Chapitre I : Régime continu et Théorèmes fondamentaux

I. 1. NOTIONS DE BASE DE L'ELECTRICITE

I. 1.1. GRANDEURS ÉLECTRIQUES

a) Charge électrique et courant électrique

La charge élémentaire « $-q_e$ » est celle de l'électron. Il s'agit d'une charge négative exprimée en coulomb (C) et qui vaut : $-q_e = -1{,}60 \times 10^{-19}$ C. Toute charge Q est multiple de la charge élémentaire ou charge de l'électron q_e.

- Principe de quantification : Q = n q_e (où n est un nombre entier)

L'intensité du courant est égale à la valeur absolue de la quantité d'électricité Q transportée par les porteurs de charge qui traversent une section de conducteur pendant une durée Δt divisée par cette durée.

$$I = \frac{|Q|}{\Delta t}$$

Dans le système international, I s'exprime en Ampère (A) Q en coulomb (C) Δt en second (s)

Le sens conventionnel du courant électrique est le sens inverse du mouvement des électrons (q < 0)

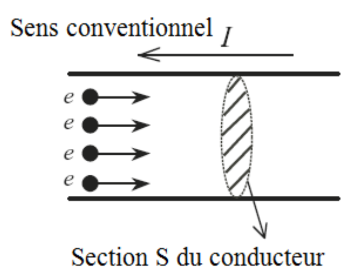
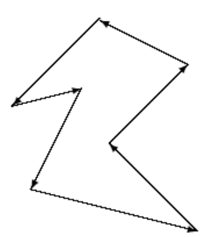


Figure I. 1 : Déplacement des charges négatives et sens du courant dans un conducteur.

b) Différence de potentiel

Au repos, les charges électriques d'un conducteur sont en mouvement continuel sous l'effet de l'agitation thermique:



Pour mettre en mouvement ces charges dans une direction donnée, il est nécessaire d'appliquer un *champ électrique* aux bornes du conducteur. En appliquant le potentiel électrique V1 et le potentiel V2 à ces deux bornes, on crée une différence de potentiel qui met les électrons en mouvement. La valeur de la différence de potentiel est appelée la tension, et son unité est le Volt (symbole V). On représente une *différence de potentiel* par une flèche à côté du composant, comme sur le schéma suivant :

c) Énergie et puissance électrique

Soit u(t) la différence de potentiel entre le point A et le point B à un instant déterminé et soit i(t) le courant qui circule entre A et B au même instant. Nous parlons dans ce cas de grandeurs électriques instantanées. La puissance instantanée est :

- p(t) = u(t).i(t) exprimée en watt (W)

Il est donc possible de déterminer, pendant l'intervalle de temps considéré« Δt », la quantité d'énergie dissipée.

$$W = \int_0^{\Delta t} p(t)dt = \int_0^{\Delta t} u(t).i(t)dt \quad \text{(En J)}$$

Remarque : Ne pas confondre l'unité de la puissance qui est le watt, notée« W » et l'énergie ou travail qui est souvent désigné en physique par la lettre « W ».

I. 1.2. Matériaux en électricité

On distingue 3 types de matériaux :

- ***Les conducteurs :*** matériaux dans lesquels un champ très faible suffit à fournir une énergie permettant le déplacement des électrons libres (porteurs de charges arrachés à chaque atome). On a un à deux électrons libres en moyenne par atome. La concentration en électrons dépend du matériau ; par exemple pour le cuivre, on a 10^{28} électrons par m^3.
- ***Les isolants :*** pas d'électron libre. La qualité de l'isolant dépend de la pureté du matériau

- ***Les semi-conducteurs :*** Un semi-conducteur est généralement défini comme étant un matériau dont la conductivité entre celle d'un métal et celle d'un isolant. Cependant, ce critère à lui seul ne peut pas suffire à définir le comportement d'un semi-conducteur. En effet la conductivité d'un matériau semi-conducteur peut varie avec beaucoup de facteur parmi lesquels on peut citer la température, la concentration d'impuretés, l'éclairement…etc.

I. 2.Circuits électriques

I.2.1. Réseau électrique :

Un réseau ou un circuit électrique est constitué d'un ensemble de composants (ou éléments) interconnectés. En général, le circuit comporte au moins une source de tension ou de courant, des résistances et éventuellement un ou plusieurs composants actifs, comme par exemple les transistors ou les amplificateurs opérationnels.

Exemple de circuit électrique : Les points A, B, C et D du réseau électrique de la figure 1 sont des nœuds de courant. Les portions de circuit telles qu'AC, AD, CB, … sont des branches du réseau. Les circuits électriques fermés (ACDC), (CBDC) et (AFDA) sont des mailles du réseau électrique.

