Module: Electronique de base

Filière SMP

Semestre S4

Session printemps

Qu’est ce que l’électronique?

L’électronique est une technique constituant l'une des branches les plus importantes de la physique appliquée, qui étudie et conçoit les structures effectuant des traitements de signaux électriques, c-à-d de courants ou de tensions électriques, porteurs d’informations.

Plan du cours

Chapitre 1 : Rappels et compléments sur les circuits électriques

Chapitre 2: Filtres passifs

Chapitre 3 : Éléments de la physique des semi-conducteurs

Chapitre 4 : Diodes et circuits à diodes

Chapitre 5 : Transistors bipolaires

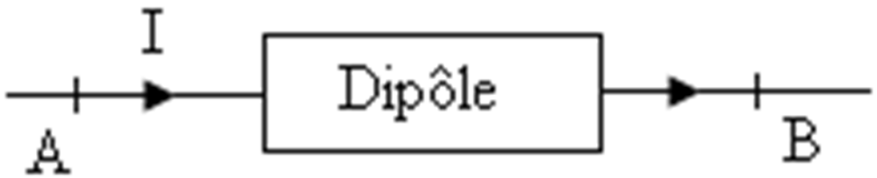
Chapitre 6 : Transistors à effet de champ

Chapitre 1

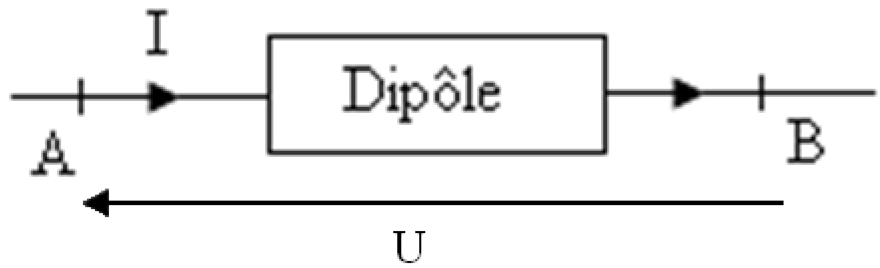
Rappels et compléments sur les circuits électriques

1.Dipôle électrique

On appelle dipôle, tout dispositif possédant deux bornes permettant de le raccorder à d'autres composants dans un circuit.



A chaque borne existe un potentiel électrique, défini par rapport à un potentiel de référence (0 volt), appelé masse.



La **différence de potentiel** aux bornes du dipôle est définie par $U = V_A - V_B$.

La **caractéristique statique courant-tension** d'un dipôle est la représentation graphique de la relation $I = f(U)$ en **régime continu**.

Dipôles passif et actif:

Un dipôle est passif si sa caractéristique passe par l'origine.

Dans le cas contraire, il est dit actif.

- ✓ **Exemples de dipôles passifs : résistances, condensateurs, bobines.**
- ✓ **Exemple de dipôles actifs : générateurs.**

Dipôle linéaire

Un dipôle est linéaire si sa caractéristique I = f(U) est une droite.

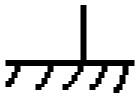
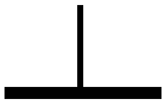
Par exemple, les résistances et les générateurs de tension et de courant sont des dipôles linéaires.

Par contre, une diode est un dipôle non linéaire.

2. Masse

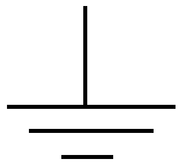
Les électroniciens distinguent en général la masse signal de la masse carcasse.

- ✓ **La masse signal est symbolisée par:**

 **ou** 

est une référence des potentiels pour un circuit donné.

✓ masse carcasse symbolisée par :



est reliée à la terre, son potentiel est constant et sa valeur est souvent conventionnellement fixée à zéro.

3. Régimes statique et dynamique

✓ Régime statique

Si les tensions et les courants sont constants, nous parlons de **régime constant** ou de **régime indépendant du temps** ou encore de **régime statique**. Ces grandeurs sont généralement notées avec des lettres majuscules :

I : pour l'intensité,

$U = V_A - V_B$: pour la ddp entre deux points A et B.

✓ Régime dynamique

Si les tensions et les courants dépendent du temps, on est en régime variable ou en régime dynamique. Ces grandeurs sont généralement notées avec des lettres minuscules:

$i(t)$ pour l'intensité,

$u=v_A-v_B$: pour la ddp entre 2 points A et B.

4. Etude des réseaux électriques

Objectif:

Calcul des courants et des tensions électriques dans un circuit électrique alimenté par plusieurs sources.

Définitions:

- **Branche**

Une branche est constituée par des dipôles connectés en série.

Les dipôles d'une branche sont traversés par le même courant.

- Nœuds :

Les nœuds d’un circuit sont les extrémités de ces branches.

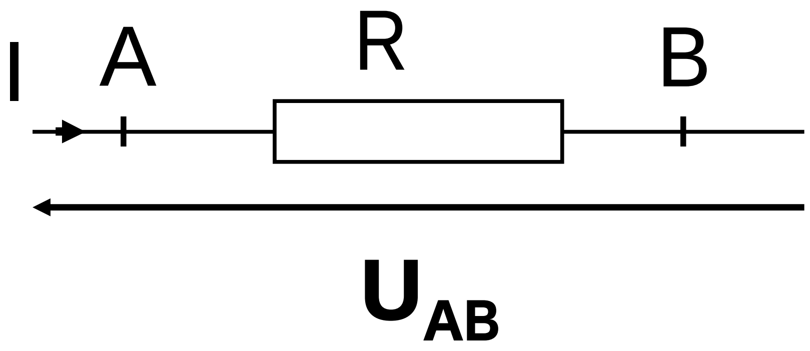
- Mailles :

Une maille est un ensemble de branches constituant un circuit fermé.

Méthodes de calcul:

- ✓ Loi d'Ohm
- ✓ Loi de kirchhoff en courant
- ✓ Loi de kirchhoff en tension
- ✓ Théorème de superposition
- ✓ Théorème de Thévenin
- ✓ Théorème de Norton
- ✓ Théorème de Millman

4.1 Loi d'Ohm :



V_A: potentiel électrique au point A

V_B: potentiel électrique au point B

$U_{AB} = V_A - V_B$: ddp aux bornes de R

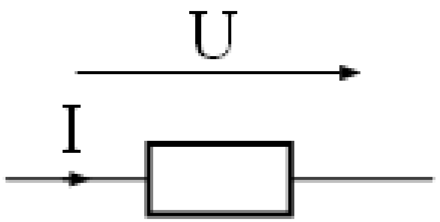
Le courant I est orienté de A vers B

$U_{AB} = V_A - V_B = RI$

Remarque :

On peut adopter deux types de convention concernant l'orientation de la tension par rapport au sens du courant :

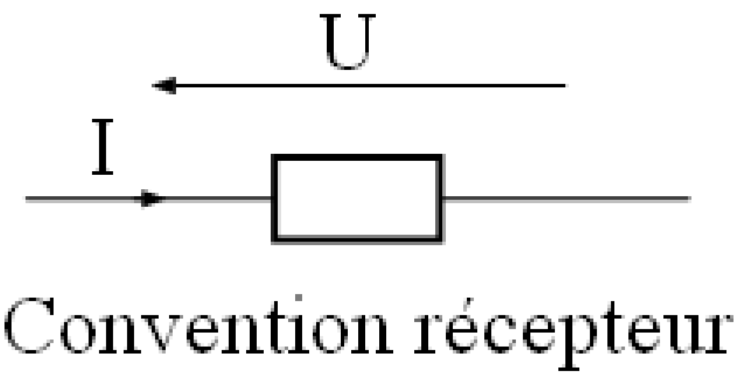
- ✓ **La convention générateur, pour laquelle la tension et le courant sont orientés dans le même sens.**



Convention générateur

$U = -RI$

✓ La **convention récepteur**, pour laquelle la tension et le courant sont orientés dans de sens opposés.

