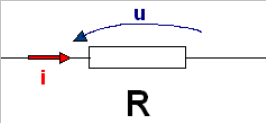
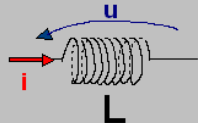
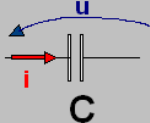
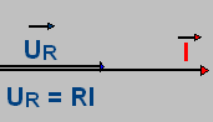
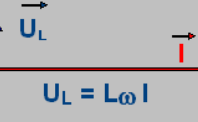
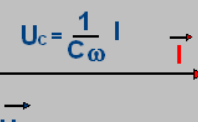
### Loi d'Ohm

La loi d'Ohm est la loi qui relie la tension **U** aux bornes d'un dipôle au courant **I** traversant ce dipôle :

**Loi d'Ohm = tension en fonction du courant**

Classiquement on distingue 3 régimes différents : **Continu**, **Sinusoïdal pur** et **quelconque** (voir chapitre I) pour 3 composants différents : la **résistance**, l'**inductance** et le **condensateur**. Dans le cadre de ce chapitre nous ne nous intéresserons qu'à la résistance (l'inductance et le condensateur seront étudiés plus tard dans l'année, pour l'inductance voir le module Ener2 *Matériaux magnétiques – Inductances – Transformateurs*)

Le tableau ci-après résume ces différentes lois, seule la loi d'Ohm appliquée à la résistance est considérée dans ce chapitre (les cases grises seront vues au cours de l'année)

			
<p><b>Régime Continu</b></p> <p>Notation : majuscule grandeurs constantes, indépendantes du temps</p>	$U=RI$	$U=0 \forall I$	$I=0 \forall U$
<p><b>Régime sinus pur</b></p>			
<b>Complexe</b>	$\underline{U}_R = R \underline{I}$	$\underline{U}_L = j L \omega \underline{I}$	$\underline{U}_C = \frac{1}{j C \omega} \underline{I}$
<p><b>Régime quelconque</b></p> <p>Notation : minuscule signifiant grandeur en fonction du temps  <math>u = u(t)</math>      <math>i = i(t)</math></p>	$u_R = R \cdot i$	$u_L = L \frac{di}{dt}$	$u_C = \frac{1}{C} \int i \cdot dt + U_{C0}$ $i = C \frac{du_C}{dt}$

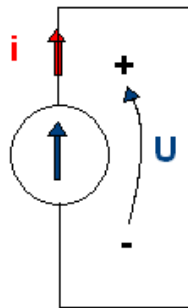
**Tableau 1 : Les lois d'Ohm**

### III : LES GENERATEURS

Un générateur a pour fonction de fournir l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement d'un circuit. Il peut prendre de nombreuses formes : alternateur de centrale, alternateur de véhicule, dynamo, batterie, pile, alimentation AC-DC ... Il transforme généralement une énergie (mécanique par exemple) en une énergie électrique (alternateur de voiture par exemple), mais il peut également adapter un niveau ... (alimentation AC-DC, alimentation DC-DC). Les générateurs fournissent des grandeurs continues ou alternatives d'amplitude très variable (réseau 230V-50Hz, alimentation 12V DC ...).

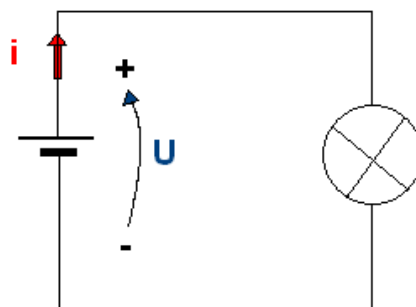
#### Symbole et convention

La figure 2 ci-après précise le symbole d'un générateur idéal (c'est à dire sans résistance interne).



**Figure 4** : Symbole et convention

En convention générateur le courant  $i$  sort par le pôle  $+$  du générateur. Par exemple pour une batterie alimentant les phares d'une voiture, le courant sortira par la borne  $+$  (borne rouge de la batterie) et se refermera par la borne  $-$  (borne noire) comme l'indique la figure ci-après.

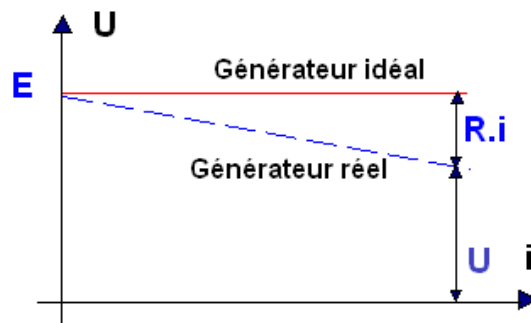


**Figure 5** : Batterie

### Loi d'Ohm

Les générateurs sont caractérisés par une loi reliant le courant fourni par le générateur à la tension à ses bornes, cette loi est appelé loi d'Ohm. Lorsque le générateur est idéal, c'est à dire sans résistance interne, sa tension est constante quel que soit le courant débité :

$$U = E = \text{cte}$$



**Figure 6 : Caractéristique d'un générateur**

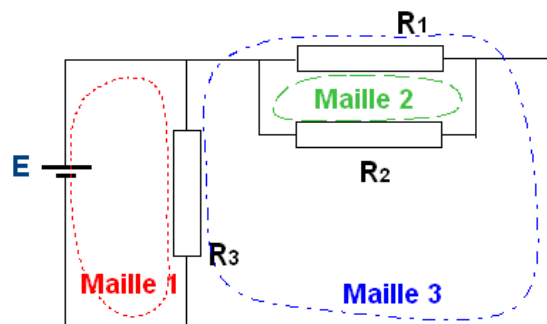
En revanche, le générateur réel voit sa tension décroître lorsque le courant fourni augmente :

$$U = E - R.i$$

## **IV : CIRCUITS SERIES ET LOI DES MAILLES**

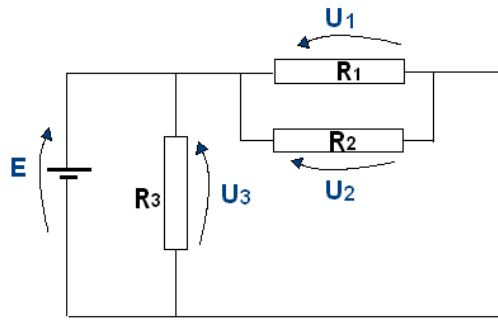
### Définitions

Une maille est constituée d'un ensemble d'éléments, de composants formant un circuit fermé. Sur la figure ci-dessous, la maille 1 est constituée de la fem E et de la résistance R<sub>3</sub>, la maille 2 des résistances R<sub>1</sub> et R<sub>2</sub> ...



**Figure 7 : Définition d'une maille**

La loi des mailles permet d'écrire une relation liant les différentes tensions d'une même maille. Sur la figure 8, on distingue 4 tensions fléchées de façon arbitraire (enfin presque !!)... Appliquer la loi des mailles va permettre d'établir les relations entre ces différentes grandeurs.



**Figure 8 : Mailles et tensions**

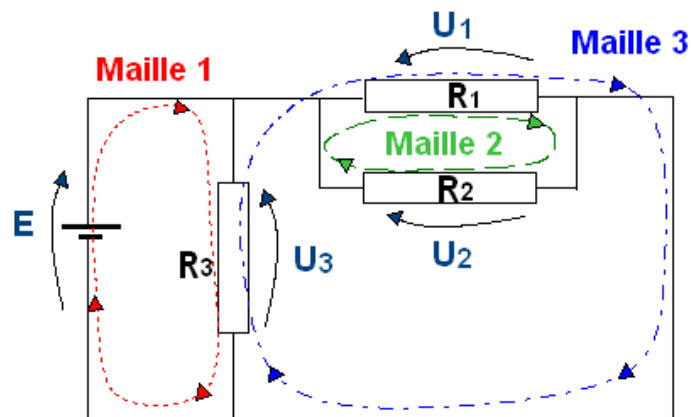
Comment appliquer la loi des mailles ?

- On choisit un sens de parcours arbitraire pour la maille (voir pointillés de la figure 9).
- En parcourant la maille dans le sens choisi on effectue la somme algébrique des tensions rencontrées que l'on affecte d'un signe **+** si le sens de parcours est le même que celui de la tension et d'un signe **-** dans le cas contraire. La somme des différentes tensions est égale à **0**. Dans ces conditions la loi des mailles s'écrit :

Pour la maille 1 :  $+ E - U_3 = 0 \Rightarrow E = U_3$

Pour la maille 2 :  $+ U_2 - U_1 = 0 \Rightarrow U_2 = U_1$

Pour la maille 3 :  $+ U_3 - U_1 = 0 \Rightarrow U_3 = U_1$

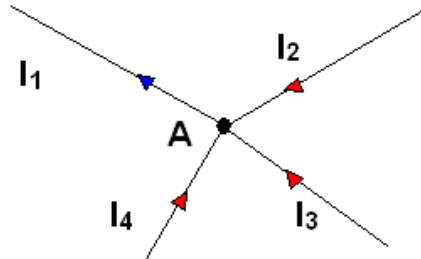


**Figure 9 : Loi des mailles**

## V : CIRCUITS PARALLELES ET LOI DES NŒUDS

### Définition

On appelle nœud un point où convergent plusieurs conducteurs comme l'illustre la figure ci-dessous.



**Figure 10 : Loi des nœuds**

Loi des nœuds : La somme des courants qui arrivent à un nœud est égale à la somme des courants qui en sortent.

Dans l'exemple de la figure 10 ci-dessus trois courants sont dirigés vers le point A ( $I_2$ ,  $I_3$  et  $I_4$ ), un seul en sort ( $I_1$ ). La loi des nœuds s'écrit donc :

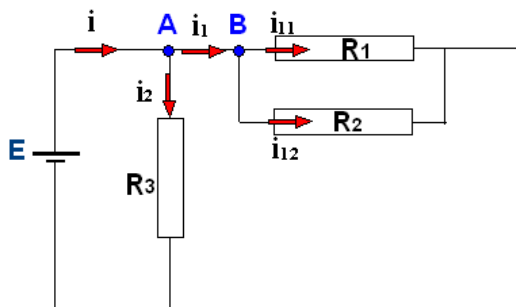
$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4$$

### Exemples :

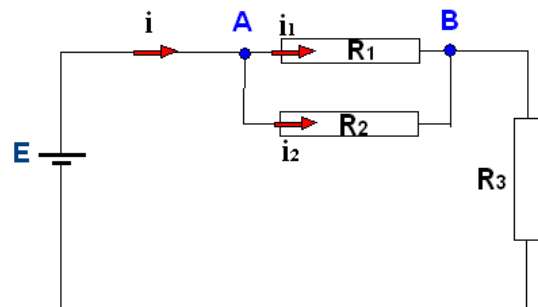
#### *Circuit a)*

La loi des nœuds au point A s'écrit :  $i = i_1 + i_2$

La loi des nœuds au point B s'écrit :  $i_1 = i_{11} + i_{12}$



*a)*



*b)*

**Figure 11 : Exemples d'application de la loi des nœuds**

#### *Circuit b)*

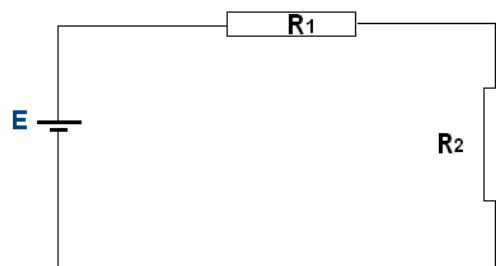
La loi des nœuds au point A s'écrit :  $i = i_1 + i_2$

## VI : EQUATION DES CIRCUITS ELECTRIQUES

L'objectif de ce paragraphe est de montrer à l'aide de quelques exemples simples comment mettre en œuvre la loi des mailles et la loi des nœuds pour déterminer la valeur des courants et des tensions dans un circuit électrique.

### 6-1 : Exemple 1 :

Considérons le circuit de la figure 12, constitué d'un générateur ( $E=10V$ ) et de 2 résistances en série  $R_1=10\Omega$  et  $R_2=20\Omega$ ).

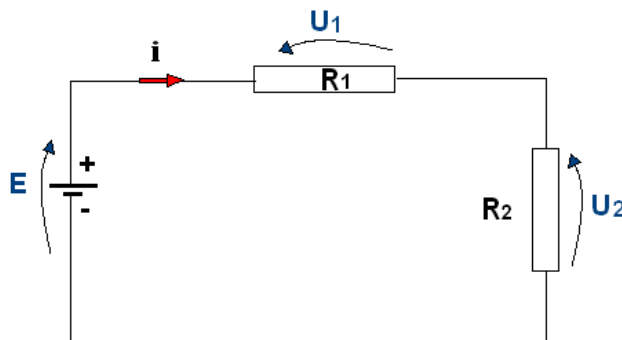


*Figure 12 : Exemple 1*

#### Etape 1 : Fléchage

La première étape consiste à fléchiser tensions et courants. On peut prendre des sens arbitraires mais il est préférable de respecter les sens réels s'ils sont connus et il **est indispensable** d'utiliser des couleurs :

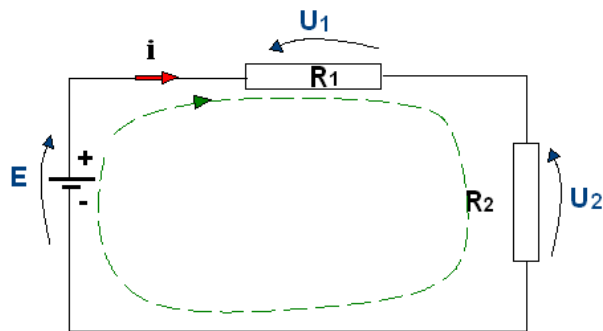
- Le courant (**en rouge**) est dessiné sur le conducteur (il circule dans le conducteur), la tension aux bornes du composant (**en bleu**).
- Les polarités du générateur étant connues, on flèche la tension  $E$  comme indiqué (la pointe de la flèche correspond au  $+$ ).
- Le courant  $i$  sort du pôle  $+$  du générateur (convention générateur).
- Pour les 2 résistances, on flèche les tensions conformément à la loi d'Ohm (le courant et tension sont en sens inverse = convention récepteur).