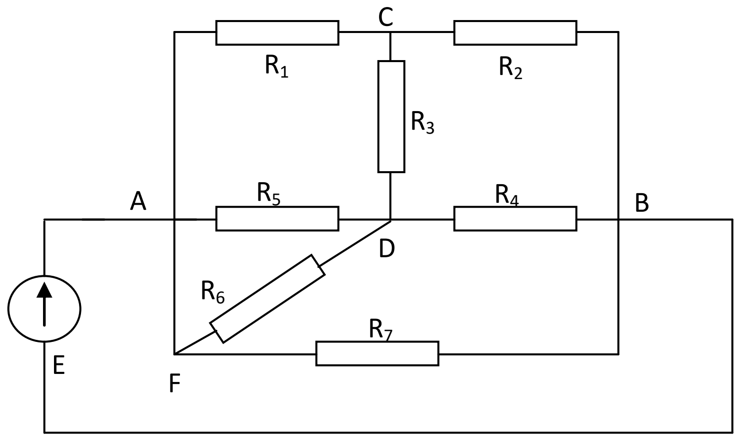
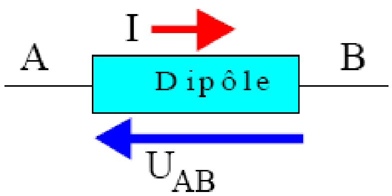


Figure I. 2 : Circuit électrique

I.2.2. Dipôle

Nous appelons dipôle un élément électrique capable ou non de fournir de l'énergie, communiquant avec l'extérieur seulement par deux bornes. À tout instant, le courant entrant par une borne est égal au courant sortant par l'autre. Il est caractérisé par deux grandeur algébrique : l'intensité qui le traverse I et la tension entre ses bornes $U_{AB}=U_A-U_B$

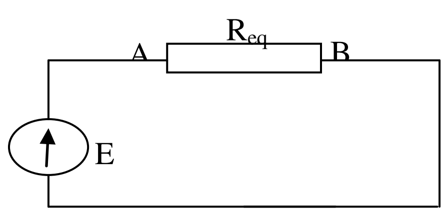


I.2.3. Résistance équivalente :

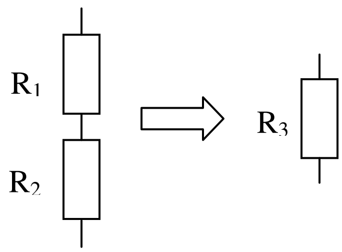
Si on considère un circuit électrique passif alimenté par une source E branchée aux deux nœuds A et B telle que la somme I des intensités qui entrent par le nœud A soit égale à l'intensité qui sort du nœud B, la résistance R_{eq} qui, placée entre ces deux points, laisserait passer le même courant I sous la tension E est donnée par :

$$R_{eq} = \frac{V_A - V_B}{I} = \frac{E}{I}$$

La figure 2 représente le circuit équivalent du circuit représenté par la figure 1, telle que R_{eq} est la résistance équivalente de l'ensemble des résistances de la figure 1 qui sont branchées entre les deux points A et B

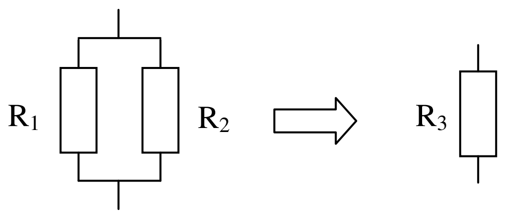


- L'impédance équivalente à deux impédances mises en série est égale à la somme des deux impédances :



Avec : $R_3 = R_1 + R_2$

- L'impédance équivalente à deux impédances mises en parallèle est égale à l'inverse de la somme des inverses des impédances :



Avec : $$R_3 = \frac{R_1.R_2}{R_1+R_2}$$

I.3. Générateurs électriques :

a) Source idéale de tension

Un générateur (source) de tension continue supposé idéal est un générateur qui fournit, entre ses bornes, une différence de potentiel constante, quelle que soit l'intensité du courant qui le traverse, ou en d'autres termes quelle que soit la charge à ses bornes, à condition que cette charge ne soit pas nulle. On représente ce générateur par les symboles suivants :

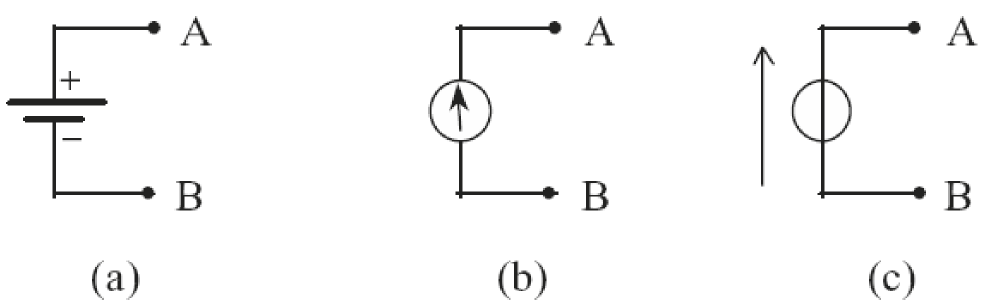


Figure I. 3 : Différents symboles pour une source de tension.

Ce générateur de tension n'existe pas et en pratique, la différence de potentiel en sortie d'un générateur de tension décroit en fonction du courant de sortie (Figure I. 4).

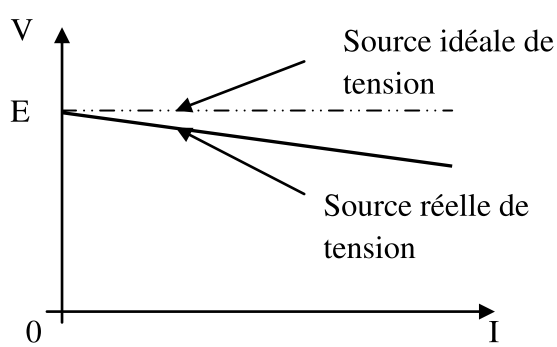
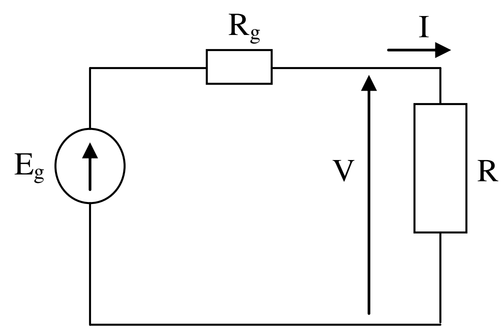


Figure I. 4 : Caractéristique tension-courant d'une source idéale et réelle de tension.

b) Générateur réel de tension

Un générateur réel de tension possède souvent une résistance interne Rg placée en série avec le générateur idéal de tension Eg.