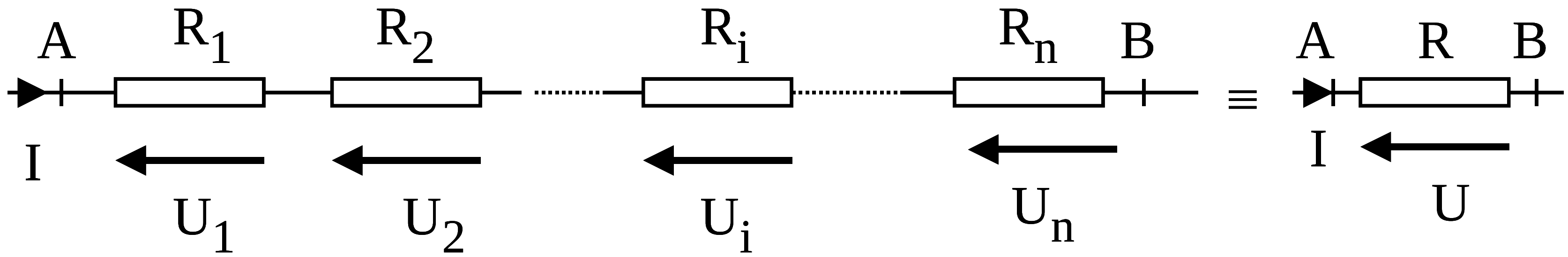


$$U = RI$$

Applications:

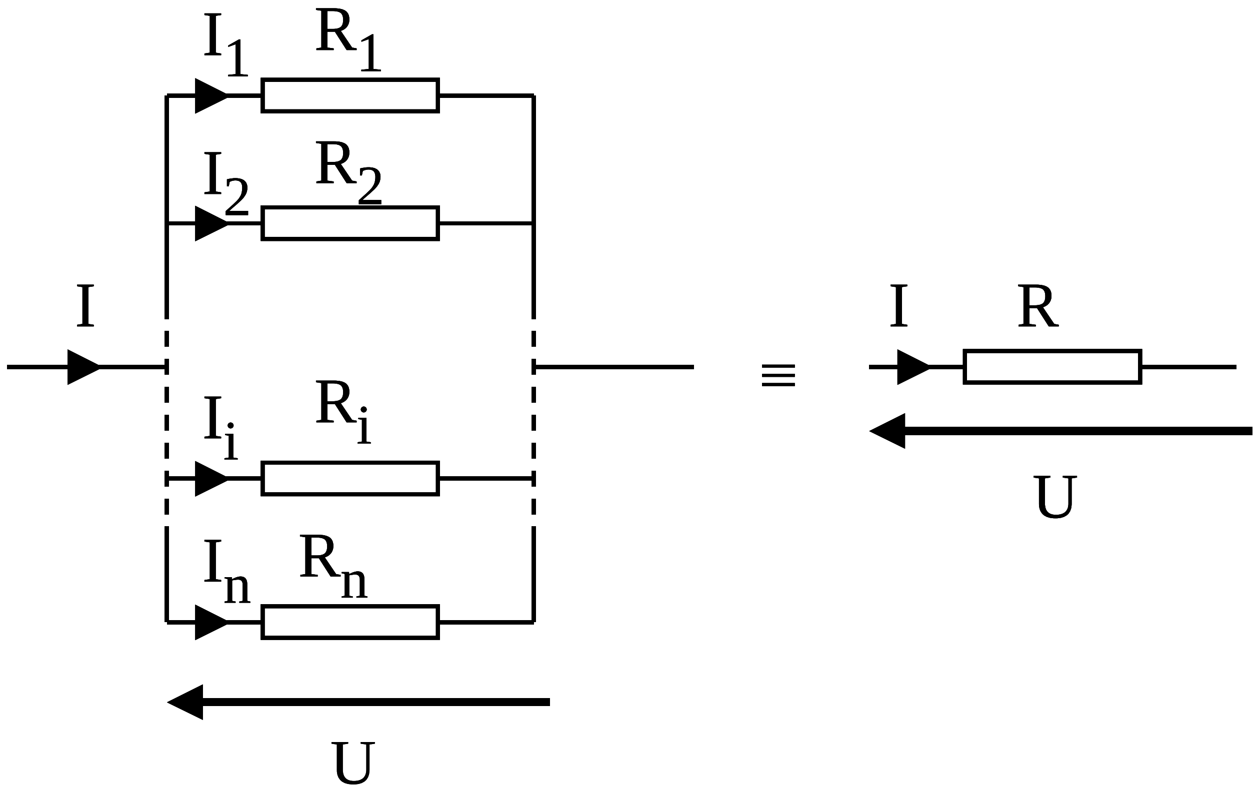
a- Association de résistances

✓ Association en série



$$U = V_A - V_B = R\,I = \sum_i U_i = I\sum_{i=1}^{n} R_i \quad\Rightarrow\quad R = \sum_{i=1}^{n} R_i$$

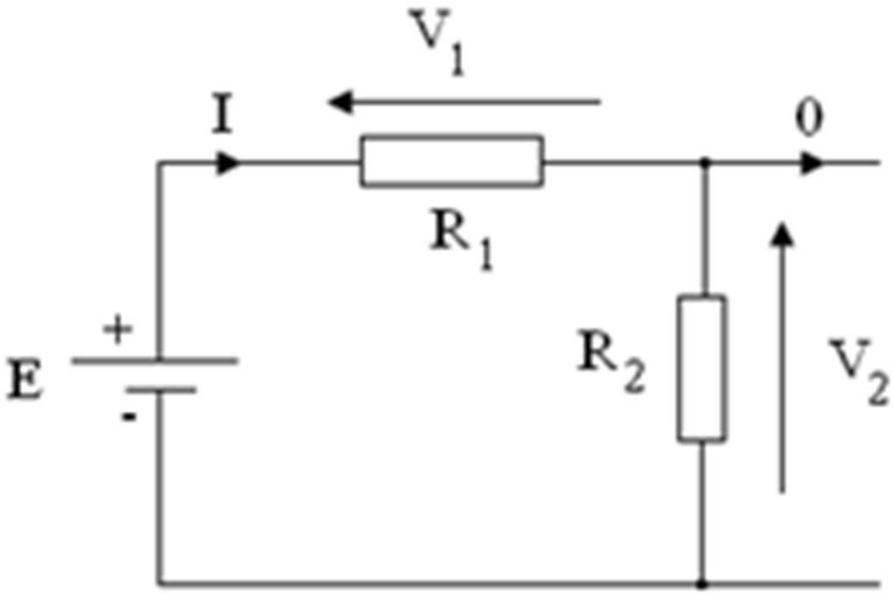
✓ Association en parallèle



On a : $U = RI = R_1 I_1 = R_2 I_2 = \ldots = R_i I_i = \ldots = R_n I_n$

$$I = \frac{U}{R} = \sum_i I_i = \sum_i \frac{U}{R_i} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{R} = \sum_i \frac{1}{R_i}$$

b- Diviseur de tension



R_1 et R_2 en série

$\Rightarrow$ parcourues par le même courant.

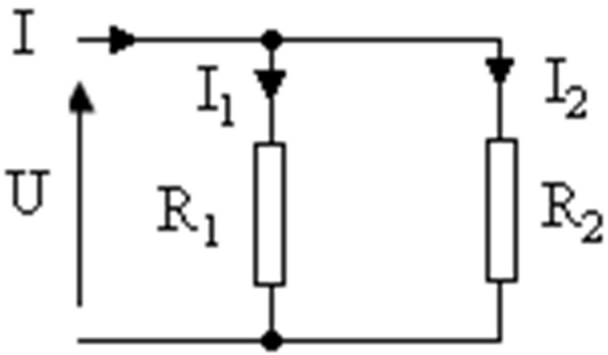
$$E = (R_1 + R_2)I \quad \Rightarrow \quad I = \frac{E}{(R_1 + R_2)}$$

$$V_1 = R_1 I = \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} E < E$$

$$V_2 = R_2 I = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} E < E$$

c- Diviseur de courant:

Les résistances R_1 et R_2 associées en parallèle :



$$U = R_{équ.} I = \frac{R_1 \times R_2}{(R_1 + R_2)} I = R_1 I_1 = R_2 I_2$$

$$\Rightarrow \quad I_1 = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} I \quad \text{et} \quad I_2 = \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} I$$

4.2 Loi d'Ohm généralisée

Elle permet de déterminer la ddp entre 2 points quelconques d'un circuit.