*Figure 13 : Exemple 1 - Fléchage*

Etape 2 : Loi des mailles

On applique la loi des mailles :  $E - U_1 - U_2 = 0$   $E = U_1 + U_2$  [1]



**Figure 14 : Exemple 1 – Loi des mailles**

Etape 3 : Loi d'Ohm

On applique la loi d'Ohm :  $U_1 = R_1 \cdot i$  [2]  $U_2 = R_2 \cdot i$  [3]

Etape 4 : Calcul

Finalement on obtient :  $E = R_1 \cdot i + R_2 \cdot i$

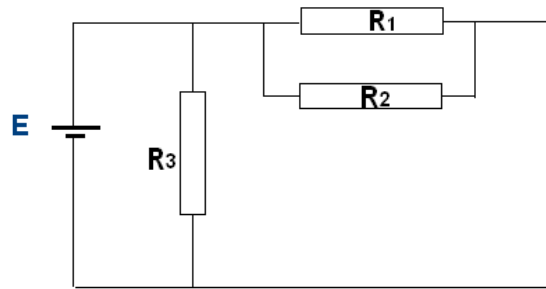
$$E = (R_1 + R_2) i \quad i = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

Connaissant  $R_1$ ,  $R_2$  et  $E$  on en déduit :

$$i : i = \frac{10}{10+20} = 0,33\text{A} \quad U_1 = 10 \cdot 0,33 = 3,3\text{V} \quad \text{et} \quad U_2 = 20 \cdot 0,33 = 6,6\text{V}$$

**6-2 : Exemple 2 :**

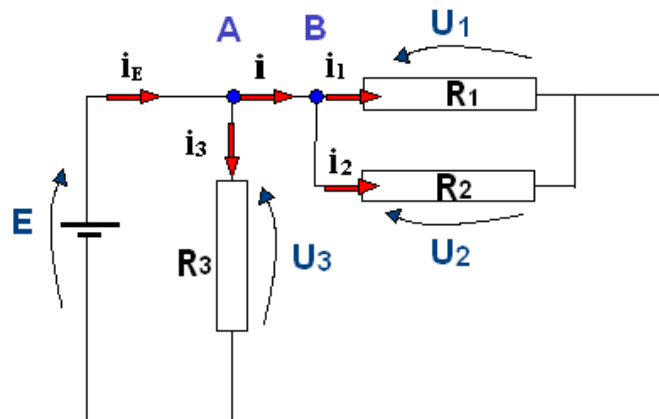
Soit le circuit de la figure 15, constitué d'un générateur ( $E=10\text{V}$ ) et de 3 résistances ( $R_1=20\Omega$ ,  $R_2=20\Omega$  et  $R_3=10\Omega$ ).



**Figure 15 : Exemple 2**

Etape 1 : Fléchage

Les courants sont fléchés en rouge, les tensions en bleu (sens des flèches conformement aux lois d'Ohm pour le générateur et pour les résistances)



**Figure 16 : Exemple 2 – Fléchage**

Etape 2 : Loi des mailles et loi des nœuds

Loi des mailles :

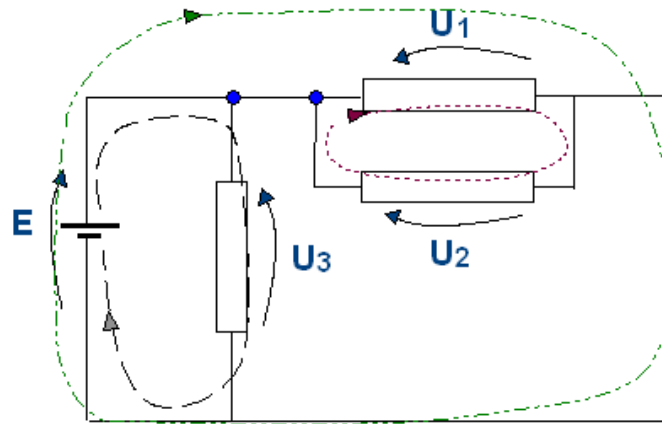
On distingue 3 mailles :

Maille 1 :  $+E - U_1 = 0$

Maille 2 :  $+U_2 - U_1 = 0$

Maille 3 :  $+E - U_3 = 0$

On en déduit :  $U_1 = U_2 = U_3 = E$

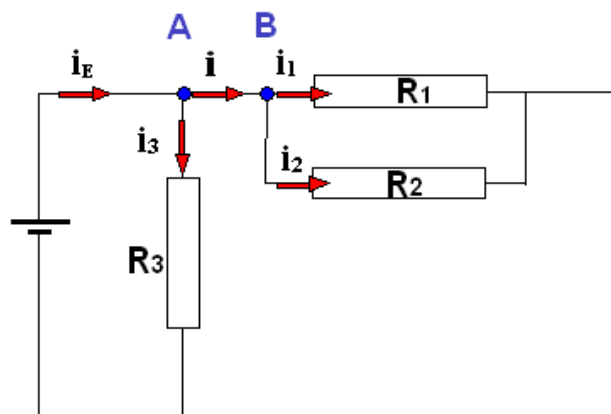


**Figure 17 : Lois des mailles**

Loi des nœuds :

Au nœud A :  $i_E = i + i_3$

Au nœud B :  $i = i_1 + i_2$



**Figure 18 : Lois des nœuds**

Etape 3 : Loi d'Ohm (voir figure 16)

$$U_1 = R_1 \cdot i_1$$

$$U_2 = R_2 \cdot i_2$$

$$U_3 = R_3 \cdot i_3$$

Etape 4 : Calcul

$$i_1 = U_1 / R_1 = E / R_1 = 10/20 = 0,5A$$

$$i_2 = U_2 / R_2 = E / R_2 = 10/20 = 0,5A$$

$$i_3 = U_3 / R_3 = E / R_3 = 10/10 = 1A$$

$$i = i_1 + i_2 = 0,5 + 0,5 = 1A$$

$$i_E = i + i_3 = 1 + 1 = 2A$$

## **TD 1 :Signaux :**

### **Forme d'onde, période, fréquence, amplitude, valeur crête, valeur moyenne, composante AC-DC, rapport cyclique**

#### **Ex 1 : Signal sinus : période, fréquence, amplitude.**

**1.1 :** Tracer sommairement (sur papier) un signal sinusoïdal de fréquence 1kHz et d'amplitude 2V et graduer vos axes.

**1.2 :** Visualiser à l'aide de Proteus ce signal, mesurer sa période, son amplitude crête à crête.

#### **Ex 2 : Différentes formes d'ondes**

##### **2.1 : Signal triangulaire**

- Tracer sommairement (sur papier) un signal triangulaire de période 10ms et d'amplitude crête à crête 2V et graduer vos axes.
- Déterminer la fréquence, l'amplitude du signal puis visualiser à l'aide de Proteus ce signal.

##### **2.2 : Signal carré**

- Tracer sommairement (sur papier) un signal carré de période 10ms et d'amplitude 2V, graduer vos axes.
- Vérifier à l'aide de Proteus ce signal.

##### **2.3 : Signal trapézoïdal**

- Visualiser à l'aide de Proteus un signal « carré » d'amplitude 2V, de fréquence 50Hz et présentant des temps de montée et de descente de 2ms

#### **Ex 3 : Composantes AC et DC – Valeur moyenne**

**3.1 :** Tracer 2 signaux l'un continu d'amplitude 2V, l'autre sinusoïdal d'amplitude 1V. En faire la somme

**3.2 :** Vérifier à l'aide de Proteus

#### **Ex 4 : Rapport cyclique**

- Visualiser à l'aide de Proteus un signal carré (fréquence 2kHz et d'amplitude 5V), puis faire varier la largeur en % (= rapport cyclique) de 1 à 99%.

**TD 2 :Circuits – Appareils de mesure - Lois générales**  
**Générateurs – Récepteur – Loi d’Ohm - Loi des mailles – Loi des nœuds**

**Ex 1 : Appareils de mesure.**

**1.1 : Ampèremètre**

Le réseau 230V EDF alimente une résistance de  $100\Omega$ . On souhaite mesurer le courant traversant la résistance.

- Faire le schéma du montage et calculer le courant circulant dans le circuit
- Vérifier à l’aide de Proteus

**1.2 : Voltmètre**

Le réseau 230V EDF alimente une résistance de  $39k\Omega$ . On souhaite mesurer la tension aux bornes de la résistance.

- Faire le schéma du montage donner la valeur de la tension aux bornes de R.
- Vérifier à l’aide de Proteus

**1.3 : Oscilloscope**

- Rappeler la définition pour un signal sinusoïdal des grandeurs suivantes: amplitude, fréquence, période
- Visualiser à l’oscilloscope (Proteus) un signal sinus d’amplitude 10V et de fréquence 100Hz.

**Ex 2 : Lois générales**

**2.1 : Loi des nœuds**

- Rappeler la loi des nœuds
- Une tension continue d’amplitude 10V alimente deux résistances en parallèle ( $R_1=100\Omega$  et  $R_2=50\Omega$ ). Faire le schéma de ce circuit.
- Calculer les courants  $I_1$  et  $I_2$  dans chacune des résistances, en déduire le courant débité par l’alimentation.
- Vérifier à l’aide de Proteus

**2.2 : Loi des mailles**

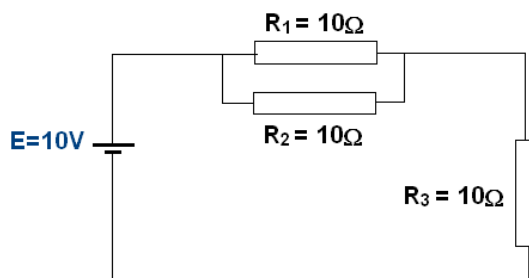
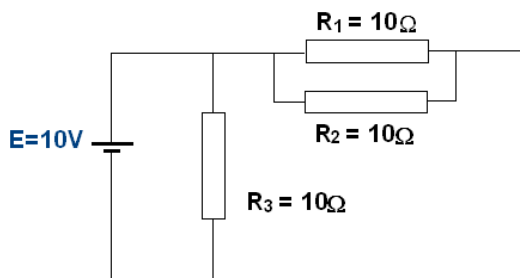
- Rappeler la loi des mailles
- Un générateur continu d’amplitude 20V alimente deux résistances en série ( $R_1=100\Omega$  et  $R_2=50\Omega$ ). Faire le schéma de ce circuit.

- Calculer le courant  $I$  circulant dans le circuit, en déduire la tension aux bornes des deux résistances. La loi des mailles est-elle vérifiée ?
- Vérifier à l'aide de Proteus

### Ex 3 : Exercices d'approfondissement

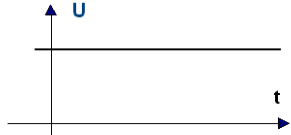
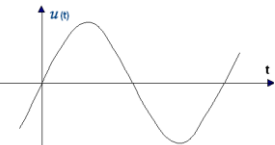
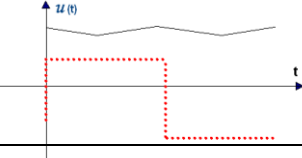
Si le temps le permet on pourra étudier les circuits ci-après.

- Le premier travail consistera à flécher et à nommer tensions et courants.
- Déterminer ensuite courants et tensions (en utilisant la loi des mailles, la loi des nœuds et la loi d'Ohm appliquée à une résistance).
- Vérifier à l'aide de Proteus.



## Notations

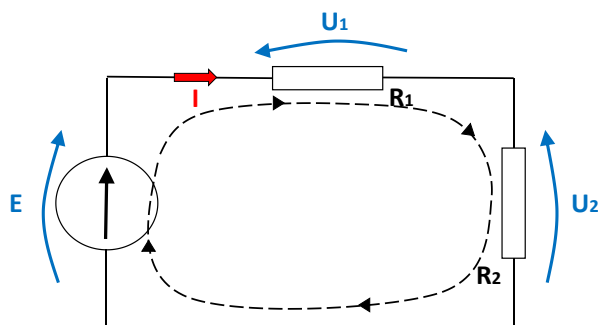
### Les régimes :

Type de régime	Notations	Allure des signaux
<b>Continu</b>	<b>Majuscule U I</b>	
<b>Sinus pur</b>	Notation de Fresnel = Vecteur = $\vec{U}$ $\vec{I}$ <b>Notation complexe : <math>\underline{U}</math> <math>\underline{I}</math></b>	
<b>Quelconque</b>	<b>Minuscule</b> $u(t) = u$ $i(t) = i$	

### Les lois des circuits :

Il **est indispensable** d'utiliser des couleurs :

- Le courant (**en rouge**) est dessiné sur le conducteur (il circule dans le conducteur),
- la tension aux bornes du composant (**en bleu** ou **en vert**).
- Pour la loi des mailles, on flèche la maille en pointillé (noir)

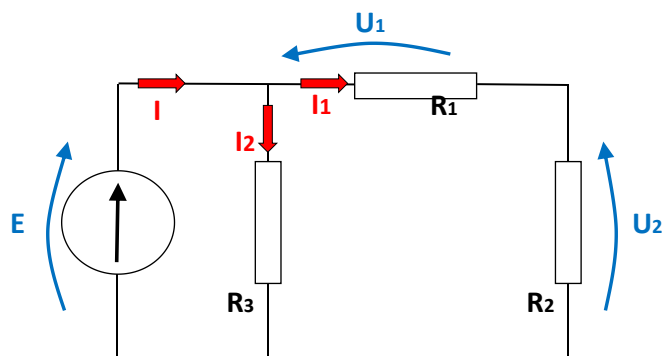


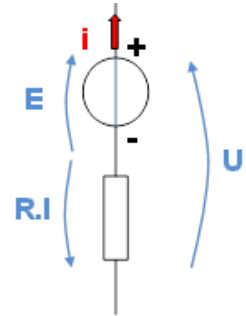
et de justifier la loi utilisée : **LdM** (loi des mailles) **LdN** (Loi des nœuds) **LΩ** (Loi d'Ohm)  
Ainsi la loi des mailles correspondra à une somme algébrique de grandeurs bleues (vertes)

**LdM :**  $+E - U_1 - U_2 = 0$

La loi des nœuds correspondra à une somme algébrique de grandeurs rouges :

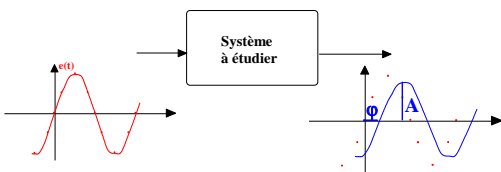
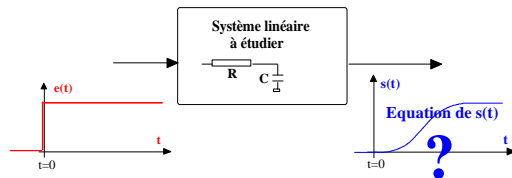
**LdN :**  $I = I_1 + I_2$





# SYSTEMES ELECTRONIQUES

## Module SE1



Chapitre I : LES CIRCUITS ELCTRIQUES – LOIS GENERALES

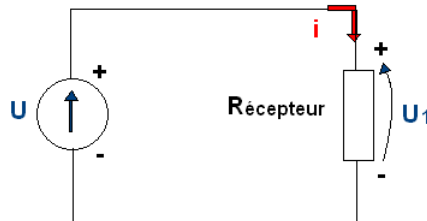
Chapitre II : ANALYSE INDICIELLE

Chapitre III : ANALYSE HARMONIQUE



## CHAP I : LES CIRCUITS ELECTRIQUES – LOIS GENERALES

Un circuit électrique est composé au moins d'un générateur et d'un récepteur reliés par des fils classiquement considérés comme idéaux (c'est à dire sans pertes).