La tension qui apparaît entre les deux bornes du dipôle est égale à la somme algébrique de la tension fournie par le générateur *Eg* et de la chute de tension produite par le passage du courant *I* circulant dans la résistance interne.

$$U = E_g - R_g.I$$

Le générateur de tension est considéré comme source de tension idéale si et seulement si la résistance interne "R_g" du générateur est très petite devant la charge "R" :

c) Source idéale de courant

Un générateur (source) de courant continu supposé idéal est un générateur fixant l'intensité du courant électrique Ig qui le traverse quelle que soit la différence de potentiel U à ses bornes, autrement dit quelle que soit la charge à ses bornes, à condition que cette charge ne soit pas infinie. On représente ce générateur par les symboles suivants :

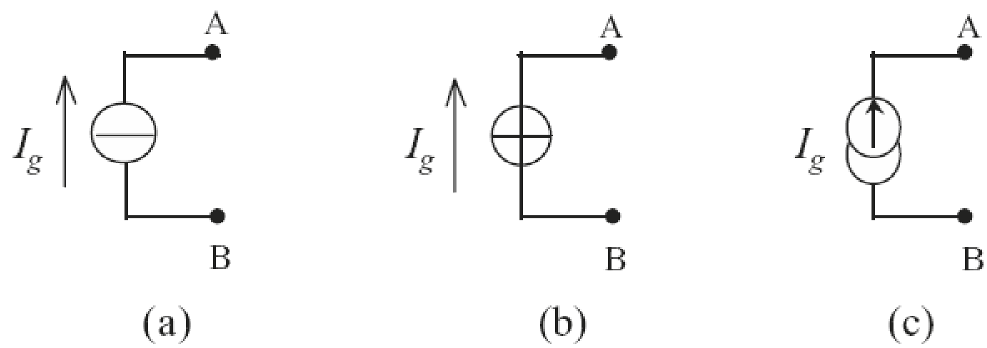


Figure I. 5 : Différents symboles pour une source de courant.

d) Générateur réel de courant

Un générateur réel de courant présente toujours une résistance interne de fuite de courant. Cette résistance *Rg* est montée en parallèle avec le générateur idéal.

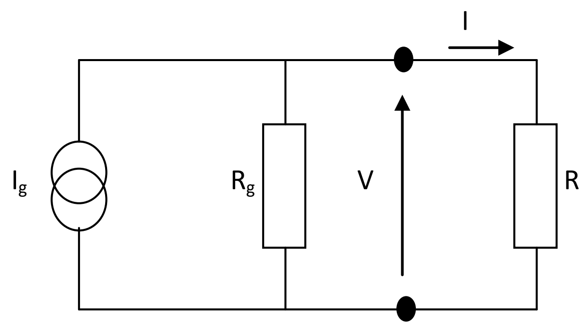


Figure I. 6 : Générateur réel de courant

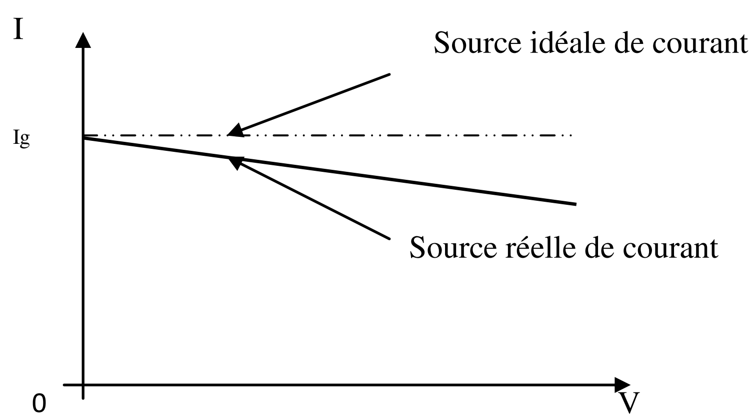


Figure I. 7 : Caractéristique tension-courant d'une source idéale et réelle de courant.

Le courant total *I* qui traverse le dipôle est égal à la somme algébrique du courant dans la résistance interne *Rg* et du courant *Ig* fourni par le générateur.

$$I = I_g - \frac{U}{R_g}$$

Si la résistance interne "R_g" est grande devant la charge extérieure R, le générateur se comporte comme une source de courant idéal, qui débiterait un courant constant, indépendant de la tension V à ses bornes :

I.3.1. Association de générateurs

a) Association de deux générateurs de tension en série

L'association en série de n générateurs de tension de résistance interne R_k et de force électromotrice E_k est équivalente à un générateur de tension unique dont la résistance équivalente est la somme des n résistances, et la force électromotrice équivalente est la somme ***algébrique*** des tensions produites par chaque source (Figure I. 8).