En choisissant un chemin quelconque de A vers B :

$$V_A - V_B = I \sum R - \sum E + \sum E'$$

E est une f.é.m, E' est une f.c.é.m

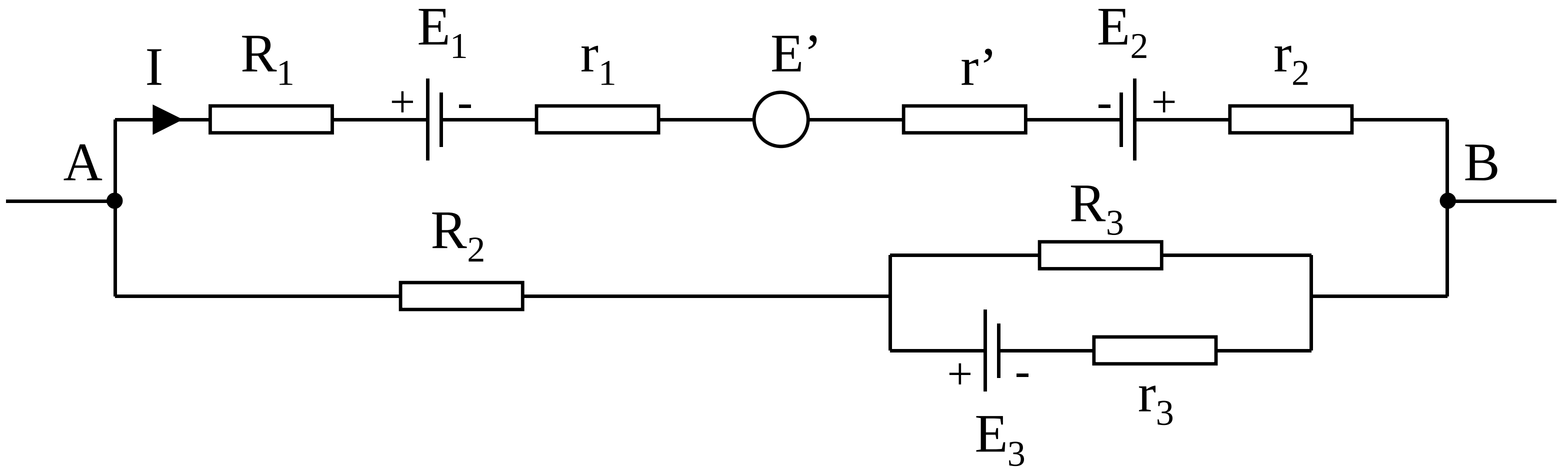
Convention :

I est positive si le sens choisi est le sens de déplacement, négative dans le cas contraire,

E a le signe de la borne par laquelle on sort du générateur, quand on va de A vers B,

E' a le signe de I.

Exemple :

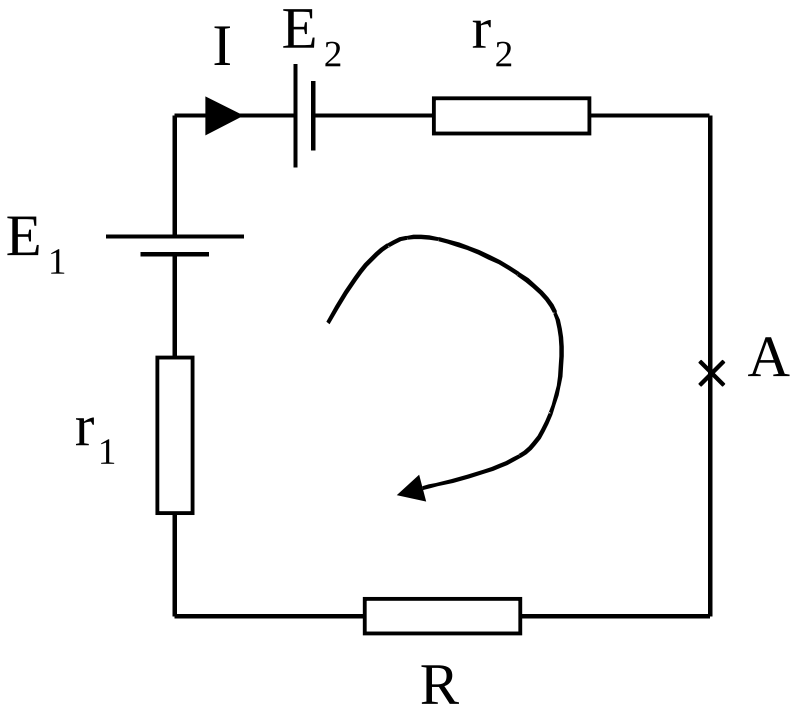


$$V_A - V_B = R_1 I + E_1 + r_1 I + E' + r' I - E_2 + r_2 I$$

4.3 Loi de Pouillet

- ✓Application de la loi d'Ohm généralisée à une maille.
- ✓Elle permet de déterminer le sens et l'intensité du courant dans une maille.

Exemple:



$$V_A - V_A = 0 = RI + r_1 I - E_1 + E_2 + r_2 I$$

$$\Rightarrow I = \frac{E_1 - E_2}{r_1 + r_2 + R}$$

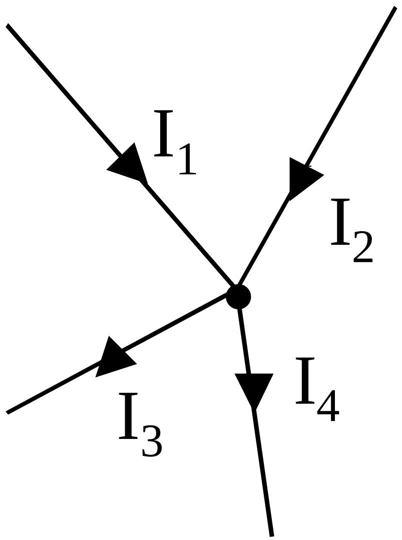
4.4 Loi de Kirchhoff aux nœuds

La somme algébrique des courants relatifs à un nœud est nulle :

$$\sum_k \varepsilon_k . I_k = 0$$

$$\text{avec} \begin{cases} \varepsilon_k = +1 & \text{si le courant d'intensité } I_k \text{ se dirige vers le noeud} \\ \varepsilon_k = -1 & \text{si le courant d'intensité } I_k \text{ quitte le noeud} \end{cases}$$

Exemple :