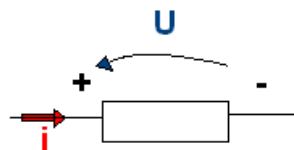
**Figure 1** : Circuit électrique

Dans ce chapitre nous nous intéressons aux composants passifs (résistance, condensateur, inductance), aux sources de tension et de courant, aux générateurs et récepteurs ainsi qu'aux lois générales des circuits électriques.

### I : LES COMPOSANTS PASSIFS

#### 1.1 La résistance

En électronique on utilise très souvent des résistances pour limiter le courant dans un circuit. Il existe de très nombreux types de résistances réalisées avec des technologies très différentes (résistances bobinées, résistances à couche de carbone, résistance à couches métalliques) qui chacune présente des caractéristiques différentes (puissance, dimensions géométriques, comportement en fréquence...). Le symbole de ce composant est donné à la figure suivante avec la convention récepteur.



**Figure 2** : Symbole de la résistance et convention récepteur

#### Loi d'Ohm

La loi d'Ohm est la loi qui relie la tension  $U$  aux bornes d'un dipôle au courant  $I$  traversant ce dipôle : Suivant le régime (continu, sinusoïdal pur, quelconque) les notations et les outils mathématiques sont différents (voir tableau 1 ci-après).

#### Lois d'association

Association en série  $R_{\text{éq}} = R_1 + R_2$

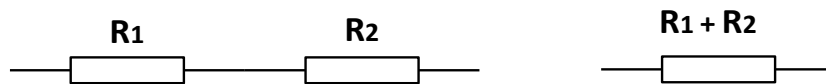


Fig 3 : La résistance équivalente aux 2 résistances  $R_1$  et  $R_2$  en série est égale à la somme  $R_{\text{éq}} = R_1 + R_2$

Association en parallèle

La loi d'association des résistances en parallèle est donnée par  $\frac{1}{R_{\text{éq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$ . Pour 2 résistances on obtient également la formule  $R_{\text{éq}} = \frac{\text{Produit}}{\text{Somme}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

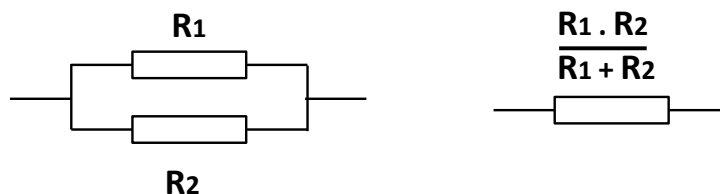


Fig 3 : Résistances en parallèle

## 1.2 Le condensateur

Un condensateur est constitué de deux armatures conductrices séparées par un isolant. Sa propriété principale est de pouvoir stocker des charges électriques sur ses armatures. La quantité de charges stockées  $Q$  (Coulomb : C) est proportionnelle à la tension appliquée  $U$  (Volt V) et à la capacité  $C$  (Farad F) du condensateur  $Q = C.U$ . La figure ci-dessous illustre la grande diversité de condensateurs rencontrés, ces derniers présentant des propriétés très différentes selon leurs technologies de fabrication.

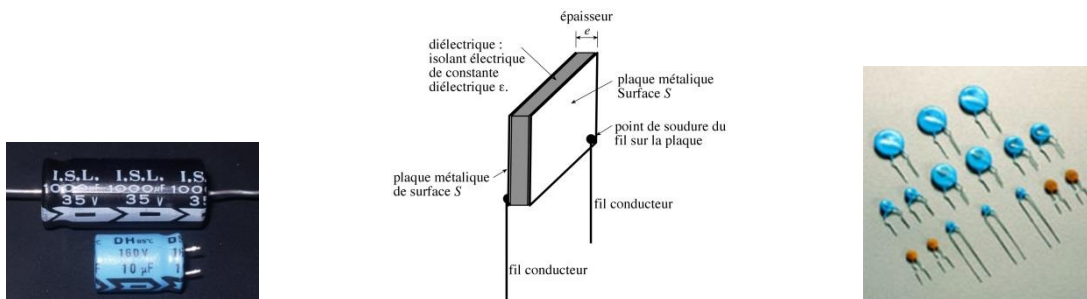
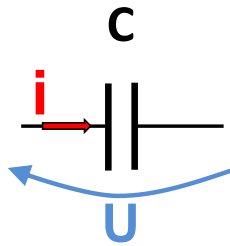


Figure 4 : Différents types de condensateur.

Le symbole de ce composant est donné à la figure suivante avec la convention récepteur.



**Figure 5 :** Symbole du condensateur et notation en convention récepteur

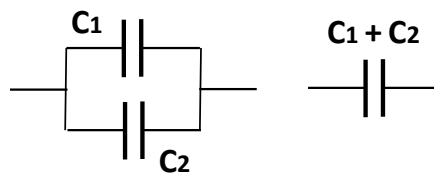
Loi d'Ohm

Les lois d'Ohm en régime sinus pur et en régime quelconque (reliant courant circulant dans le composant à la tension aux bornes du composant) seront vues aux chapitres suivants.

Lois d'association

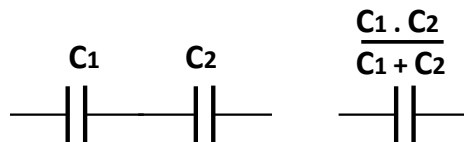
Condensateurs en parallèle :

$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2$$



**Figure 6 :** Association en parallèle

Condensateurs en série

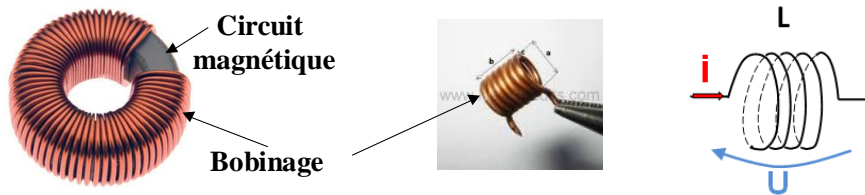


**Figure 7 :** Association en série

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$$

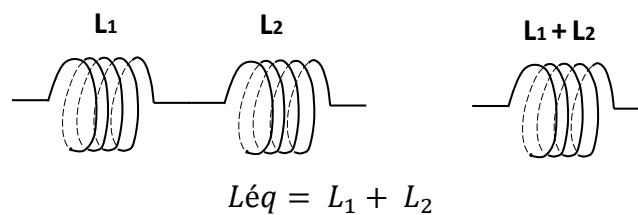
### 1.3 L'inductance

Il s'agit d'un composant bobiné, classiquement un fil de cuivre enroulé sur un matériau magnétique, composant qui sera plus particulièrement étudié au second semestre (module « Conversions d'énergie »). Une inductance comporte un bobinage réalisé sur un circuit magnétique ou non magnétique. Parfois l'inductance est à air, c'est à dire sans matériau magnétique. Ce composant sera étudié au module Ener2.

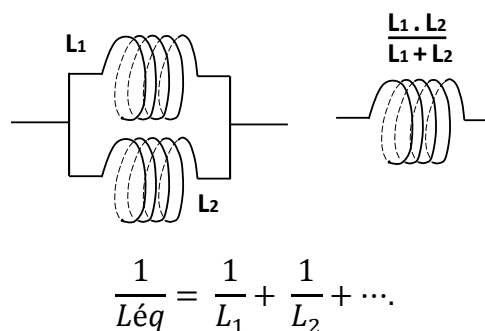


**Figure 8 :** Constitution d'une inductance et symbole

Le symbole de l'inductance pur est donné figure 8.



**Figure 9 :** Association en série

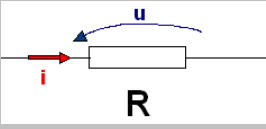
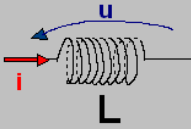
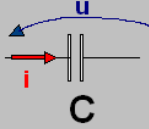
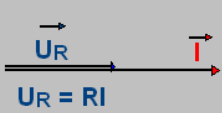
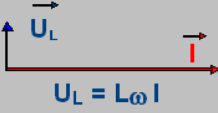
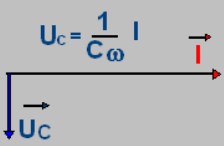


**Figure 10 :** Association en parallèle

## 1.4 Les lois d'Ohm

Classiquement on distingue 3 régimes différents : **Continu**, **Sinusoïdal pur** et **quelconque** pour 3 composants passifs différents : la **résistance**, l'**inductance** et le **condensateur**.

Le tableau ci-après résume ces différentes lois, seule la loi d'Ohm appliquée à la résistance est considérée dans ce paragraphe (les cases grises seront vues dans les chapitres suivants)

			
<p><b>Régime Continu</b></p> <p>Notation : majuscule grandeurs constantes, indépendantes du temps</p>	$U=RI$	$U=0 \quad \forall I$	$I=0 \quad \forall U$
<p><b>Régime sinusoïdal pur</b></p> <p><b>Fresnel</b></p>			
<b>Complexe</b>	$\underline{U}_R = R \underline{I}$	$\underline{U}_L = j L \omega \underline{I}$	$\underline{U}_C = \frac{1}{j C \omega} \underline{I}$
<p><b>Régime quelconque</b></p> <p>Notation : minuscule signifiant grandeur en fonction du temps  <math>u = u(t)</math>      <math>i = i(t)</math></p>	$u_R = R \cdot i$	$u_L = L \frac{di}{dt}$	$u_C = \frac{1}{C} \int i \cdot dt + U_{C0}$ $i = C \frac{du_C}{dt}$

*Tableau 1 : Les lois d'Ohm*

## II : LES GENERATEURS ET RECEPTEURS

Un générateur a pour fonction de fournir l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement d'un circuit. Il peut prendre de nombreuses formes : alternateur de centrale,

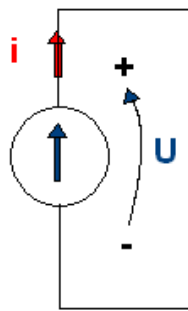
alternateur de véhicule, dynamo, batterie, pile, alimentation AC-DC ... Il transforme généralement une énergie (mécanique par exemple) en une énergie électrique (alternateur de voiture par exemple), mais il peut également adapter un niveau ... (alimentation AC-DC, alimentation DC-DC). Les générateurs fournissent des grandeurs continues ou alternatives d'amplitude très variable (réseau 230V-50Hz, alimentation 12V DC ...). Nous nous intéressons uniquement, dans ce qui suit, aux générateurs délivrant des signaux continus.

## 2.1 Générateur de tension

Il s'agit d'un composant, d'un circuit qui délivre dans le cas idéal une tension constante quel que soit le courant délivré. Ce générateur idéal est également appelé source de tension.

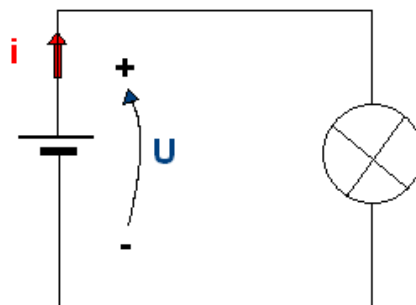
### Symbole et convention

La figure 11 ci-après précise le symbole d'un générateur idéal (c'est à dire sans résistance interne).



**Figure 11** : Symbole et convention

En convention générateur le courant  $i$  sort par le pôle  $+$  du générateur. Par exemple pour une batterie alimentant les phares d'une voiture, le courant sortira par la borne  $+$  (borne rouge de la batterie) et se refermera par la borne  $-$  (borne noire) comme l'indique la figure ci-après.

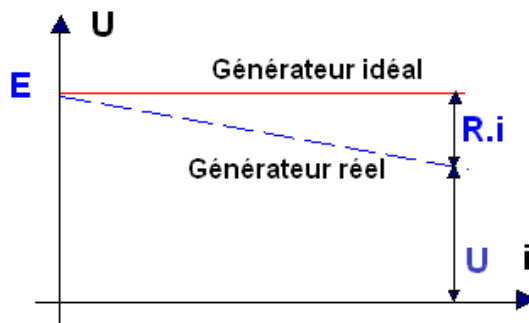


**Figure 12** : Batterie

## Loi d'Ohm

Les générateurs sont caractérisés par une loi reliant le courant fourni par le générateur à la tension à ses bornes, cette loi est appelé loi d'Ohm. Lorsque le générateur est idéal, c'est à dire sans résistance interne, sa tension est constante quel que soit le courant débité :

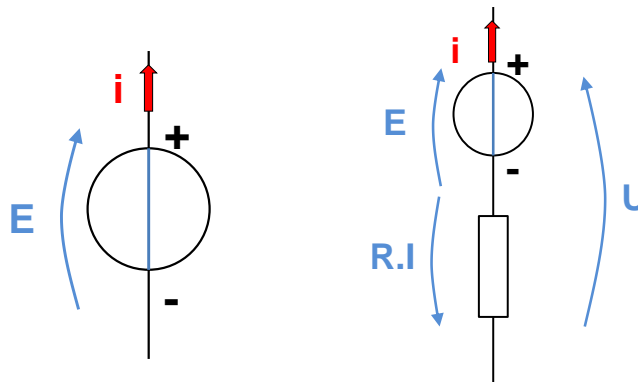
$$U = E = \text{cte}$$



**Figure 13** : Caractéristique d'un générateur

En revanche, le générateur réel présente une résistance interne non nulle et voit sa tension décroître lorsque le courant fourni augmente :

$$U = E - R.I$$



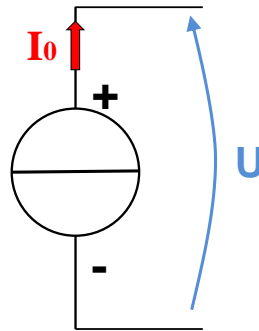
**Figure 14** : Générateur de tension idéal et réel

## 2.2 Générateur de courant

Il s'agit d'un composant, d'un circuit qui délivre dans le cas idéal un courant constant quelle que soit la tension à ses bornes. Ce générateur idéal est également appelé source de courant.

### Symbole et convention

La figure 15 ci-après précise le symbole d'un générateur idéal (c'est à dire avec une résistance interne infinie).