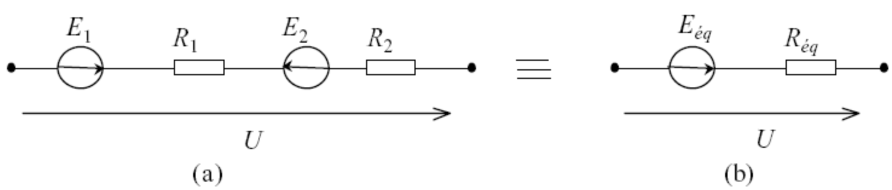


Figure I. 8 : Association en série de deux sources de tensions.

$$E_{éq} = \sum_{k=1}^{n} E_k \quad \text{et} \quad R_{éq} = \sum_{k=1}^{n} R_k$$

b) Association de deux générateurs de tension en parallèle

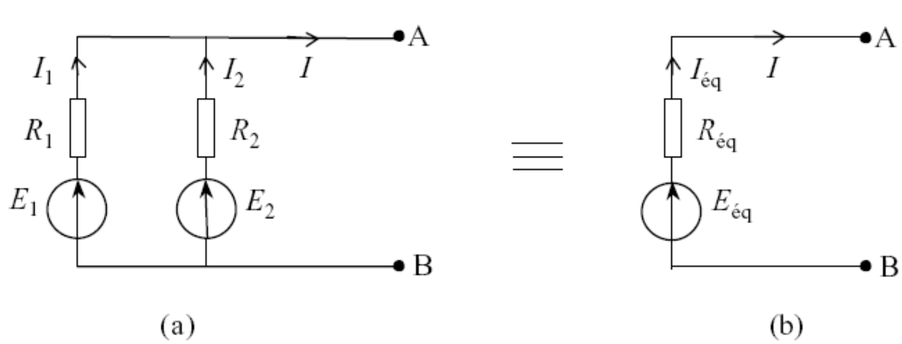


Figure I. 9 : Association en parallèle de deux sources de tensions.

En pratique, exceptionnellement, nous n'associons en parallèle que des générateurs identiques d'amplitude E et de résistance interne R. Dans ce cas, nous pouvons calculer la différence de potentiel qui apparaît entre A et B. Nous déduisons donc le générateur équivalent de la figure I. 9 :

$$E_{\text{éq}} = E \quad \text{et} \quad R_{\text{éq}} = \frac{R}{2}$$

c) Association de deux générateurs de courant en parallèle

L'association en parallèle de n générateurs de courant de résistances internes R_k et de courants I_k est équivalente à un générateur de courant unique, dont la conductance équivalente est la somme des n conductances et le courant équivalent est égal à la somme algébrique des courants produits par chaque source (Figure I. 10).

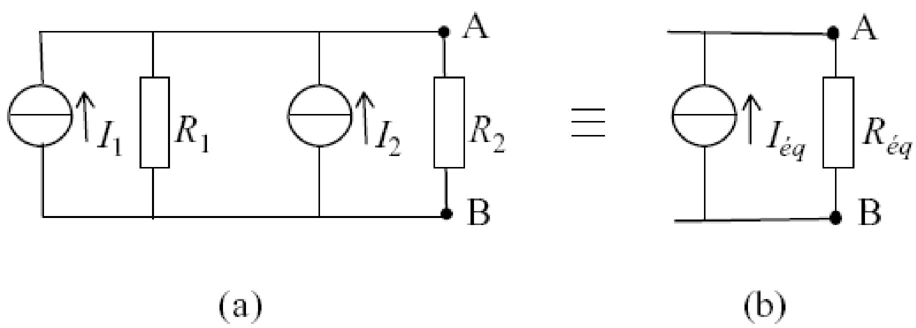


Figure I. 10 : Association en parallèle de deux sources de courants.

$$I_{\text{éq}} = \sum_{k=1}^{n} I_k \quad \text{et} \quad G_{\text{éq}} = \sum_{k=1}^{n} G_k$$

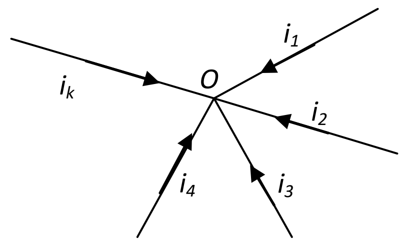
I.4. METHODES D'ANALYSE DES RESEAUX

L'objectif de cette partie consiste à présenter les notions fondamentales sur les réseaux électriques avant de donner les principales méthodes de calcul. Nous nous limiterons au régime statique établi. Dans ce cas, les sources fournissent des tensions et des courants qui sont indépendants du temps.

I.4.1. LOIS DE KIRCHHOFF

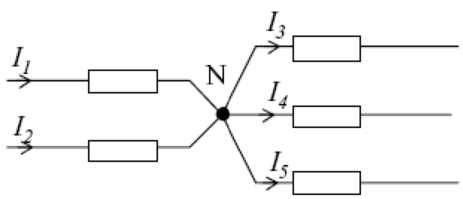
a) Loi de Kirchhoff des nœuds

La somme algébrique des intensités des courants arrivant à un nœud est nulle.



$$\sum_{k=1}^{n} i_k = 0$$

Nous pouvons formuler la loi des nœuds autrement : La somme des intensités des courants qui arrivent à un nœud est égale à la somme des intensités des courants qui le quittent.