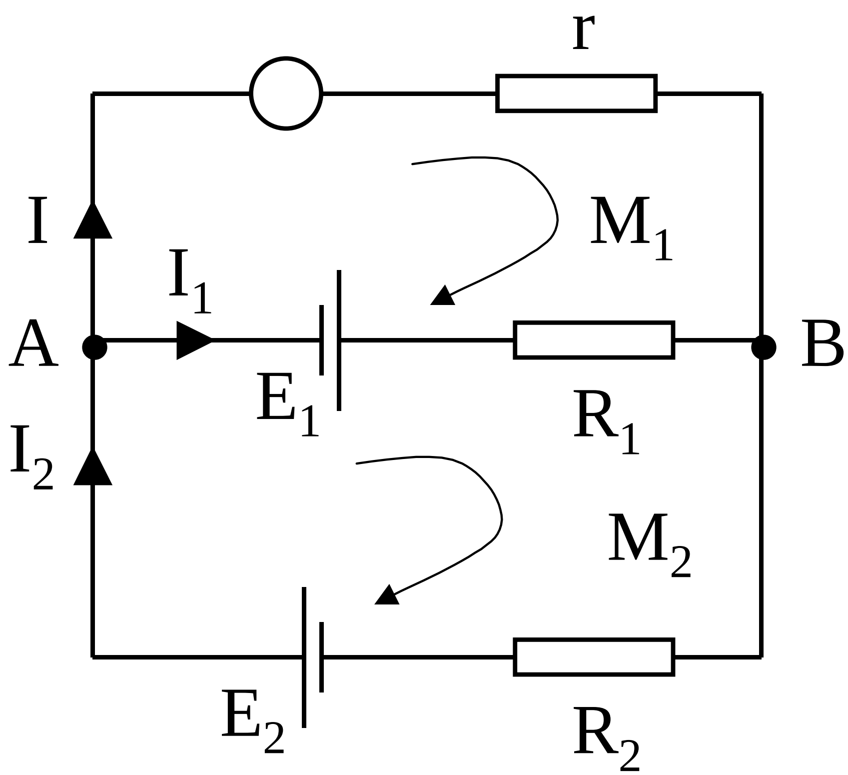
$$- I_1 - I_2 + I_3 + I_4 = 0$$

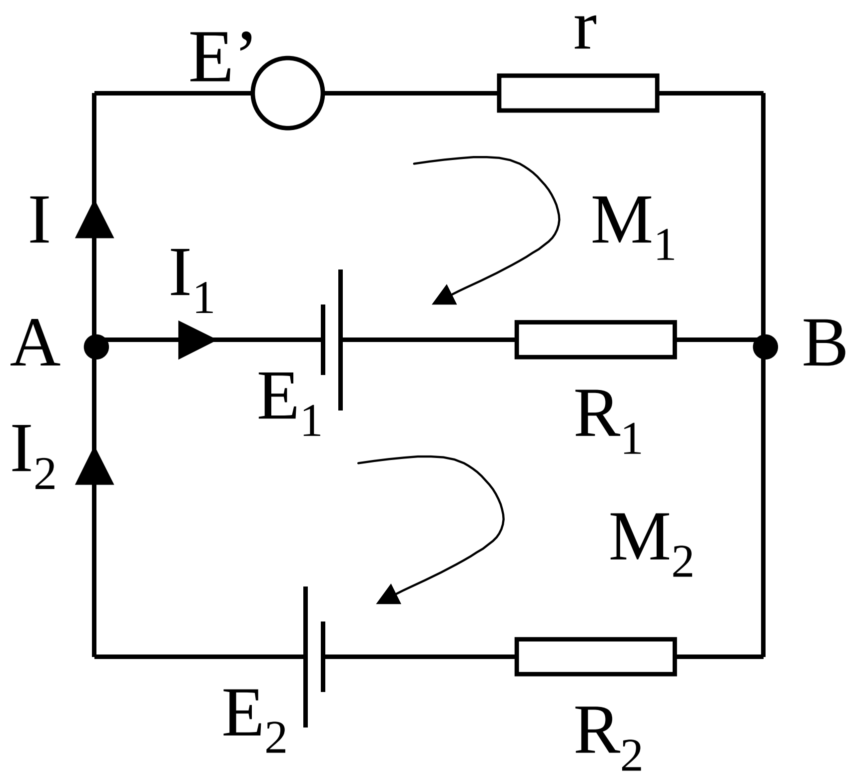
$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$

4.5 Loi de Khirchoff aux mailles

La somme algébrique des tensions d'une maille est nulle : $\sum U_i = 0$

Exemple :





Maille M1 $\Rightarrow$ $-R_1 I_1 + E_1 + rI + E' = 0$

Maille M2 $\Rightarrow$ $R_2 I_2 - E_2 - E_1 + R_1 I_1 = 0$

Nœud A : $I_2 = I + I_1$

5. Théorèmes généraux

5.1 Extinction des sources

Une source de tension est éteinte lorsqu'on annule la tension à ses bornes: elle se comporte alors comme un simple fil fermant le circuit.

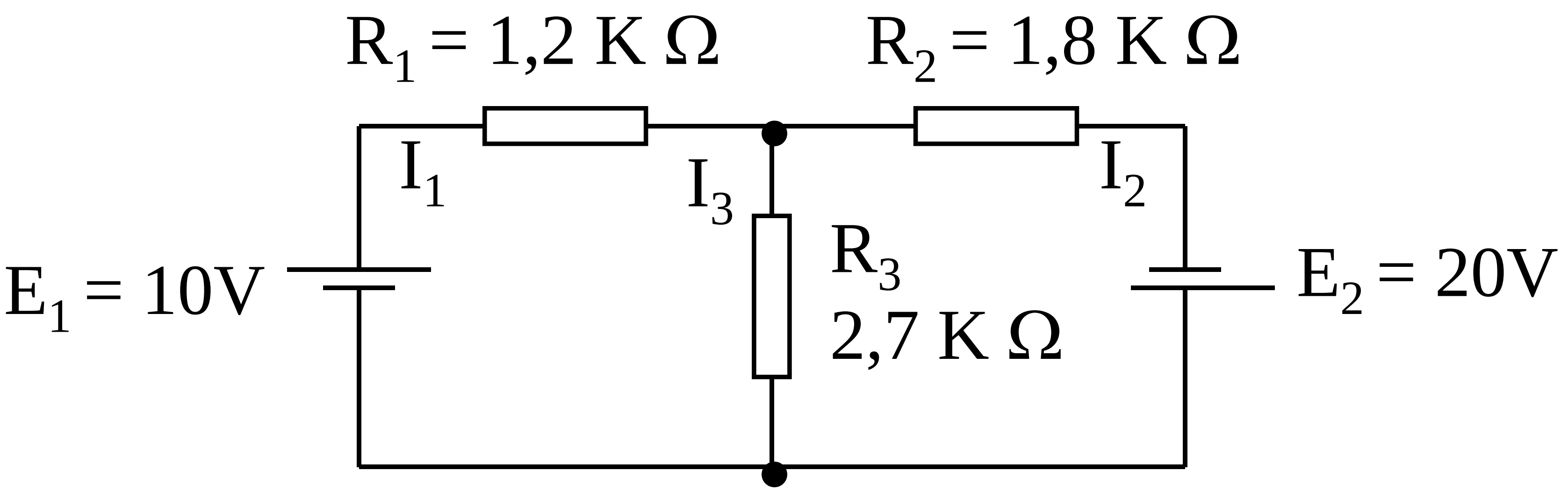
Une source de courant est éteinte lorsqu'on annule son courant de court-cicuit: elle se comporte alors comme un circuit ouvert.

5.2 Théorème de superposition

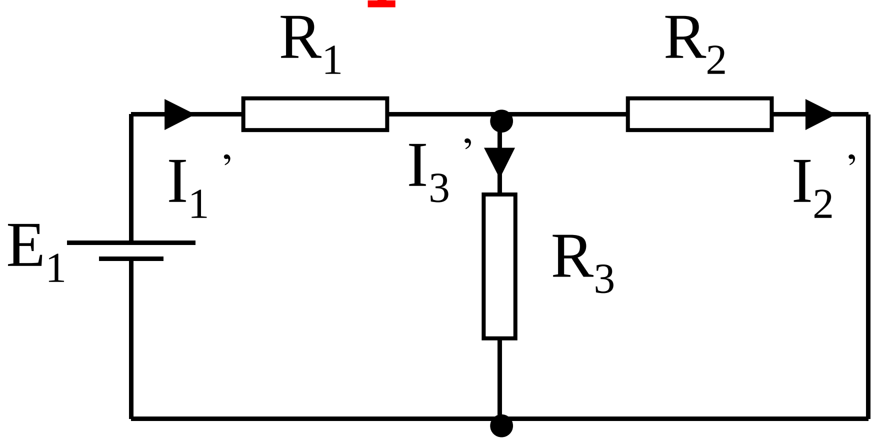
Si dans un circuit électrique on superpose plusieurs générateurs, l’intensité de courant dans une branche est égale à la somme algébrique des intensités dans cette branche dues à chacun des générateurs supposé seul.