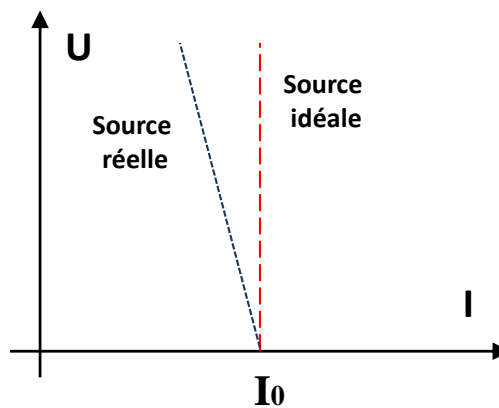


**Figure 15** : Symbole et convention

### Loi d'Ohm

Lorsque le générateur est idéal, c'est à dire avec une résistance interne infinie, le courant délivré est constant quelle que soit la tension :

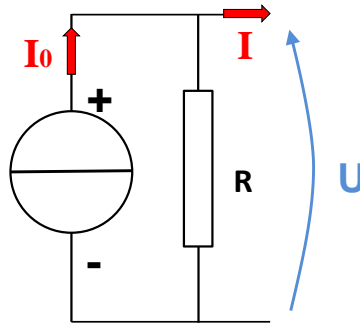
$$I = I_0 = \text{cte}$$



**Figure 16** : Caractéristique d'un générateur de courant

En revanche, le générateur de courant réel présente une résistance interne non infinie et voit son courant décroître au fur et à mesure que la charge augmente :

$$I = I_0 - U/R$$



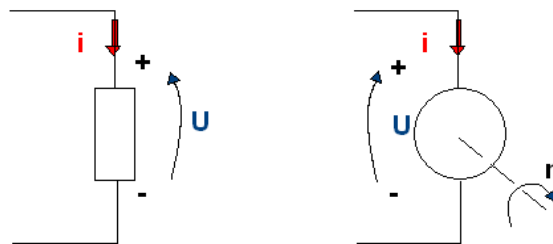
**Figure 17 : Générateur de courant réel**

### 2.3 Récepteur

Un récepteur est un dispositif, un composant ... qui reçoit de l'énergie électrique et la transforme généralement en un autre type d'énergie (par exemple un moteur électrique transforme l'énergie électrique reçue en énergie mécanique, un radiateur électrique transforme l'énergie reçue en chaleur ...).

#### Symbole et convention

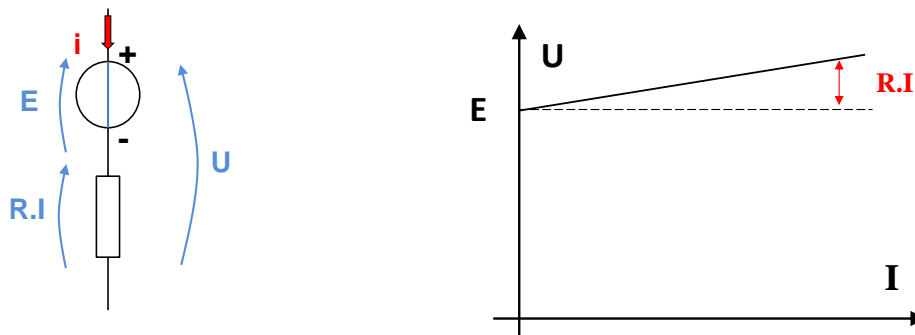
Par convention, le courant entre par le pôle + du récepteur et sort par le pôle -.



**Figure 18 : Convention récepteur**

#### Loi d'Ohm

On modélise très souvent un récepteur par une fcm (force contre électromotrice) en série avec une résistance comme illustré figure 19. La loi d'Ohm s'exprime alors :  $U = E + R.I$



**Figure 19 : Récepteur**

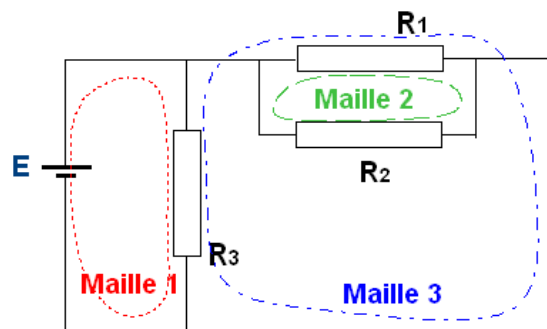
### III : LOIS GENERALES DE L'ELECTRICITE

Dans ce paragraphe nous nous intéressons aux lois générales de l'électricité, c'est-à-dire à des lois valables quel que soit le régime (continu, sinusoïdal, quelconque)

#### 3.1 : Loi des mailles

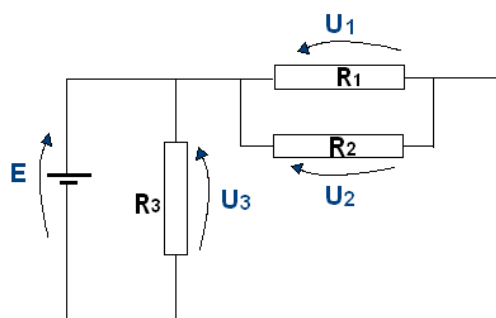
##### Définitions

Une maille est constituée d'un ensemble d'éléments, de composants formant un circuit fermé. Sur la figure ci-dessous la maille 1 est constituée de la fem  $E$  et de la résistance  $R_3$ , la maille 2 des résistances  $R_1$  et  $R_2$  ...



**Figure 20 : Définition d'une maille**

La loi des mailles permet d'écrire une relation liant les différentes tensions d'une même maille. Sur la figure 21, on distingue 4 tensions fléchées de façon arbitraire (enfin presque !!)... Appliquer la loi des mailles va permettre d'établir les relations entre ces différentes grandeurs.



**Figure 21 : Mailles et tensions**

##### Comment appliquer la loi des mailles ?

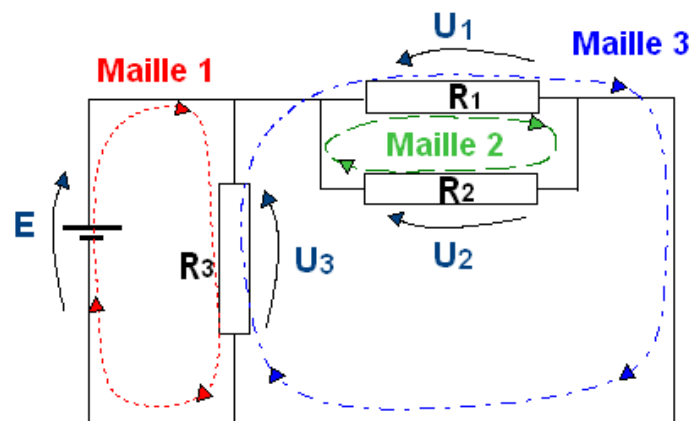
- On choisit un sens de parcours arbitraire pour la maille (voir pointillés de la figure 20).
- En parcourant la maille dans le sens choisi on effectue la somme algébrique des tensions rencontrées que l'on affecte d'un signe  $+$  si le sens de parcours est le même que celui de

la tension et d'un signe  $-$  dans le cas contraire. La somme des différentes tensions est égale à  $0$ . Dans ces conditions la loi des mailles s'écrit :

Pour la maille 1 :  $+ E - U_3 = 0 \Rightarrow E = U_3$

Pour la maille 2 :  $+ U_2 - U_1 = 0 \Rightarrow U_2 = U_1$

Pour la maille 3 :  $+ U_3 - U_1 = 0 \Rightarrow U_3 = U_1$

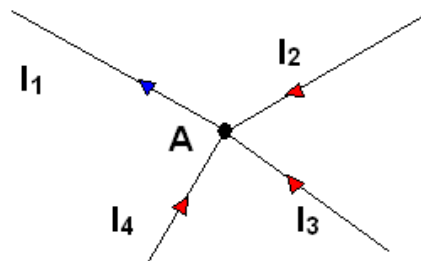


*Figure 22 : Loi des mailles*

### 3.2 Loi des noeuds

#### Définition

On appelle nœud un point où convergent plusieurs conducteurs comme l'illustre la figure ci-dessous.



*Figure 23 : Loi des noeuds*

Loi des nœuds : La somme des courants qui arrivent à un nœud est égale à la somme des courants qui en sortent.

Dans l'exemple de la figure 10 ci-dessus trois courants sont dirigés vers le point A ( $I_2$ ,  $I_3$  et  $I_4$ ), un seul en sort ( $I_1$ ). La loi des nœuds s'écrit donc :

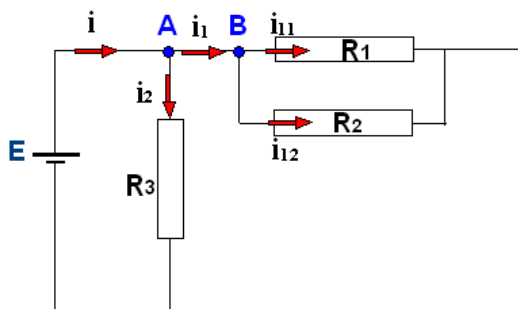
$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4$$

Exemples :

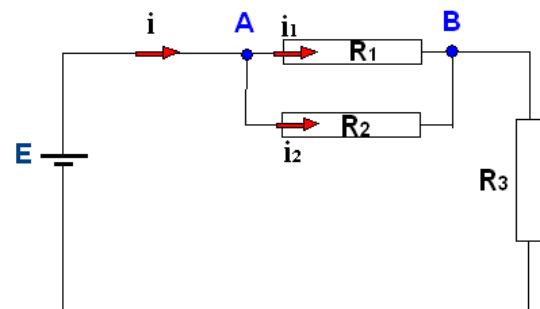
*Circuit a)*

La loi des nœuds au point A s'écrit :  $i = i_1 + i_2$

La loi des nœuds au point B s'écrit :  $i_1 = i_{11} + i_{12}$



a)



b)

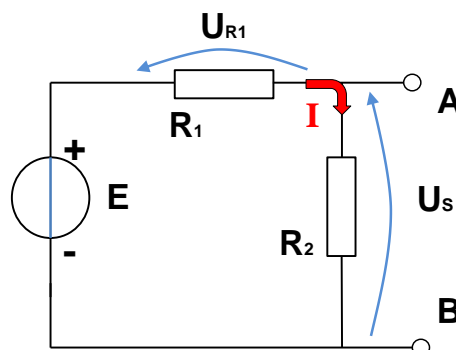
**Figure 24 : Exemples d'application de la loi des nœuds**

*Circuit b)*

La loi des nœuds au point A s'écrit :  $i = i_1 + i_2$

### 3.3 Pont diviseur de tension

Le circuit de la figure ci-après constitue un pont diviseur de tension, il permet à partir de la tension  $E$  d'obtenir une tension de sortie  $U_s$  plus petite.



**Figure 25 : Pont diviseur de tension**

La tension de sortie  $U_s$  a pour expression :  $U_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E$

Démonstration :

$$\text{L.O. : } U_s = R_2 \cdot I \text{ et } U_{R1} = R_1 \cdot I$$

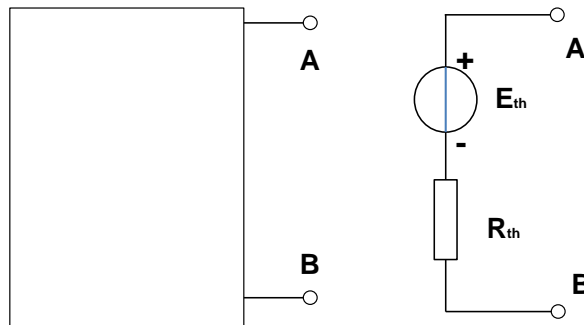
$$\text{L.d.M : } E = U_{R1} + U_s \quad E = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I$$

$$\text{D'où l'expression de } I = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

$$\text{D'où l'expression de } U_s = R_2 \cdot I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E$$

### 3.4 Théorème de Thévenin

On peut remplacer tout dipôle défini entre les deux bornes A et B par un dipôle constitué d'un générateur de tension idéal  $E_{th}$  en série avec une résistance  $R_{th}$ .

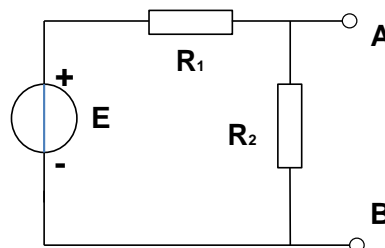


**Figure 25 :** Générateur équivalent de Thévenin

La f.e.m  $E_{th}$  du générateur est égale à la tension entre A et B quand le dipôle est à vide. La résistance  $R_{th}$  est égale à la résistance entre A et B quand le dipôle est à vide et que les générateurs idéaux sont court-circuités.

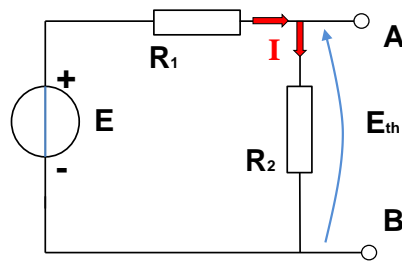
Exemple :

Calculons le générateur de Thévenin équivalent du circuit ci-après :



**Figure 26 :** Exemple

Calcul de la F.e.m  $E_{th}$  :



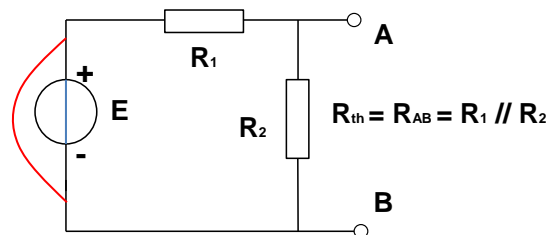
**Figure 27 : F.e.m. équivalente**

En appliquant le théorème du pont diviseur de tension, on obtient :  $E_{th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E$

Calcul de la résistance  $R_{th}$  :

Pour calculer  $R_{th}$ , on court-circuite les générateurs de tension idéaux et on calcule la résistance entre les points A et B.

Dans l'exemple ci-dessous la résistance  $R_1$  est alors en parallèle avec la résistance  $R_2$ .



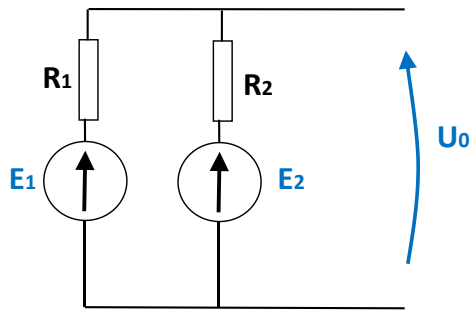
**Figure 28 : Résistance équivalente**

$$R_{TH} = R_1 \text{ parallèle } R_2 = R_{TH} = \frac{\text{Produit}}{\text{Somme}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

### 3.4 Théorème de superposition

Dans un circuit électrique linéaire, l'application du théorème de superposition consiste à étudier l'influence de chacune des sources de tension (ou de courant) d'un circuit et de faire la somme des différentes contributions ...

Exemple : Soit le circuit de la figure ci-après dont on souhaite déterminer la tension  $U_0$ .