$$I_1+I_2=I_3+I_4+I_5$$

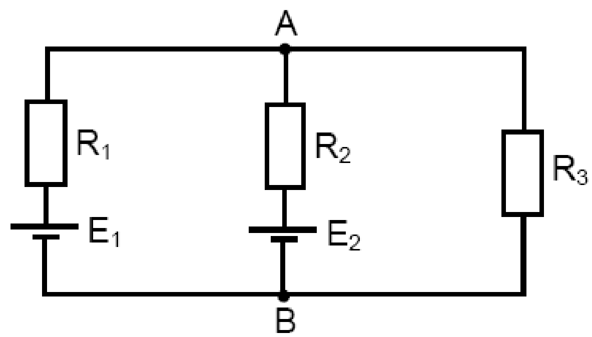
b) Loi de Kirchhoff des mailles

La deuxième loi de Kirchhoff stipule : La somme algébrique des différences de potentiel(ou tension) le long d'une maille comptabilisées dans un sens donné est nulle. Dans le cas général, si nous supposons une maille qui est un contour fermé, constitué de *n* branches, et si nous notons ΔU_k la différence de potentiel aux bornes de la branche numéro « *k* », la loi des mailles s'écrit :

$$\sum_{k=1}^{n} \Delta U_k = 0$$

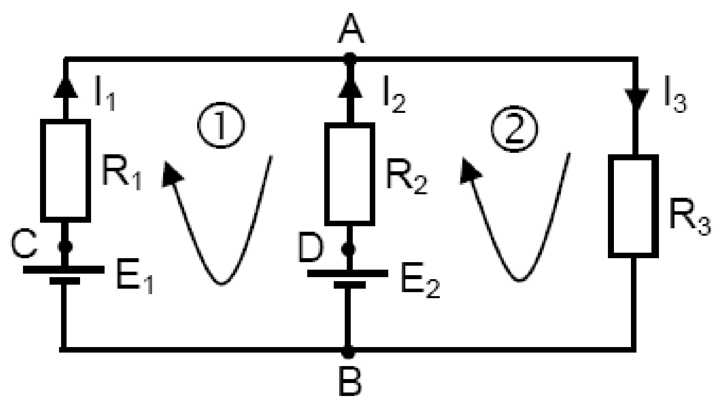
- **Application des lois de Kirchhoff**

Soit le circuit de la figure suivante, On se propose de déterminer les intensités de courants dans les trois branches. Sachant que : R1 = 2 Ω ; R2 = 5 Ω ; R3 = 10 Ω ; E1 = 20 V ; E2 = 70 V



Solution :

Le sens des courants étant inconnues, choisissons-les arbitrairement,



- On a 3 inconnues (I_1, I_2, I_3), il nous faut donc 3 équations indépendantes,
- La loi des Nœuds : Au nœud A : $I_1 + I_2 = I_3$………. (1)
- La loi des mailles :

1er maille - ADBCA: $R_1I_1 - E_1 + E_2 - R_2I_2 = 0 \Rightarrow E_2 - E_1 = R_2I_2 - R_1I_1 \Rightarrow 5\ I_2 - 2\ I_1 = 50$…. (2)

2ème maille - ABDA: $R_3I_3 + R_2I_2 - E_2 = 0 \Rightarrow E_2 = R_2I_2 + R_3I_3 \Rightarrow 5\ I_2 + 10\ I_3 = 70$ ……….. (3)

- Regroupons les 3 équations :

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 & (1) \\ 5\,I_2 - 2\,I_1 = 50 & (2) \\ 5\,I_2 - 10\,I_3 = 70 & (3) \end{cases} \qquad I_2 = \frac{320}{40} = 8\ \text{A} \qquad I_1 = \frac{-50}{10} = -5\ \text{A} \qquad I_3 = 3\ \text{A}$$

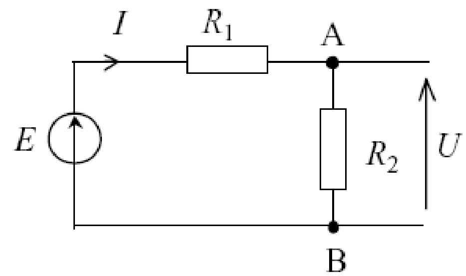
I.5.PRINCIPAUX THÉORÈMES

Nous allons présenter quelques théorèmes généraux permettant de réduire ou de simplifier les calculs sur les circuits électriques en régime statique. Ces théorèmes et méthodes d'étude ne sont valables que pour des réseaux linéaires.

I.5.1. Pont diviseur de tension

Le schéma d'un pont diviseur de tension est donné à la figure I.11.

Figure I. 11 : Schéma du pont diviseur de tension.



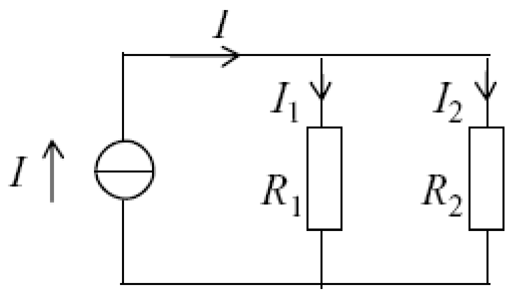
$$U = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E$$

D'une façon générale, la tension aux bornes d'une résistance placée dans un circuit série comportant *n* résistances, alimenté par une source de tension *E* est :

$$U_i = E \frac{R_i}{R_1 + R_2 + \cdots + R_n}$$

I.5.2. Pont diviseur de courant

Le schéma d'un pont diviseur de courant est donné à la figure I.12.