Exemple:

Calculer les courants des branches du circuit suivant :



a- La source E_1 existe seule ($E_2=0$)

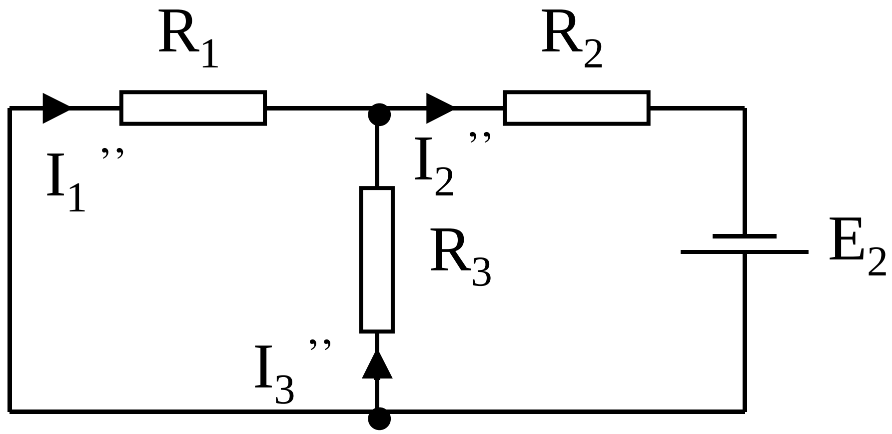


$$I_1' = \frac{E_1}{R_1 + \dfrac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = 4{,}386\ \text{mA} \quad \text{(loi de Pouillet)}$$

$$I_2' = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot I_1' = 2{,}632\ \text{mA} \quad \text{(diviseur de courant)}$$

$$I_3' = I_1' - I_2' = 1{,}754\ \text{mA}$$

b- La source E_2 existe seule (E_1=0)



$$I_2'' = \frac{E_2}{R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}} = 7{,}602\ \text{mA} \quad \text{(loi de Pouillet)}$$

$$I_1'' = \frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot I_2'' = 5{,}263\ \text{mA} \quad \text{(diviseur de courant)}$$

$$I_3'' = I_2'' - I_1'' = 2{,}339\ \text{mA}$$

D'où le résultat final:

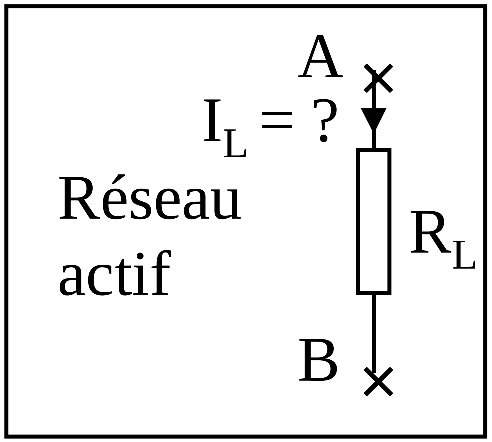
$I_1 = I'_1 + I''_1 = 4,386 + 5,263 = 9,649$ mA

$I_2 = I'_2 + I''_2 = 2,632 + 7,602 = 10,234$ mA

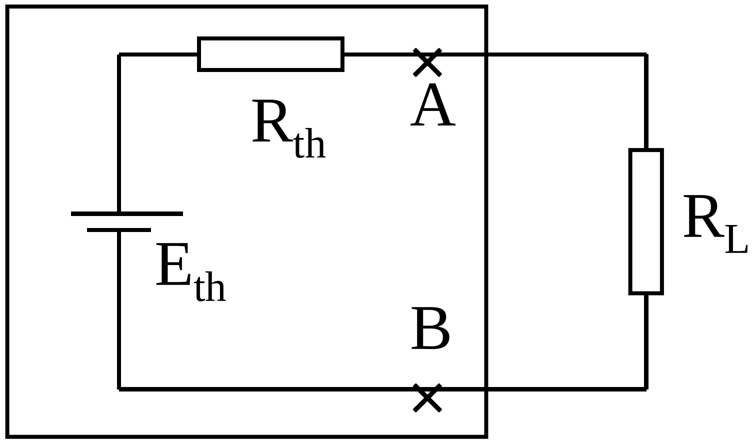
$I_3 = I''_3 - I'_3 = 2,339 - 1,754 = 0,585$ mA

5.3 Théorème de Thévenin:

Le courant débité dans une branche AB d’un réseau actif est égal à celui qu’y produit un générateur fictif de f.é.m E_{th} et de résistance R_{th}



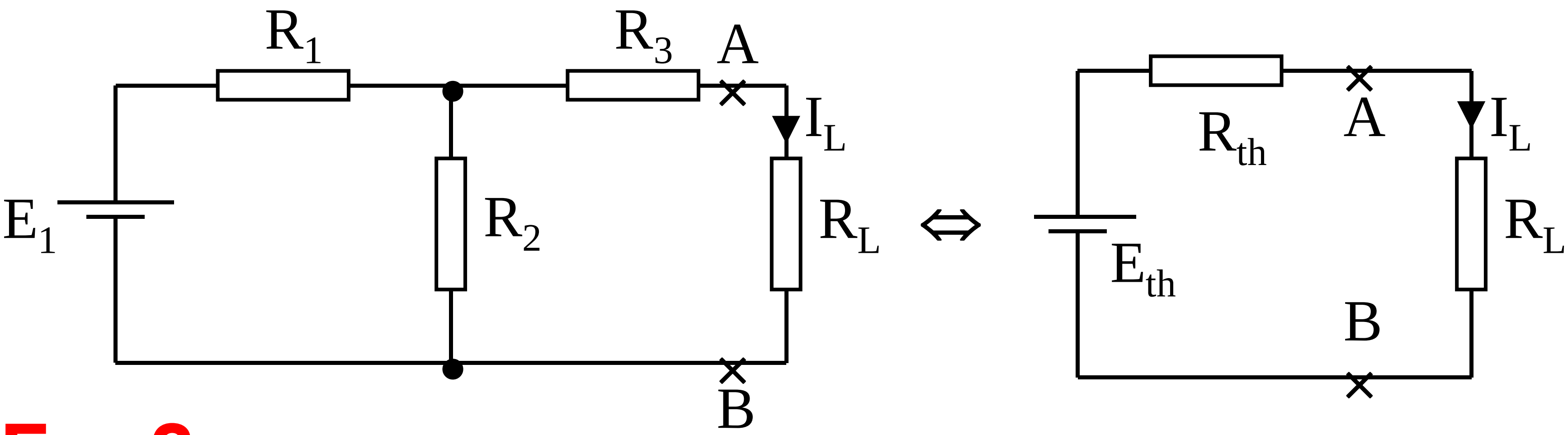
⇒



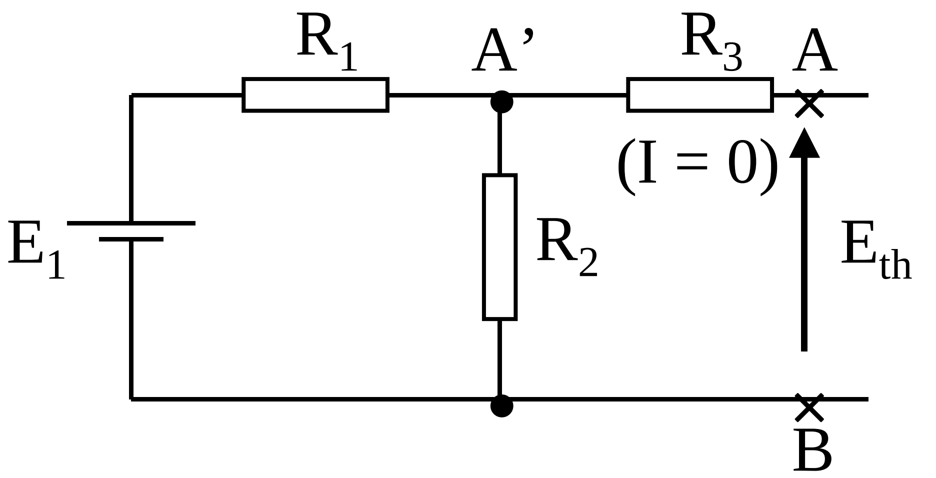
- **Eth égale à la tension entre A et B en circuit ouvert (c.à.d sans la branche AB).**