L'application du théorème de superposition conduit à calculer la tension de sortie  $U_0$  lorsque

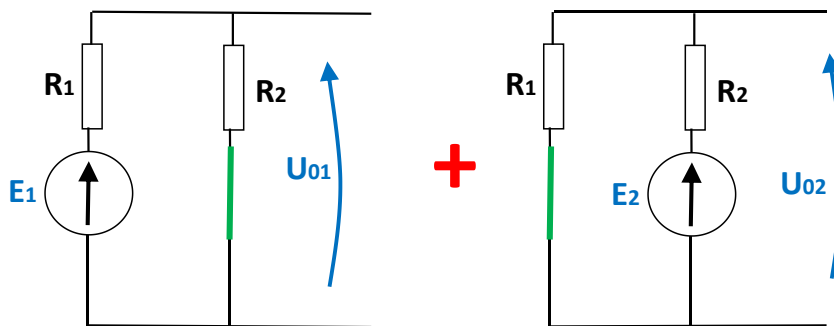
-  $E_1$  en fonction et  $E_2=0$

puis

-  $E_2$  en fonction et  $E_1=0$  puis

$$U_0 = U_{01} + U_{02}$$

Contribution de la source 1 seule + Contribution de la source 2 seule



$E_2 = 0$  et on calcule  $U_{01}$

$E_1=0$  et on calcule  $U_{02}$ .

En appliquant le théorème du pont diviseur de tension on obtient :

$$U_0 = U_{01} + U_{02}$$

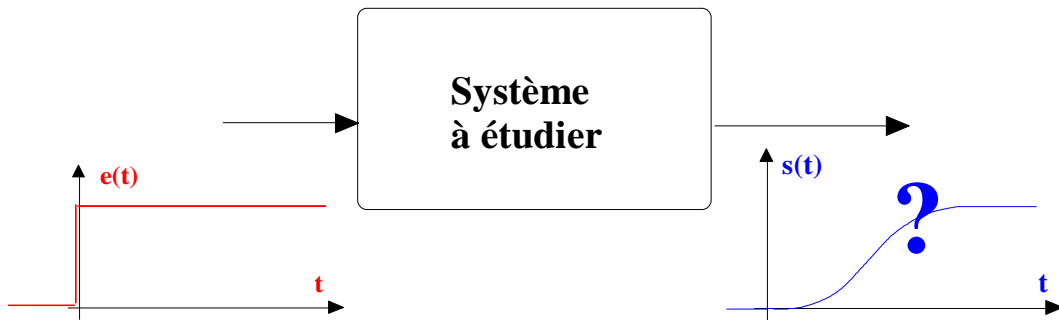
$$U_0 = \frac{R_2}{R_1+R_2} E_1 + \frac{R_1}{R_1+R_2} E_2$$

# CHAPITRE II : ANALYSE INDICIELLE

## I INTRODUCTION

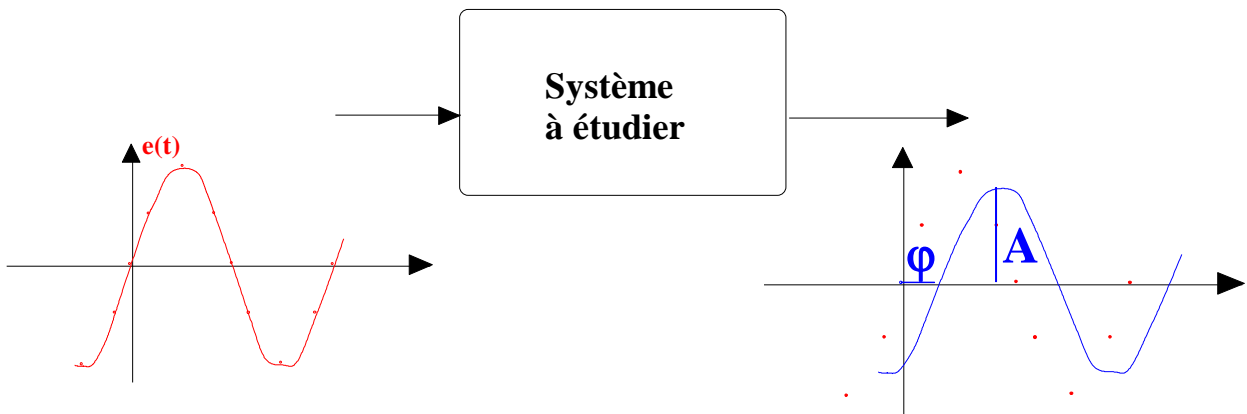
Pour l'étude des circuits électroniques, on utilise classiquement deux approches : l'analyse temporelle et l'analyse fréquentielle.

☞ *Analyse indicielle* : Il s'agit d'analyser l'évolution temporelle du signal de sortie d'un système lorsque l'on applique à son entrée un échelon.



**Figure 2.1** : Analyse indicielle.

☞ *Analyse fréquentielle* : Le signal appliqué est un signal sinusoïdal pur, on étudie alors pour différentes fréquences l'amplitude et le déphasage du signal de sortie par rapport à celui d'entrée (cette méthode fera l'objet du chapitre III).



**Figure 2.2** : Analyse fréquentielle.

Ces méthodes s'appliquent aux systèmes linéaires, c'est à dire à des systèmes dont le comportement est régi par une équation différentielle à coefficients constants. Le principe de superposition est applicable aux systèmes linéaires (il ne l'est pas pour les systèmes non linéaire).

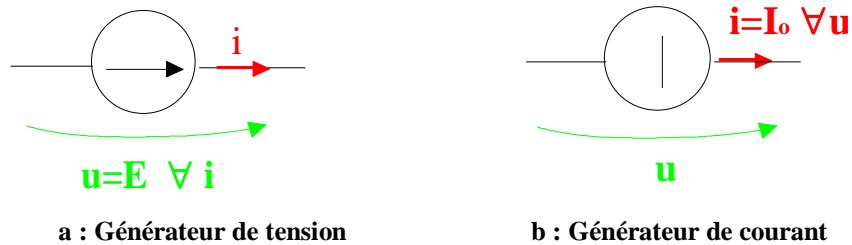
**1.1 Définition.** Si la réponse d'un système linéaire à un signal  $e$  est un signal  $s$ , sa réponse à un signal  $k.e$  sera un signal  $k.s$  ( $k$  étant une constante). **Il y a proportionnalité entre cause et effet.**

Soit  $s_1$  la réponse d'un système à un signal d'entrée  $e_1$  et  $s_2$  la réponse à un signal  $e_2$ , la réponse d'un système linéaire à une entrée  $e_1+e_2$  sera  $s_1+s_2$ . **Les causes ajoutent leurs effets.**

**1.2 Circuits linéaires.**

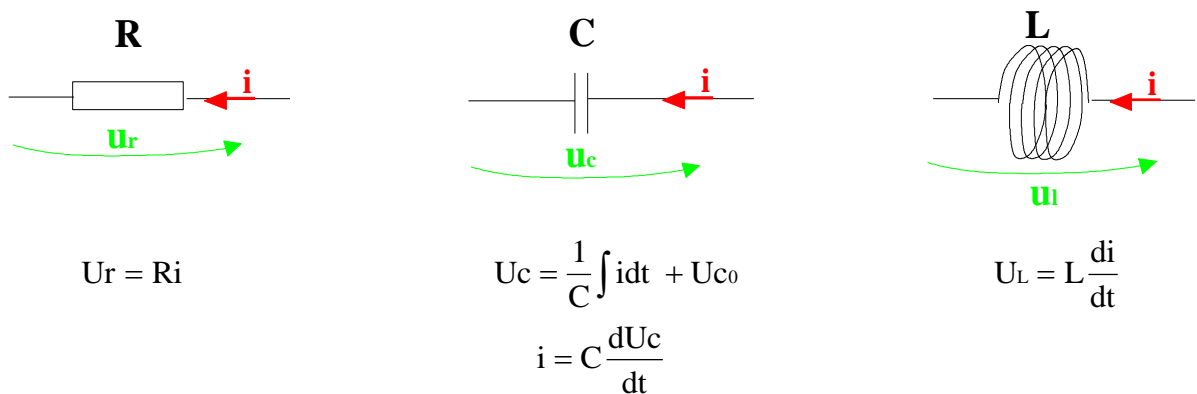
Les circuits électroniques linéaires peuvent être modélisés à l'aide de cinq éléments :

☞ Les éléments actifs : Il s'agit du générateur de tension qui impose une tension constante à ses bornes quel que soit le courant débité (figure 2.3a) et du générateur de courant pour lequel le courant débité est constant quelle que soit la tension à ses bornes (figure 2.3b).



**Figure 2.3 : Eléments actifs.**

☞ Les éléments passifs dont la figure 2.4 rappelle les symboles et la loi d'ohm correspondante en régime quelconque.



$$U_r = R i$$

$$U_c = \frac{1}{C} \int i dt + U_{c0}$$

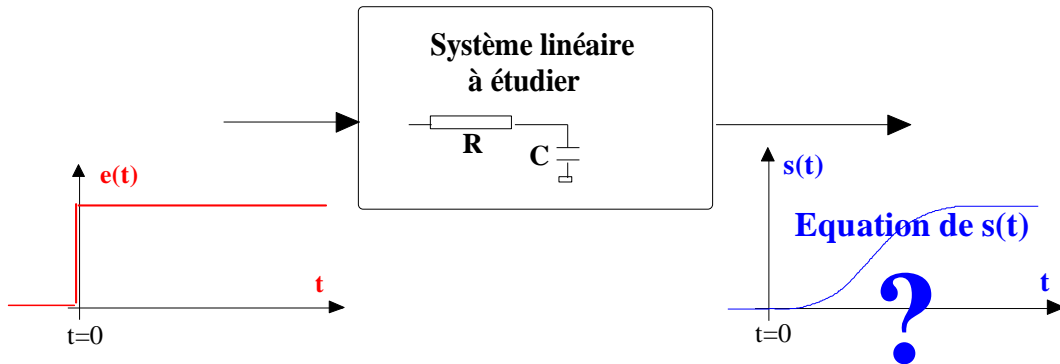
$$i = C \frac{dU_c}{dt}$$

$$U_L = L \frac{di}{dt}$$

**Figure 2.4 : Eléments passifs.**

**II METHODES D'ANALYSE**

Le problème posé concerne le calcul de la réponse d'un circuit à un échelon appliqué à l'entrée du circuit considéré à un instant supposé comme initial.

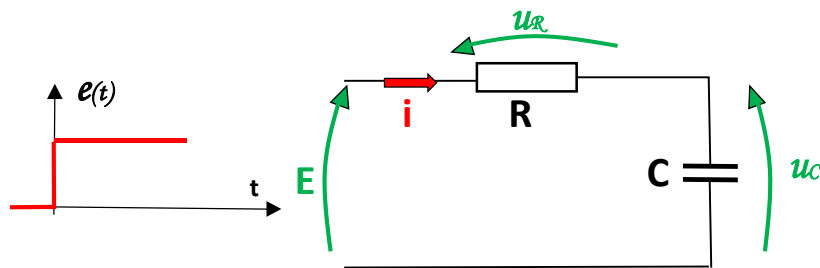


**Figure 2.5 :** Analyse indicielle.

L'équation de la grandeur de sortie est obtenue en utilisant les lois générales de l'électricité (**loi d'ohm en régime quelconque**, loi des nœuds, loi des mailles, théorème de superposition...). On obtient alors une équation différentielle. Les méthodes classiques de résolution des équations différentielles sont également étudiées en mathématique.

### Exemple : Circuit RC

La figure ci-après correspond à un circuit RC, pour lequel les conditions initiales seront supposées nulles (condensateur initialement déchargé).



**Figure 2.6 :** Circuit RC.

Reprenons la méthode précédemment décrite :

⇒ Ecrivons l'équation différentielle régissant le fonctionnement du circuit de la figure 2.6 :

loi des mailles :  $E = u_r + u_c$

loi d'ohm appliquée au condensateur puis à la résistance en régime quelconque :  $i = c \frac{du_c}{dt}$

et  $u_r = Ri$

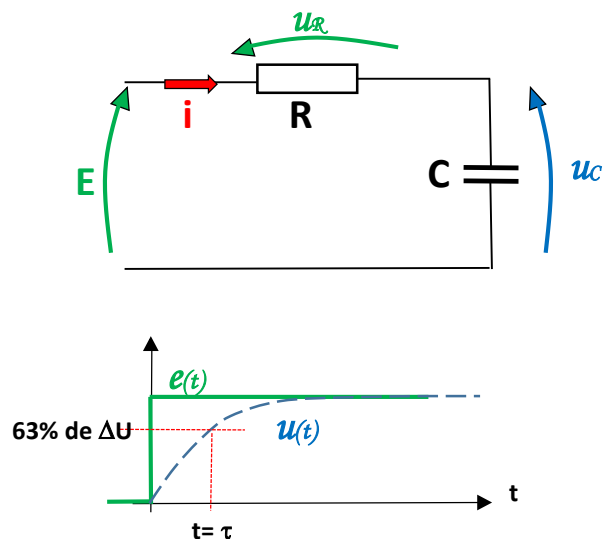
On obtient ainsi :  $E = R.i + u_c$  soit  $E = RC \frac{du_c}{dt} + u_c$

Il s'agit d'une équation différentielle du premier ordre à coefficient constant et à second membre constant. Toutes les équations différentielles du premier ordre à coefficient constant et à second membre constant admettent pour solution la forme suivante :

$$u_c(t) = A. e^{-t/\tau} + B$$

$\tau$  étant le coefficient du terme  $\frac{du_c}{dt}$ , si le coefficient du terme  $u_c$  est égal à 1. Il reste ensuite à partir de considération physique à déterminer les valeurs de A et B.

$$u_c(t) = E \left[ 1 - e^{-t/\tau} \right]$$

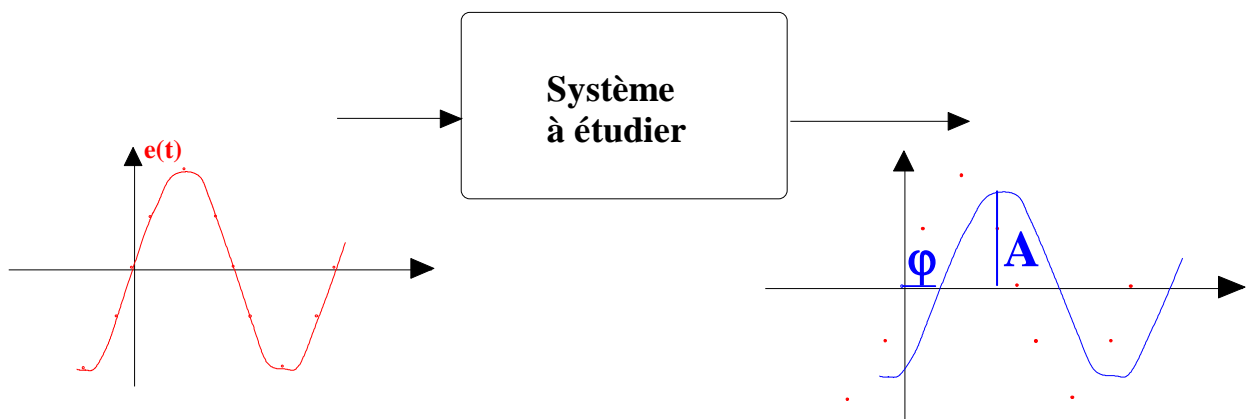


**Figure 2.7 : Réponse indicielle du circuit RC (conditions initiales nulles).**

# CHAPITRE III : ANALYSE HARMONIQUE.

## I INTRODUCTION

L'analyse harmonique consiste à étudier le comportement en régime permanent d'un circuit lorsque l'on applique à son entrée un signal sinusoïdal pur. Le système étudié étant réputé linéaire, le signal de sortie sera également sinusoïdal et de fréquence identique à la fréquence du signal d'entrée. On s'intéresse alors au module et à la phase du signal de sortie.