$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I = \frac{G_2}{G_1 + G_2} I$$

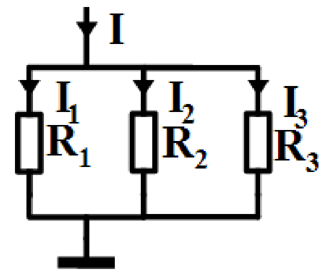
Figure I. 12 : Schéma du pont diviseur de courant.

D'une façon plus générale, le courant traversant une résistance *Ri* placée dans un circuit parallèle comportant *n* résistances, alimenté par une source idéale de courant *I*, est :

$$I_i = I\frac{G_i}{G_1 + G_2 + G_3 + \cdots + G_n}$$

Ou G_i la conductance électrique ($G_i=1/R_i$)

- **Pont à trois branches**



Si on cherche I_1, on ne peut pas appliquer directement la formule obtenue dans le cas du circuit à deux branches. Il faut calculer la valeur de la résistance équivalente aux deux résistances R2 et R3, pour pouvoir appliquer la formule. Cela nous donne :

$$I_1 = I\,\frac{R_{eq}}{R_1 + R_{eq}} \qquad\qquad R_{eq} = R_2//R_3 = \frac{R_2\,R_3}{R_2 + R_3}$$

I.5.3. Théorème de superposition :

Dans un circuit électrique linéaire comprenant plusieurs sources indépendantes, l'intensité de courant électrique dans une branche est égale à la somme ***algébrique*** des intensités produites dans cette branche par chacune des sources considérées isolement, les autres sources étant court-circuités.

Exemple :

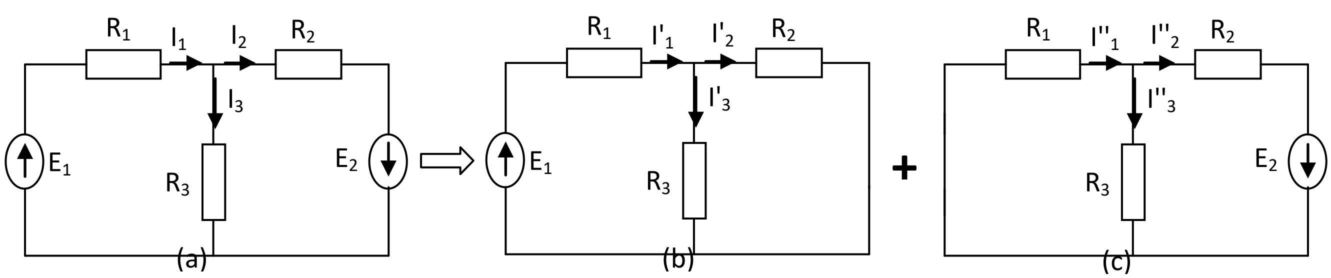


Figure I. 13 : Circuit électrique à deux sources (a) représenté par deux circuits chacun avec une seule source (b) et (c)

Le calcul des courant I_1, I_2 et I_3 s'effectue par le calcul séparément des courant I'_1, I'_2, I'_3 en ignorant la source E_2 et I''_1, I''_2, I''_3 en ignorant la source E_1

$$I_1 = I_1' + I_1'', \quad I_2 = I_2' + I_2'' \text{ et } I_3 = I_3' + I_3''$$

Si on écrit R_{eq23} et R_{eq13} des résistances équivalentes des résistances montées en parallèle respectivement pour les circuits (b) et (c), on peut écrire l'expression des courants :

- Pour le circuit (b) :

$$I'_1 = \frac{E_1}{R_1+R_{eq23}}, I'_2 = \frac{E_1-R_1.I'_1}{R_2}, I'_3 = \frac{E_1-R_1.I'_1}{R_3}$$

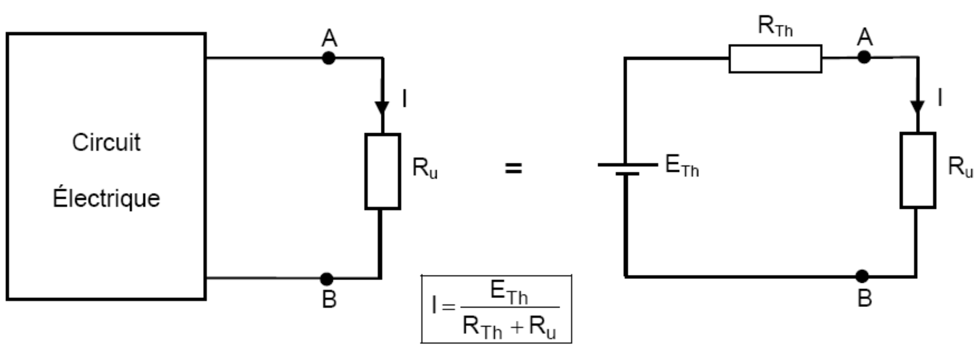
- Pour le circuit (c) :

$$I''_2 = \frac{E_2}{R_2+R_{eq13}}, I''_1 = \frac{E_2-R_2.I''_2}{R_1}, I''_3 = \frac{-E_2+R_2.I''_2}{R_3},$$

I.5.4. Théorème de Thévenin et de Norton :

a) Théorème de Thévenin :

Le théorème de thévenin permet de remplacer un montage complexe par un générateur de tension équivalent avec sa résistance interne équivalente et de calculer ces éléments figure I. 13).



.