- **Rth égale à la résistance équivalente ente les points A et B (obtenu en remplaçant tous les générateurs par leurs résistances internes).**

Exemple :

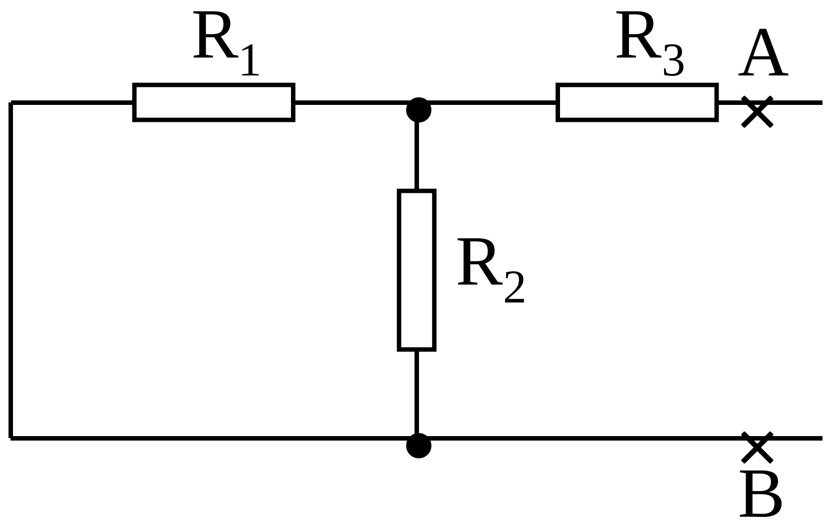


E_{th}=?



$$E_{th} = V_{AB} = V_{A'B} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E$$

R_{th}=?

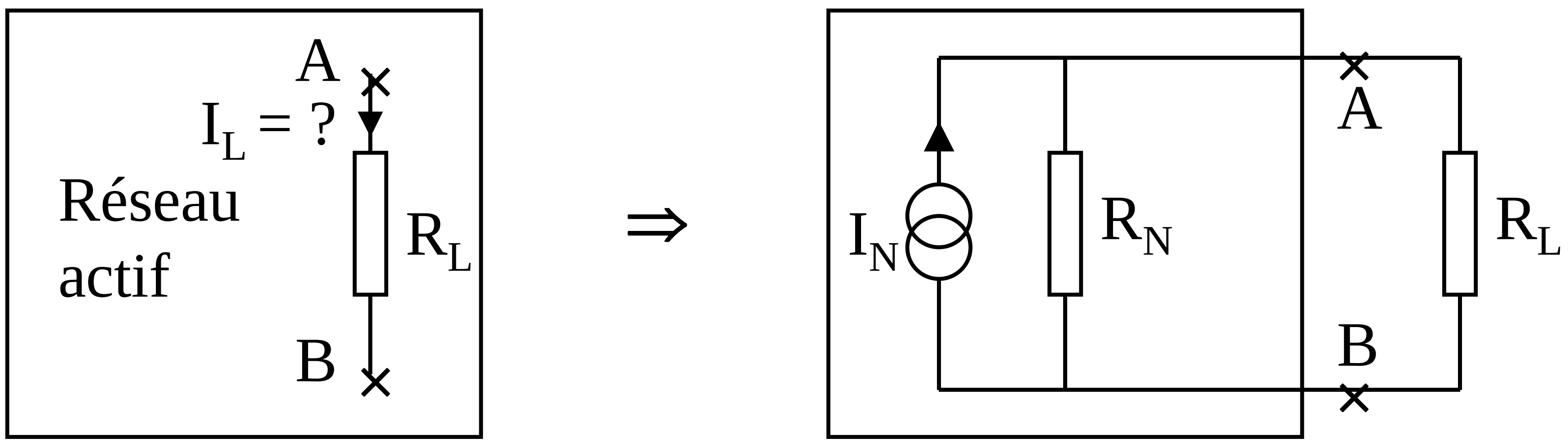


$$R_{th} = R_{\text{équivalente}} \text{ entre A et B} = (R_1 // R_2) + R_3$$

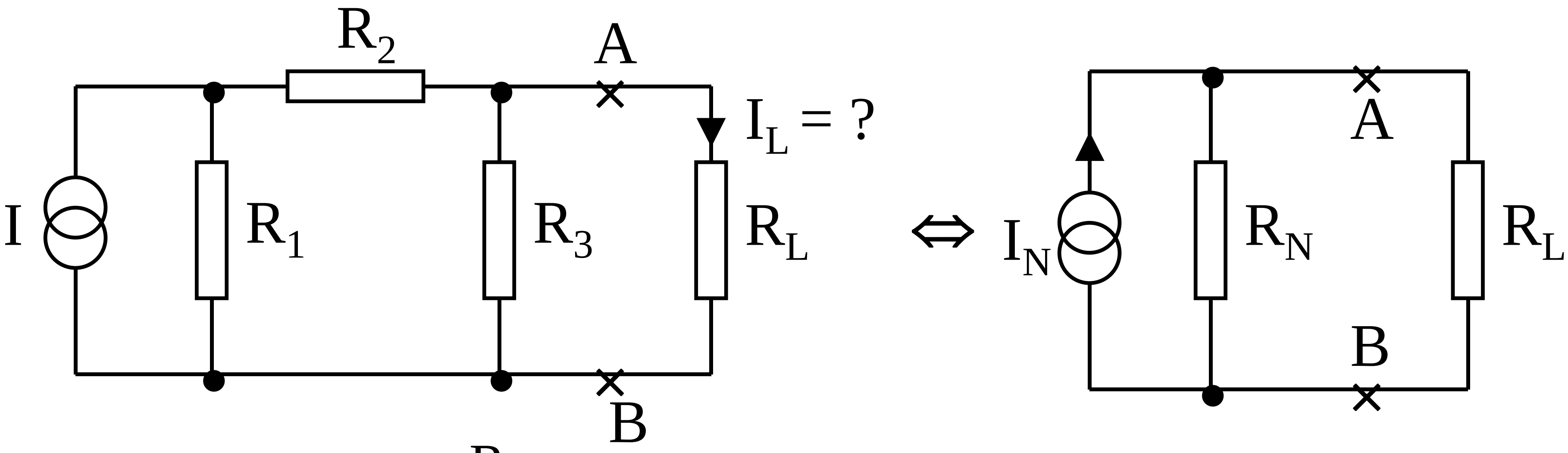
$$= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3$$