***Figure 3.1 : Principe de l'analyse harmonique***

On applique un signal sinusoïdal en entrée et on fait varier la fréquence du signal et on détermine pour chaque fréquence le rapport des amplitudes et le déphasage du signal de sortie par rapport à celui d'entrée :

On obtient ainsi :

- l'évolution du rapport des amplitudes en fonction de la fréquence :  $\left| \frac{V_s}{V_e} \right| = \text{fonction de } f$

- l'évolution du déphasage  $\varphi = \text{fonction de } f$ .

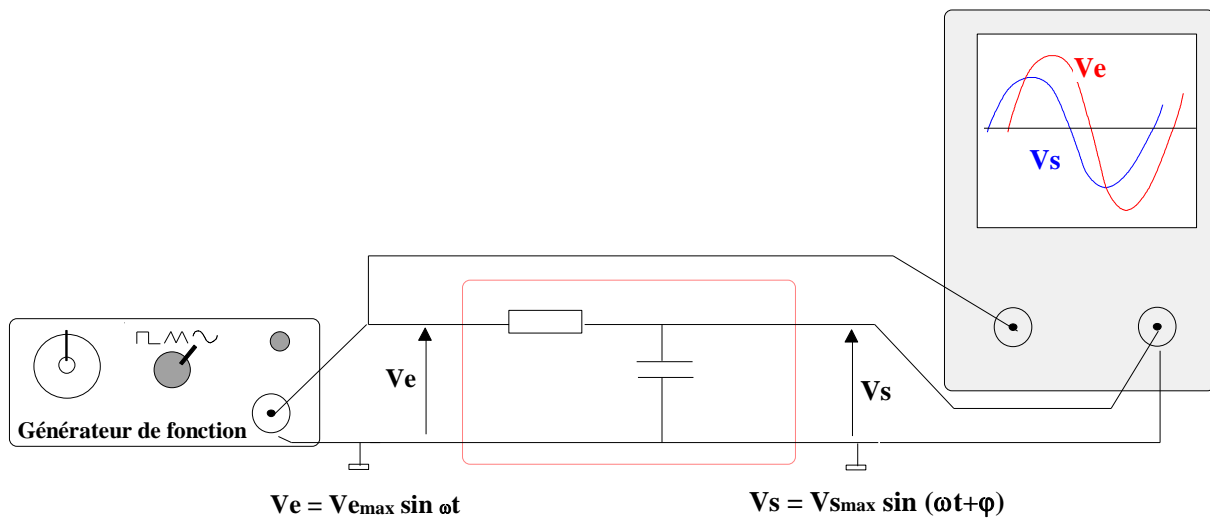
Différents diagrammes sont utilisés pour représenter l'évolution de ces deux grandeurs en fonction de la fréquence :

- ☞ Diagramme de Bode
- ☞ Diagramme de Nyquist
- ☞ Diagramme de Black (voir cours automatique 2ème année).

Les deux grandeurs précédentes  $\left| \frac{V_s}{V_e} \right|$  et  $\varphi$  peuvent être obtenues expérimentalement ou par calcul :

**Méthode expérimentale.**

La figure 3.2 indique une méthode fréquemment utilisée pour relever expérimentalement l'évolution de signal de sortie (amplitude et déphasage) en fonction de la fréquence. Cette méthode sera mise en œuvre en TP d'électronique.



**Figure 3.2 : Analyse harmonique. Méthode expérimentale.**

Le générateur de fonction délivre un signal sinusoïdal pur qui est appliqué à l'entrée du montage étudié. On visualise simultanément les signaux d'entrée et de sortie. Si l'on dispose d'un oscilloscope numérique, il est facile d'obtenir une mesure de  $V_{e\max}$ ,  $V_{s\max}$  et  $\varphi$ . Il convient cependant de vérifier que le signal de sortie reste sinusoïdal (problème de distorsion, de saturation ..).

**Calcul des grandeurs  $\left| \frac{V_s}{V_e} \right|$  et  $\varphi$ .**

La méthode consiste à calculer la fonction de transfert **T** du circuit (la sortie étant en l'air, c'est à dire non chargée). On obtient ainsi

$$\left| \frac{V_s}{V_e} \right| = |\mathbf{T}| \text{ et } \varphi = \mathbf{Arg}(\mathbf{T}) \quad \text{où } |\mathbf{T}| \text{ représente le module de la fonction de transfert}$$

et  $\varphi$  l'argument de cette fonction.

Pour le calcul de la fonction de transfert on utilise les impédances complexes

$$Z_R = R \quad Z_C = \frac{1}{jC\omega} \quad Z_L = jL\omega$$

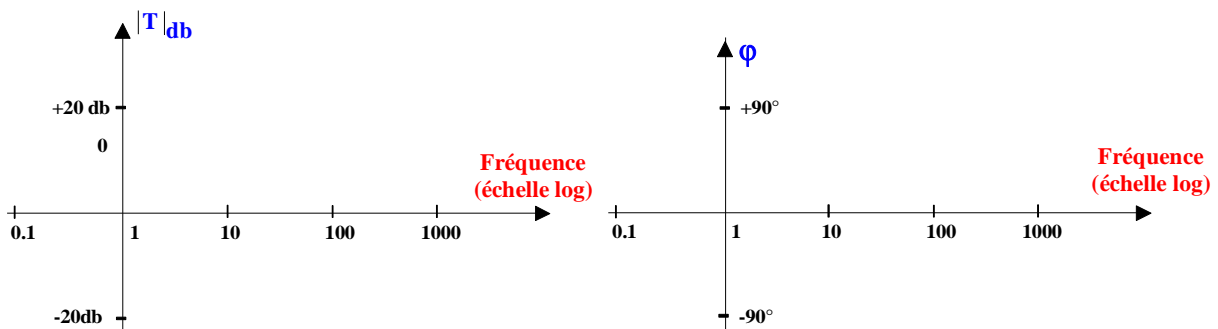
## II DIAGRAMME DE BODE

### 2.1 Définition.

Le diagramme de Bode consiste à représenter séparément l'évolution :

☞ du module de la fonction de transfert exprimé en décibel  $|T|_{db} = 20\log|T|$  en fonction de la fréquence  $f$  (ou de la pulsation  $\omega$ ).

☞ de l'argument de la fonction de transfert  $\varphi = \text{Arg}(T)$  en fonction de la fréquence  $f$  (ou de la pulsation  $\omega$ ).



**Figure 3.3 : Diagramme de Bode**

### 2.2 Principe d'utilisation

Lorsque que l'on souhaite tracer le diagramme de Bode d'un circuit quelconque, on procède toujours de la même façon :

⇒ Déterminer l'expression de la fonction de transfert du circuit en utilisant les lois générales de l'électricité (loi des mailles, loi des nœuds, pont diviseur de tension...). On utilise soit les impédances symboliques soit les impédances complexes.

⇒ Mettre la fonction de transfert sous la forme d'un produit de termes élémentaires  $T = T_1 \cdot T_2 \cdot \dots \cdot T_n$  :

...  $T_n$  :

Les termes élémentaires

$$G_0, j\frac{\omega}{\omega_c}, 1 + j\frac{\omega}{\omega_c}, \frac{1}{j\frac{\omega}{\omega_c}}, \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}}, \frac{1}{1 + 2j\xi\frac{\omega}{\omega_c} + (j\frac{\omega}{\omega_c})^2} \quad \omega_c \text{ représente la pulsation de coupure.}$$

En posant  $\tau = \frac{1}{\omega_c}$ , on obtient :

$$G_0, j\tau\omega, 1 + j\tau\omega, \frac{1}{j\tau\omega}, \frac{1}{1 + j\tau\omega}, \frac{1}{1 + 2j\xi\tau\omega + (j\tau\omega)^2}$$

⇒ Tracer séparément les diagrammes de Bode (module et argument) de chacun des termes élémentaires.

⇒ Le diagramme complet s'obtient en effectuant la somme des diagrammes élémentaires :

diagramme d'amplitude =  $\sum$  diagrammes d'amplitudes élémentaires

$$20\log T = 20\log [T_1.T_2. \dots T_n] = 20\log T_1 + 20\log T_2 + \dots + 20\log T_n$$

$$T_{db} = T_1db + T_2db + \dots + T_ndb$$

diagramme de phase =  $\sum$  diagrammes de phases élémentaires

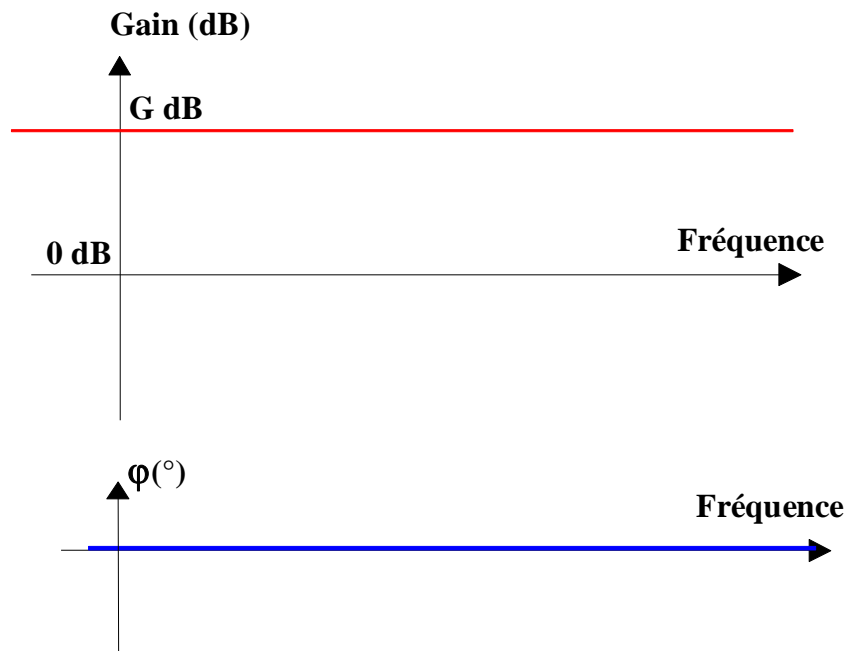
$$\arg T = \arg [T_1.T_2. \dots T_n] = \arg T_1 + \arg T_2 + \dots + \arg T_n.$$

### 2.3 Fonction de transfert $T(j\omega) = G_0$

Calculons le module et l'argument de  $T(j\omega) = G_0$  :

*Module* :  $20\log|T(j\omega)| = 20\log|G_0| = 20\log G_0 = G_0 \text{ db}$ . Le module est constant et égale à  $G_0$  db.

*Argument* :  $\arg T(j\omega) = \arg [G_0] = 0$ . L'argument de la fonction de transfert est nul quelle que soit la fréquence.



**Figure 3.4** : Diagramme de Bode du terme  $T(j\omega) = G_0$

## 2.4 Fonction de transfert $T(j\omega) = j\tau\omega$

Calculons le module et l'argument de  $T(j\omega) = j\tau\omega$  :

*Module* :  $20\log|T(j\omega)| = 20\log|j\tau\omega| = 20\log\tau\omega = 20\log\omega + 20\log\tau$ .

$20\log T = 20\log\omega + 20\log\tau$  soit  $Y(\text{db}) = 20.X + B$  avec  $Y = 20\log T$  et  $X = \log\omega$ .

Il s'agit donc d'une droite de pente +20db par décade. Cette droite coupe l'axe des 0db lorsque  $20X = -B$  soit  $20\log\omega = -20\log\tau$  donc  $\omega = 1/\tau$

*Argument* :  $\arg T(j\omega) = \arg[j\tau\omega] = +\frac{\pi}{2}$ . L'argument de la fonction de transfert est constant quelle que soit la fréquence.