Figure I. 13 : Schéma équivalent de Thevenin d’un réseau quelconque

➢ **Principe**

Le théorème de Thevenin permet de transformer un circuit complexe en un générateur de Thevenin dont :

- La valeur de la source de Thévenin E_{Th} (U_{AB}) est donnée par la mesure ou le calcul de la tension de sortie à vide (la charge étant débranchée),
- La valeur de la résistance interne R_{Th} est mesurée ou calculée vues des bornes de sorties A et B, avec les conditions suivantes ;

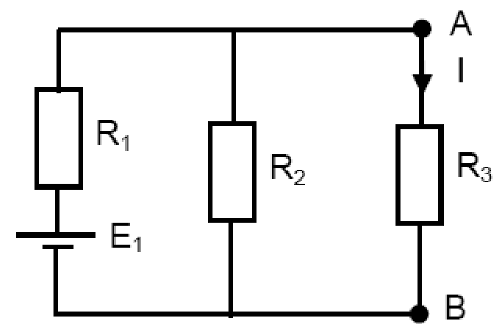
- La résistance de la charge est débranchée,
- Court-circuiter les générateurs de tension, en gardant les résistances internes,
- Débrancher les sources de courants,

➢ **Applications**

On considère le circuit électrique donné par la figure suivante :

-On donne : E = 8 V ; R1 = 4 Ω ; R2 = 12 Ω ; R3 = 9 Ω

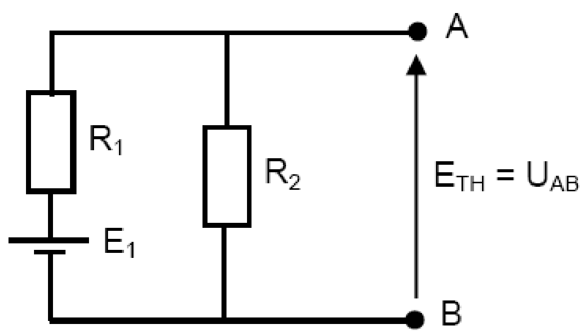
-Calculer le courant *I* qui traverse la résistance R3 en appliquant le théorème de Thevenin,



➢ **Solution :**

1) Calcul de E_{Th}

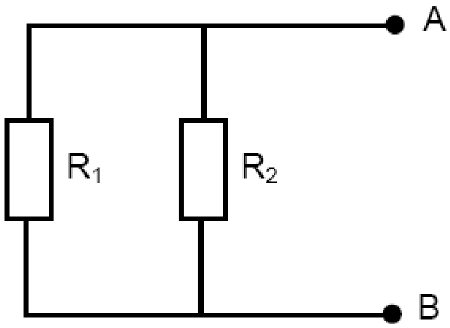
On débranche la résistance R3, la configuration sera donc :



$$E_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E = \frac{12}{4+12} = 6\ V$$

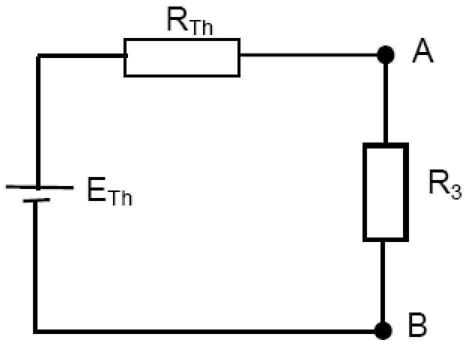
2) Calcul de R_{Th}

R_3 étant toujours débranchée, on court-circuite E, la configuration sera donc :



$$R_{Th} = \frac{R_1.R_2}{R_1 + R_2} = \frac{4 \times 12}{4 + 12} = 3\,\Omega$$

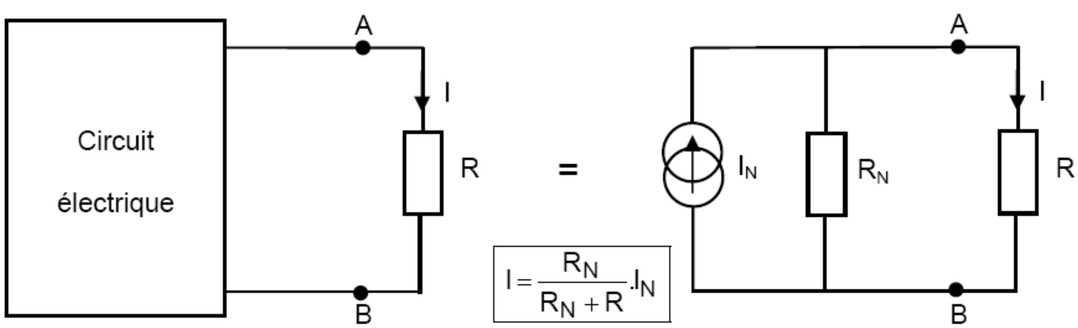
3) Calcul de *I*



$$I = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R_3} = \frac{6}{3 + 9} = 0,5\text{ A}$$

b) Théorème de Norton :

Le théorème de Norton va nous permettre de réduire un circuit complexe en générateur de courant réel. Ce générateur possède une source de courant (I_N) en parallèle avec une résistance (R_N),



$$I = \frac{R_N}{R_N + R}.I_N$$

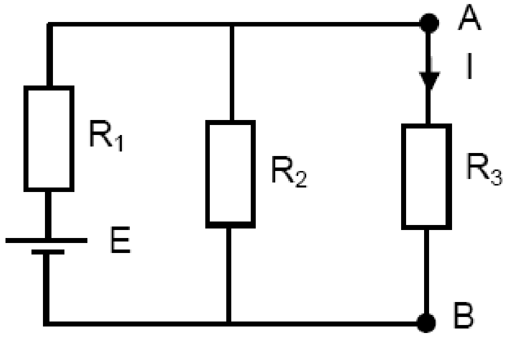
Figure I. 14 : Schéma équivalent de Norton d'un réseau linéaire quelconque.