5.4 Théorème de Norton

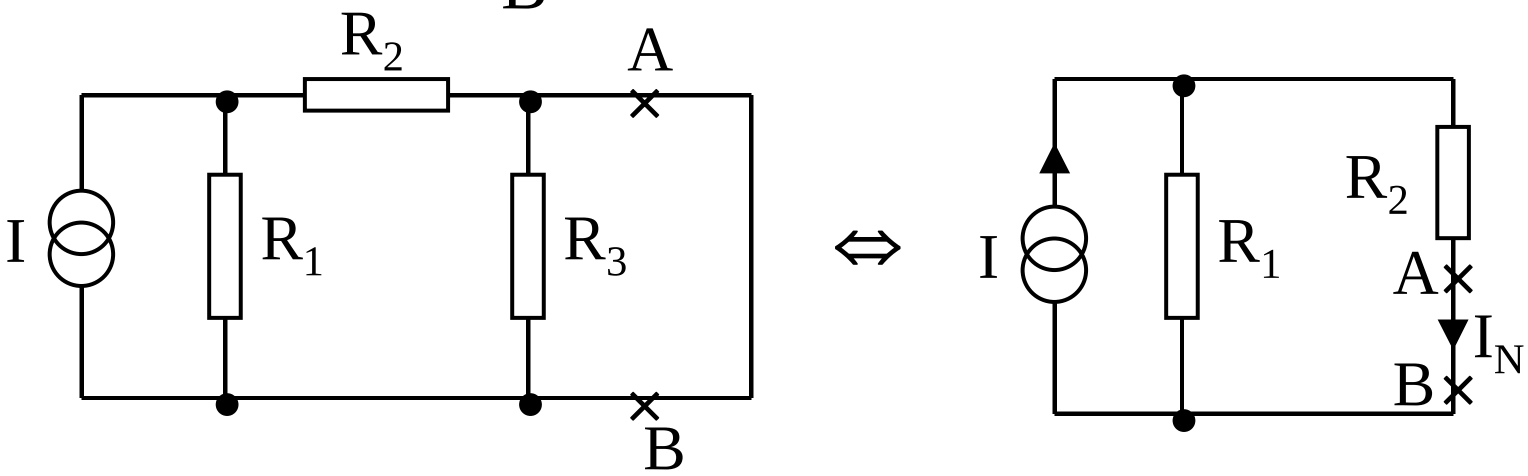
Le théorème de Norton est le duale du théorème de Thévenin.



Exemple :

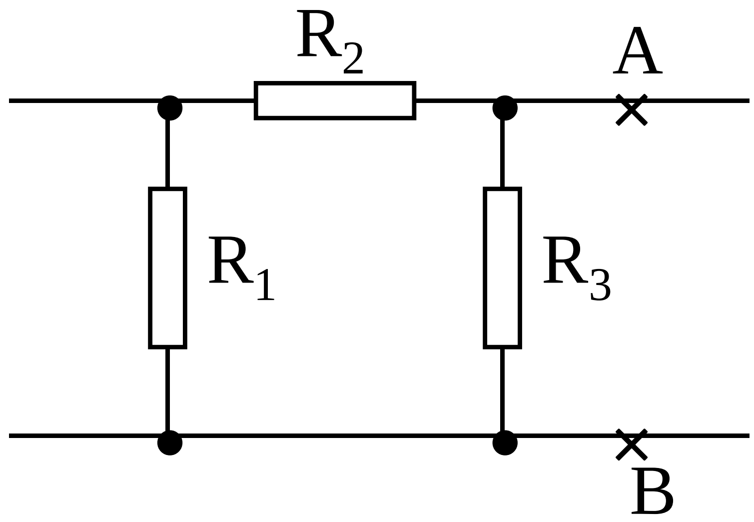


I_N=?



$$I_N = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I$$

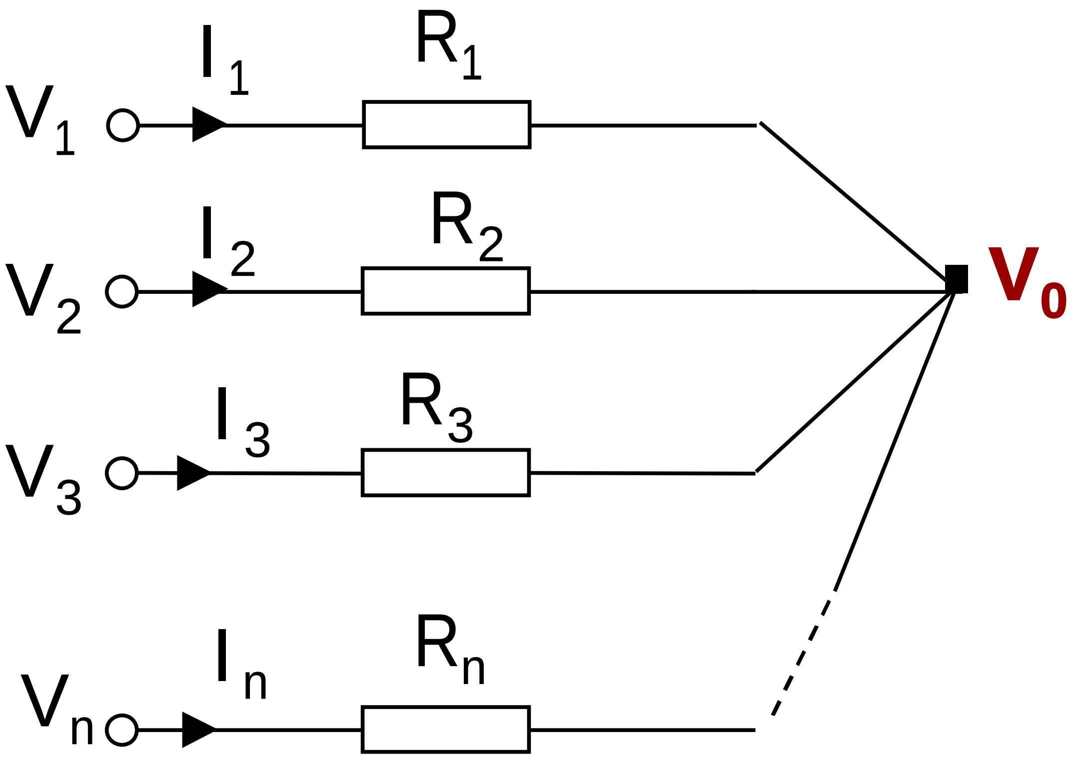
$R_N = ?$



$$R_N = R_{\text{équivalante}}\ \text{entre A et B} = (R_1 + R_2) /\!/ R_3$$

$$= \frac{(R_1 + R_2) R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

5.5 Théorème de Millman



$$V_1 - V_0 = R_1 I_1$$

$$V_2 - V_0 = R_2 I_2$$

$$V_3 - V_0 = R_3 I_3$$

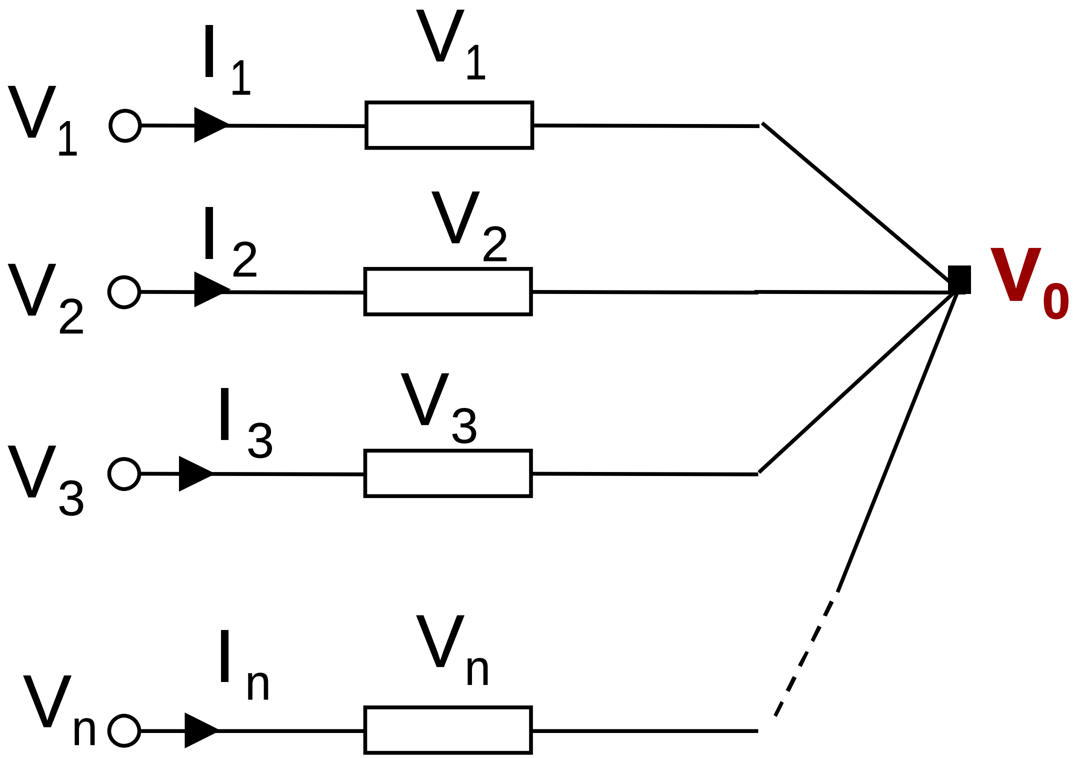
....