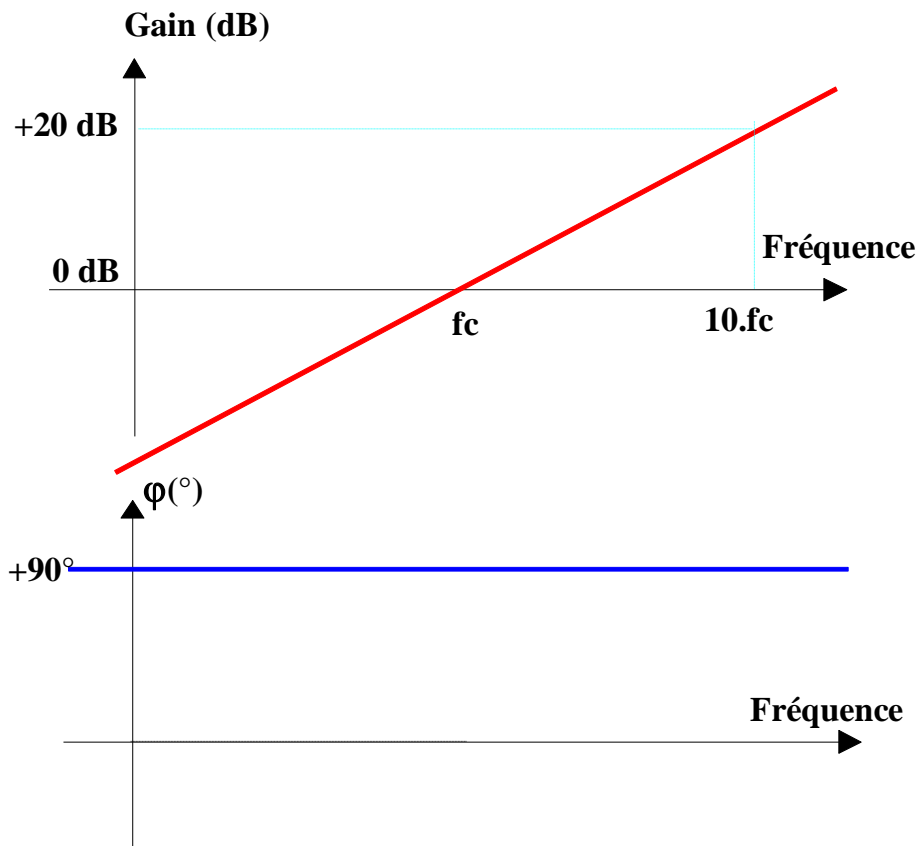


Figure 3.5 : Diagramme de Bode du terme  $T(j\omega) = j\tau\omega$

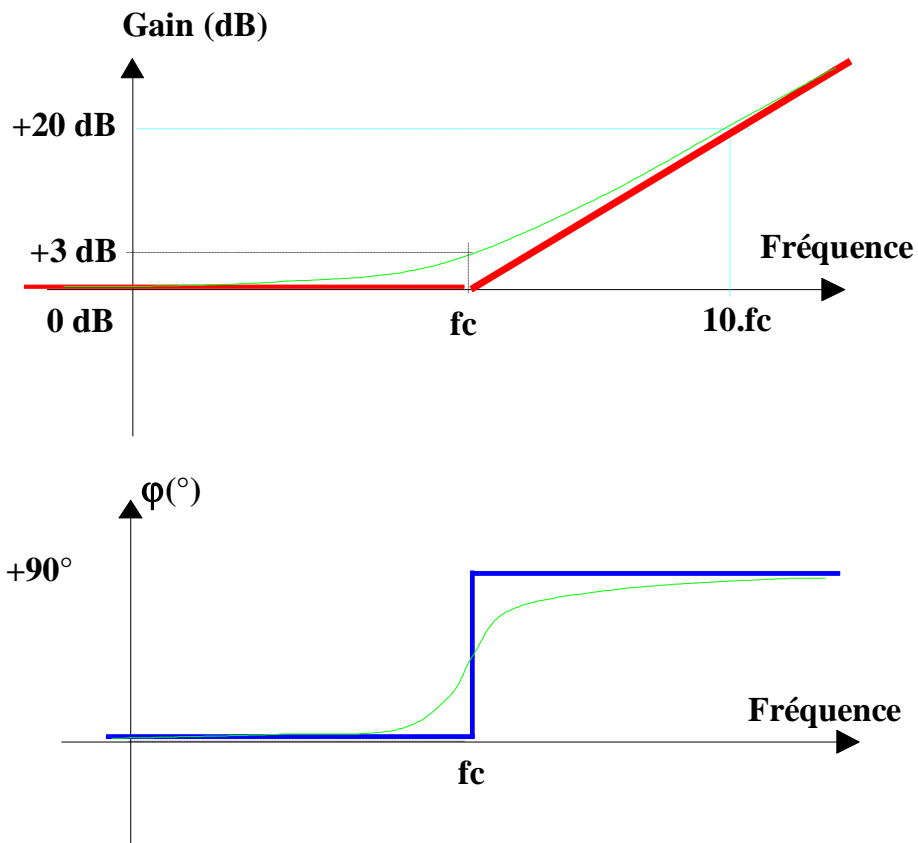
## 2.5 Fonction de transfert $T(j\omega) = 1 + j\tau\omega$

Etudions le diagramme asymptotique de la fonction :  $T(j\omega) = 1 + j\tau\omega$  :

Deux cas sont à considérer :  $1 \gg \tau\omega$  soit  $\omega \ll \frac{1}{\tau}$  et  $1 \ll \tau\omega$  soit  $\omega \gg \frac{1}{\tau}$

*Module :*

*Argument :*  $\arg T(j\omega)$



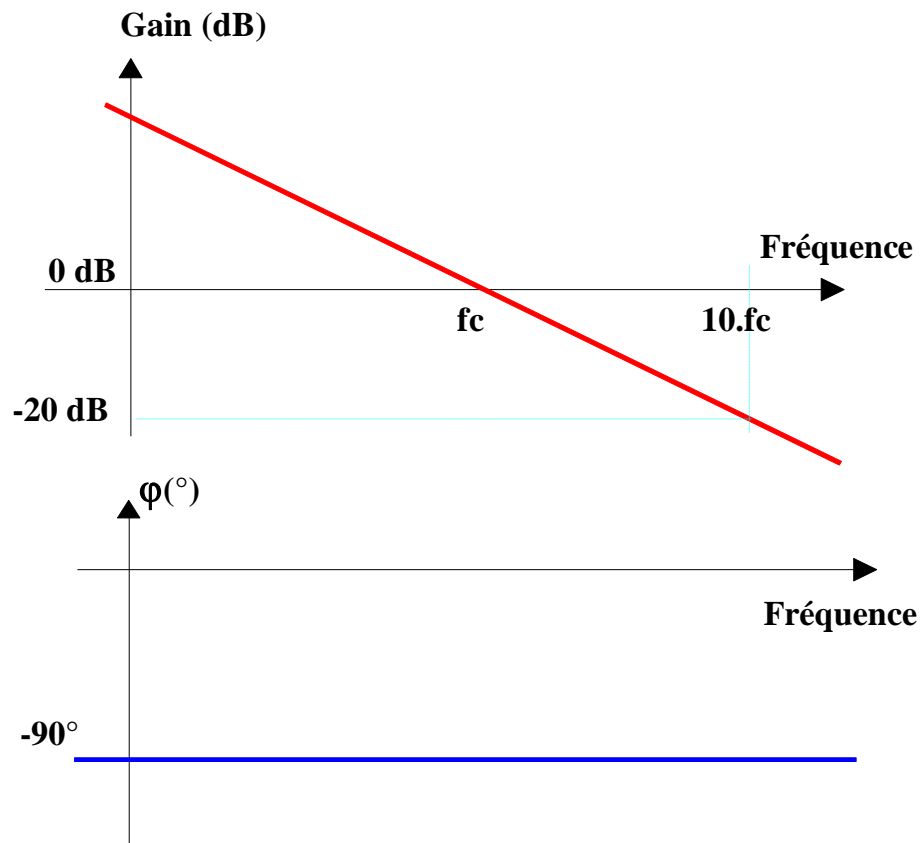
**Figure 3.6 : Diagramme de Bode du terme  $T(j\omega) = 1 + j\tau\omega$**

## 2.6 Fonction de transfert $T(j\omega) = \frac{1}{j\tau\omega}$

Calculons le module et l'argument de  $T(j\omega) = \frac{1}{j\tau\omega}$  :

*Module :*

*Argument :*



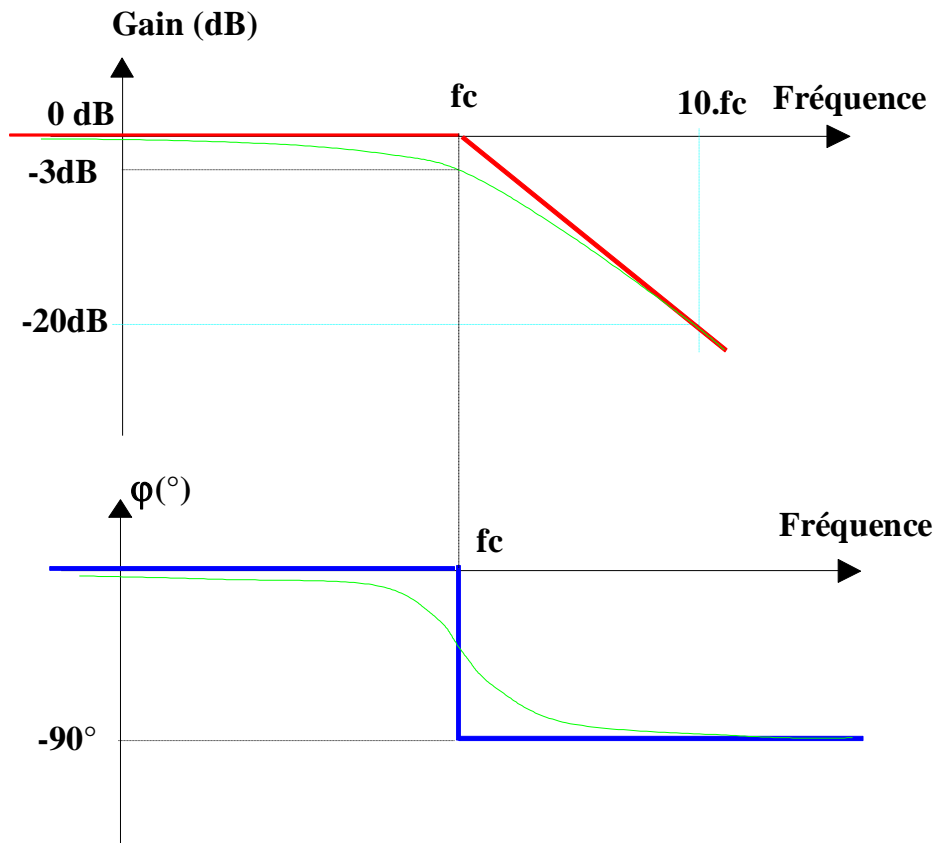
*Figure 3.7 : Diagramme de Bode du terme  $T(j\omega) = \frac{1}{1 + j\tau\omega}$*

## 2.7 Fonction de transfert $T(j\omega) = \frac{1}{1 + j\tau\omega}$

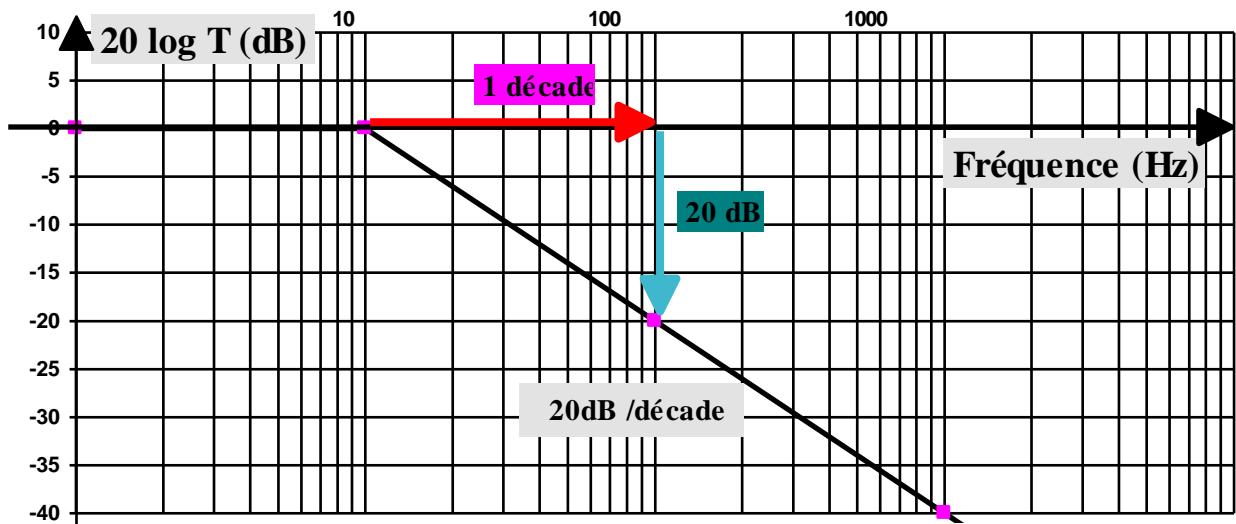
Etudions le diagramme asymptotique de la fonction :  $T(j\omega) = \frac{1}{1 + j\tau\omega}$

*Module :*

Argument :



**Figure 3.8** : Diagramme de Bode du terme  $T(j\omega) = \frac{1}{1 + j\tau\omega}$

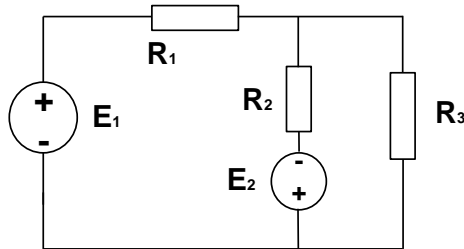


*Figure 3.9* : Diagramme de Bode du terme  $T(j\omega) = \frac{1}{1 + j\tau\omega}$  (échelle semi log).

**Module SE1 – TD-1 Lois Générales de l'électricité**  
**Loi des mailles – Loi des Nœuds- Loi d'Ohm en DC**

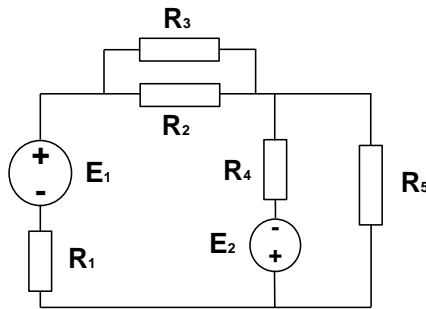
Pour chacun des exercices suivants calculer les courants circulant dans les différents circuits et les tensions aux bornes des résistances

*Exercice 1 :*



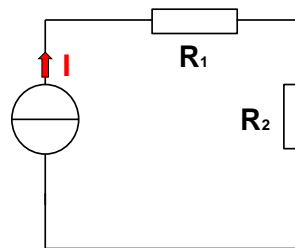
*Fig 1 :  $E_1=15V$   $E_2=5V$        $R_1 = R_2 = R_3 = 1k\Omega$*

*Exercice 2 :*



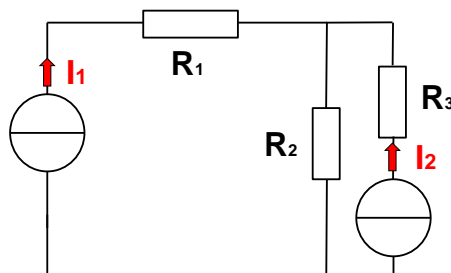
*Fig 2 :  $E_1=15V$   $E_2=5V$        $R_1 = R_4=100\Omega$        $R_2 = R_3 = R_5 = 1k\Omega$*

*Exercice 3 :*



*Fig 3 :  $I = 1mA$        $R_1 = R_2 100\Omega$*

*Exercice 4 :*



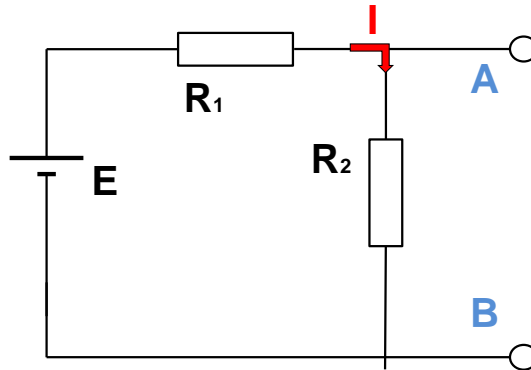
*Fig 4 :  $I_1 = 1mA$   $I_2=2mA$        $R_1 = R_2 100\Omega$   $R_3 = 10\Omega$*

**Module SE1 – TD-2 Lois Générales de l'électricité**  
**Pont diviseur - Générateur de Thévenin – Théorème de superposition**

**Exercice 1 :**

Calculer le courant  $I$  puis en déduire la tension  $V_{AB}$

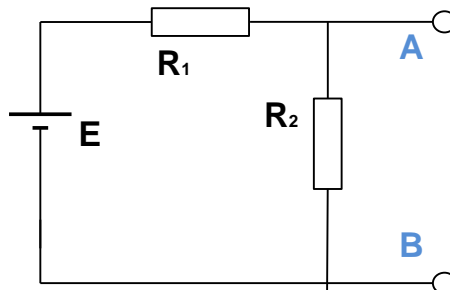
En déduire le théorème du pont diviseur de tension



*Fig 1 :  $E_1=15V$        $R_1 = R_2 = 1k\Omega$*

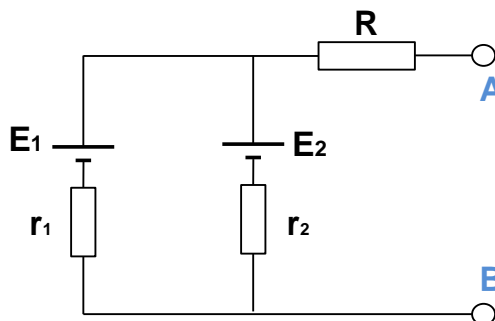
Pour chacun des exercices suivants calculer les éléments  $E_{TH}$  et  $R_{TH}$  du générateur de Thévenin équivalent.