$$V_n - V_0 = R_n I_n$$

Loi de Kirchhoff en courant:

$$I_1 + I_2 + \ldots + I_n = 0 \qquad \Rightarrow$$

Théorème de Millman:



$$V_0 = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \ldots + \frac{V_n}{R_n}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots + \frac{1}{R_n}}$$

6.Circuits électriques en régime sinusoïdal

Soit un signal sinusoïdal: $v_1(t) = \hat{v}_1 \sin(\omega t + \varphi)$

$\hat{v}_1$: *valeur maximale ou amplitude*

$\omega = 2\pi f$: *pulsation*

φ : *phase à l'origine*

Considérons un autre signal sinusoïdal:

$$v_2(t) = \hat{v}_2 \sin(\omega t)$$

$$v_1(t) = \hat{v}_1 \sin(\omega t + \varphi) \qquad et \qquad v_2(t) = \hat{v}_2 \sin(\omega t)$$

φ : déphasage du $v_2(t)$ par rapport au $v_1(t)$

✓**si la phase φ est positive: $v_2(t)$ est en avance sur $v_1(t)$**

✓**si la phase φ est négative: $v_2(t)$ est en retard sur $v_1(t)$**

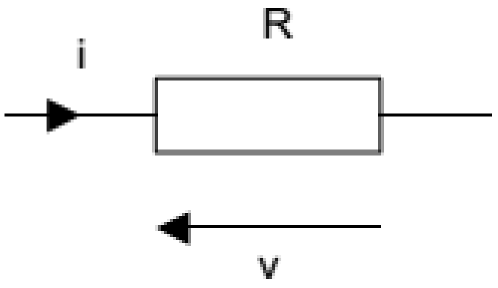
- **valeur moyenne , notée <v(t)> :**

$$V_{moy} = \langle v(t) \rangle = \frac{1}{T}\int_0^T v(t)dt = \frac{1}{T}\int_{T_0}^{T_0+T} v(t)dt$$

- **La valeur efficace V_{eff} :**

$$V_{eff}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T v(t)^2\,dt = \langle v(t)^2 \rangle$$

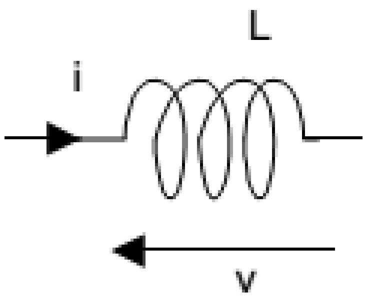
Lois générales des dipôles passifs élémentaires:



$$v = Ri$$

$$i = \frac{1}{R} v = Gv$$

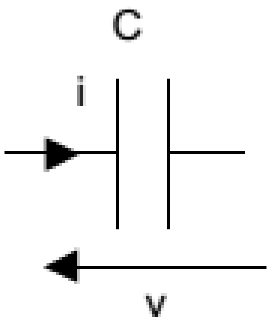
R en ohms (Ω)



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

$$i = \frac{1}{L} \int v dt$$

L en henry



$$v = \frac{1}{C} \int i dt$$

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

C en farad

Impédance complexes:

A tout dipôle linéaire ‘réel’, on associe une impédance complexe $\underline{Z}$ définie par analogie avec la résistance : $\underline{Z} = \frac{\underline{u}}{\underline{i}}$

- Résistance : $\underline{Z_R} = R$
- Capacité : $\underline{Z_C} = \frac{1}{jC\omega}$
- Inductance : $\underline{Z_L} = jL\omega$

Comportement de ces dipôles en régime établi en continu et aux très hautes fréquences :

$\omega \to 0$	$Z_L \to 0$	Inductance équivalente à un court-circuit (fil) en très basses fréquences
$\omega \to \infty$	$Z_L \to \infty$	Inductance équivalente à circuit ouvert en hautes fréquences
$\omega \to 0$	$Z_C \to \infty$	Capacité équivalente à circuit ouvert en très basses fréquences
$\omega \to \infty$	$Z_C \to 0$	Capacité équivalente à un court-circuit (fil) en hautes fréquences

Remarques:

1. Les lois d'association des impédances sont les mêmes que les lois relatives aux résistances:

- en série les impédances complexes s'ajoutent,
- en parallèle les inverses des impédances s'ajoutent

2. Les théorèmes généraux sont valables
:
avec les impédances complexes.

Exemples :

- **Loi d'Ohm**

Pour un dipôle passif d'impédance complexe : $\underline{Z}$

$$\underline{U} = \underline{Z}.\underline{I}$$

- **Théorème de Thévenin**

Tout réseau dipolaire, de borne A et B, est équivalent à un générateur de Thévenin:

- **de f.é.m égale à la ddp entre A et B en circuit ouvert**
- **d'impédance $\underline{Z}_{Th}$ égale à l'impédance équivalente entre A et B, à sources éteintes.**

Notation complexe

Considérons un signal sinusoïdal :

$$v(t) = V_{eff}\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi).$$

On lui associe un signal complexe :

$$\underline{v}(t) = V_{eff}\sqrt{2}e^{j(\omega t + \varphi)} = V_{eff}\sqrt{2}e^{j\varphi} \times e^{j\omega t}$$

$\underline{V} = V_{eff}\sqrt{2}e^{j\varphi}$: amplitude complexe ou phaseur

La valeur réelle du signal est la partie imaginaire du $\underline{v}(t)$ **:**

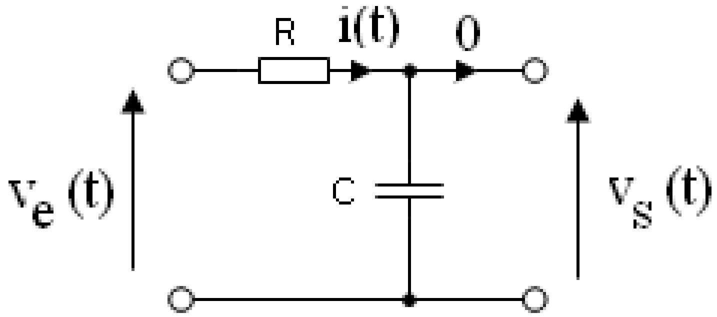
$$v(t) = Im(\underline{v}(t))$$

Avantage de la notation complexe

Simplification des équations différentielles:

L'opération de dérivation et d'intégration devient alors une simple multiplication ou division par jω.

Exemple:



$$avec \quad v_e(t) = \hat{v}_e \sin \omega t \quad et \quad v_s(t) = \hat{v}_s \sin(\omega t + \varphi)$$

$$On\ a: \quad v_e(t) - v_s(t) = Ri(t) \qquad avec\ i(t) = C\frac{dv(t)}{dt}$$

$$\frac{dv_s(t)}{dt} + \frac{1}{RC}v_s(t) = \frac{1}{RC}v_e(t)$$

$$\frac{dv_s(t)}{dt}+\frac{1}{RC}v_s(t)=\frac{1}{RC}v_e(t)$$

Notation complexe:

$$\underline{v}_e(t)=\hat{v}_e\, e^{j\omega t} \qquad et \quad \underline{v}_s(t)=\hat{v}_s\, e^{j\varphi}\, e^{j\omega t}$$

L'équation différentielle devient :

$$(j\omega).\underline{v}_s(t)+\frac{1}{RC}\underline{v}_s(t)=\frac{1}{RC}\underline{v}_e(t)$$

Soit : $$\underline{v}_s(t)=\frac{1}{1+jRC\omega}.\underline{v}_e(t)$$

d'où: $$v_s(t)=\frac{1}{1+jRC\omega}.v_e(t)$$