**Exercice 2 :**

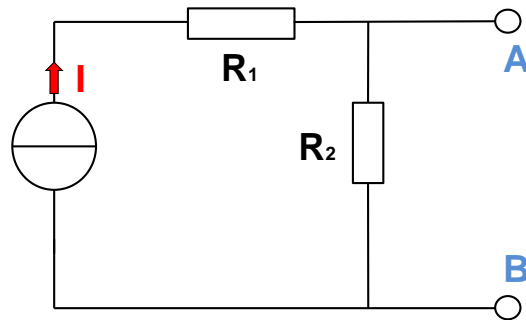


*Fig 2 :  $E_1=15V$        $R_1 = R_2 = 1k\Omega$*

**Exercice 3 :**



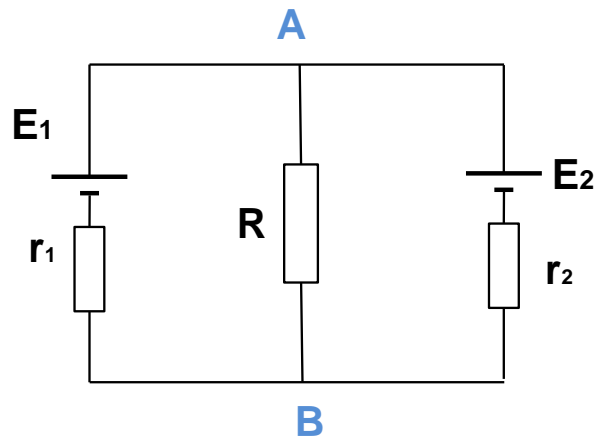
*Fig 3 :  $E_1=15V$     $E_2=5V$        $r_1 = r_2=100\Omega$        $R=0,5k\Omega$*

**Exercice 4 :**

**Fig 4 :**  $I = 100\text{mA}$        $R_1 = 100\Omega$        $R_2 = 60\Omega$

**Exercice 5 : Théorème de superposition**

Calculer le courant circulant dans la résistance  $R$  en utilisant le théorème de superposition.



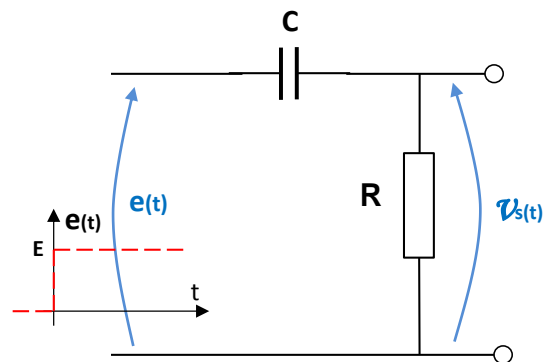
**Fig 5 :**  $E_1 = 15\text{V}$     $E_2 = 5\text{V}$        $r_1 = r_2 = 100\Omega$        $R = 100\Omega$

## TD ELECTRONIQUE I : Réponse indicielle d'un circuit

### Exercice 1 :

On impose à l'entrée du circuit de la figure 1 un échelon d'amplitude  $E=5V$ , le condensateur étant initialement déchargé.

- 1 Donner l'expression de la tension de sortie  $v_s(t)$
- 2 Tracer  $v_e(t)$ ,  $i(t)$  et  $v_s(t)$ . Justifier les formes d'ondes obtenues.



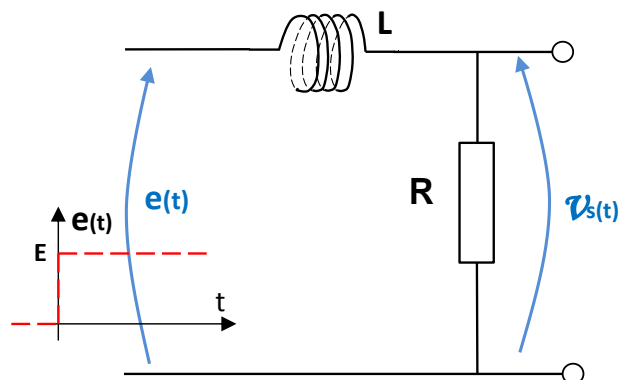
**Figure 1.**  $C=100nF - R=10k\Omega$

### Exercice 2 :

Le condensateur du circuit de la figure 1 étant initialement chargé ( $V_{so}=U_{co}=E/2$ ), on impose à l'entrée du circuit un échelon d'amplitude  $E=5V$ .

Tracer  $v_e(t)$ ,  $i(t)$  et  $v_s(t)$ . Justifier les formes d'ondes obtenues.

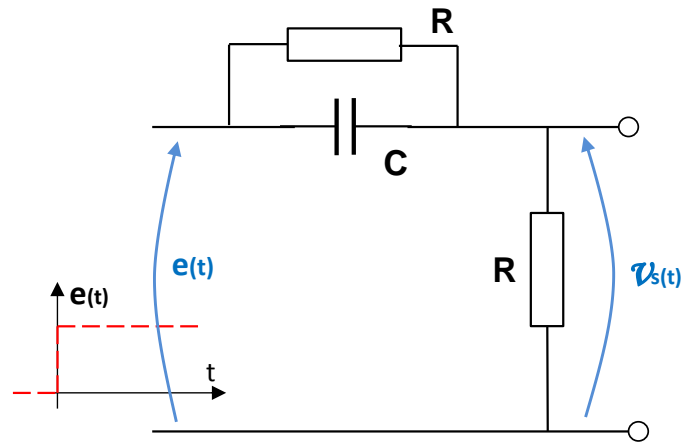
### Exercice 3 :



**Figure 2.** :  $L 100\mu H \quad R=10k\Omega$

### Exercice 4 :

Le condensateur étant initialement déchargé, on applique à l'instant  $t=0$  un échelon d'amplitude 2V à l'entrée du circuit de la figure 3. Tracer l'évolution de la grandeur de sortie  $V_s$  en fonction du temps. Justifier par un raisonnement simple l'allure de ce signal.

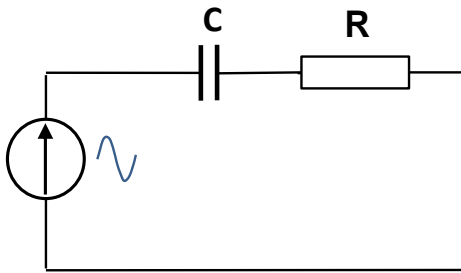


**Figure 3:**  $C=100nF - R=10k\Omega$

# ANALYSE HARMONIQUE – IMPEDANCES COMPLEXES – DIAGRAMME DE BODE

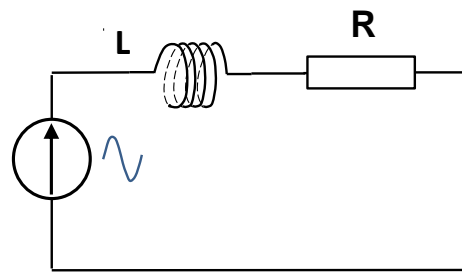
## Exercice n°1 : Impédances complexes

- 1 : Quelles sont les notations utilisées en régime sinus pur ?
- 2 : Rappeler l'expression des impédances complexes des éléments R – L – C.
- 3 : Les circuits ci-dessous étant alimentés par une tension sinusoïdale pure de valeur efficace 10V de fréquence 1kHz, calculer l'impédance  $\underline{Z}$  de ces circuits, puis en déduire les valeurs des courant et tensions :



**Figure 1 : Circuit RC.**

$$E_{\text{généré}} = 10\text{V} \quad f = 1\text{kHz}$$

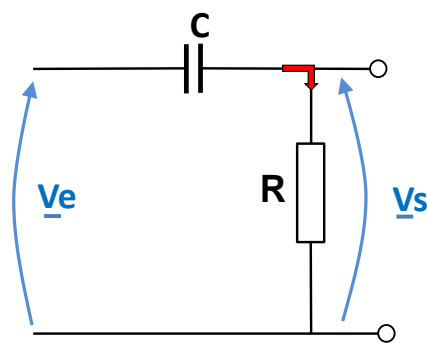


**Figure 2 : Circuit RL**

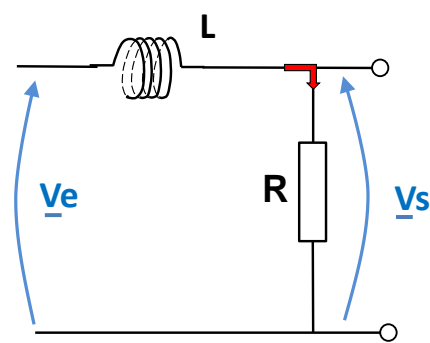
$$R = 1\text{k}\Omega \quad C = 100\text{nF} \quad L = 100\text{mH}$$

## Exercice n°2 : Fonction de transfert

Calculer la fonction de transfert  $\frac{V_s}{V_e}$  des circuits ci-après :



**Figure 3 : Circuit RC.**



**Figure 4: Circuit RL**

## Exercice n°3 : Diagrammes de Bode des termes élémentaires

Tracer le diagramme de Bode (diagrammes d'amplitude et de phases) des termes suivants :

$$T_1(j\omega) = G_0$$

$$T_2(j\omega) = j \cdot \tau \cdot \omega$$

$$T_3(j\omega) = \frac{1}{j \cdot \tau \cdot \omega}$$

Avec  $\tau = 1\text{ms}$

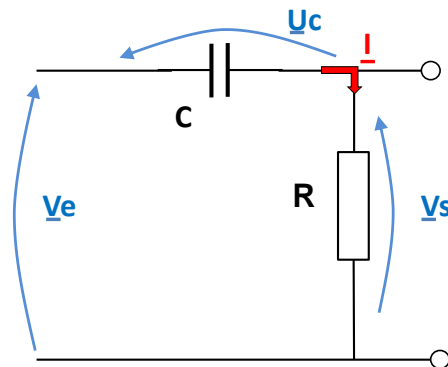
#### Exercice n°4 : Diagrammes de Bode

De l'exercice 3, en déduire les diagrammes de Bode des termes :

$$T_2(j\omega) = 1 + j \cdot \tau \cdot \omega \qquad T_3(j\omega) = \frac{1}{1 + j \cdot \tau \cdot \omega}$$

#### Exercice n°5 : Diagrammes de Bode

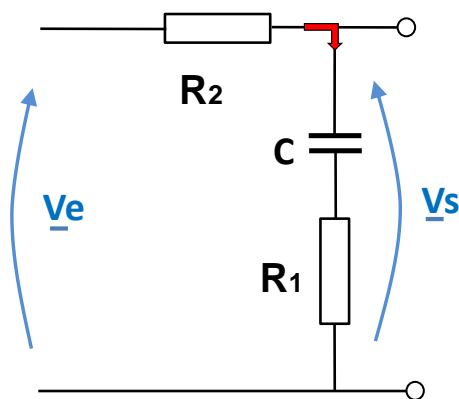
Tracer le diagramme de Bode (diagramme d'amplitude et diagramme de phase) du circuit de la figure 1 (on prendra  $R=22k\Omega$  et  $C=10nF$ ).



**Figure 5 :** Circuit RC.

#### Exercice n°6 : Correcteur à retard de phase.

- Etablir la fonction de transfert du circuit de la figure 6.
- Tracer le diagramme de Bode (amplitude et phase).

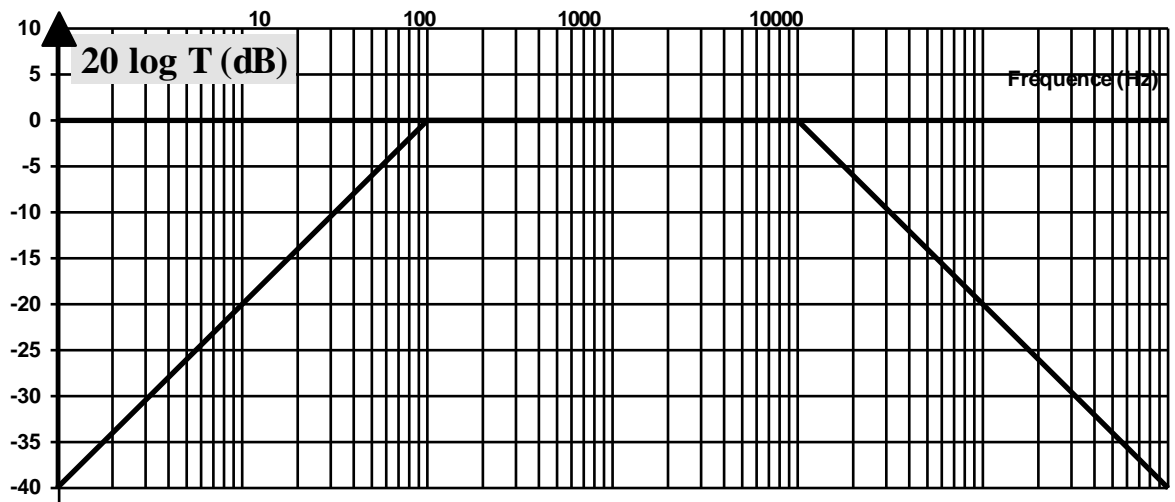


$$R_1=10k\Omega \quad R_2=47k\Omega \quad \text{et} \quad C=100nF$$

**Figure 6 :** Correcteur à retard de phase.

#### Exercice n°7 : Détermination d'une fonction de transfert d'un circuit à partir de sa courbe de réponse en fréquence.

- Déterminer l'expression de la fonction de transfert du circuit présentant le diagramme ci après. Préciser les différentes fréquences de coupure.
- Proposer un schéma permettant électrique qui présenterait la même courbe de réponse en fréquence.



*Figure 7 : Correcteur à retard de phase.*