- **Principe**

Le courant de Norton I_N est obtenu par calcul ou par une mesure après avoir court-circuité les bornes A et B, La résistance interne R_N s'obtient de la même façon que celle du théorème de Thevenin ($R_N = R_{Th}$),

- **Applications**

On considère le circuit électrique donné par la figure suivante :

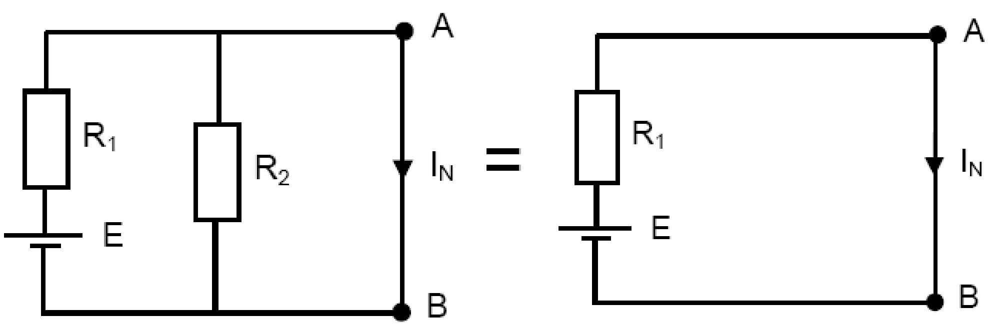


- On donne : E = 8 V ; R1 = 4 Ω ; R2 = 12 Ω ; R3 = 9 Ω
- Calculer le courant I qui traverse la résistance R3 en appliquant le théorème de Norton,

- **Solution :**

1) Calcul de I_N

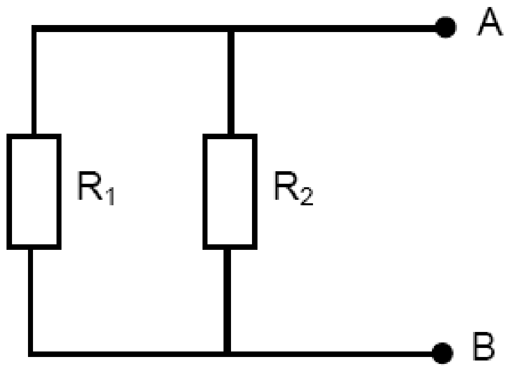
On débranche la résistance R3 et on court-circuite les bornes A et B, la configuration sera donc :



$$I_N = \frac{E}{R_1} = \frac{8}{4} = 2\text{ A}$$

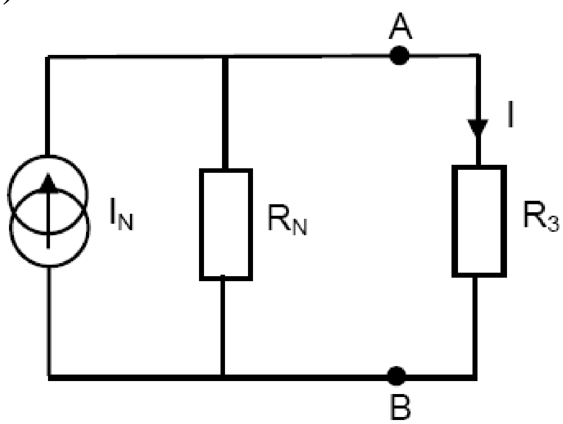
2) Calcul de R_N

R_3 étant toujours débranchée, on court-circuite E, la configuration sera donc :



$$R_{Th} = \frac{R_1.R_2}{R_1 + R_2} = \frac{4 \times 12}{4 + 12} = 3\,\Omega$$

3) Calcul de I



$$I = \frac{R_N}{R_N + R_3} I_N = \frac{3}{3+9} 2 = 0{,}5\text{ A}$$

I.5.5. THEOREME DE MILLMANN

Ce théorème très pratique permet de déterminer la différence de potentiel aux bornes de plusieurs branches en parallèle (U_{AB}),

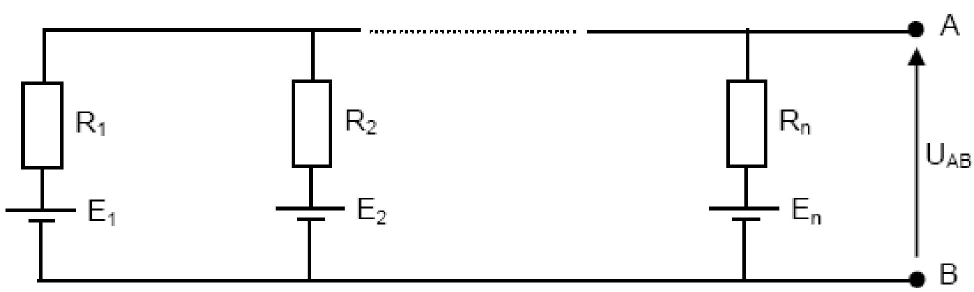


Figure I. 15 : Schéma équivalent d'un circuit simple par Millmann.

- **Principe**

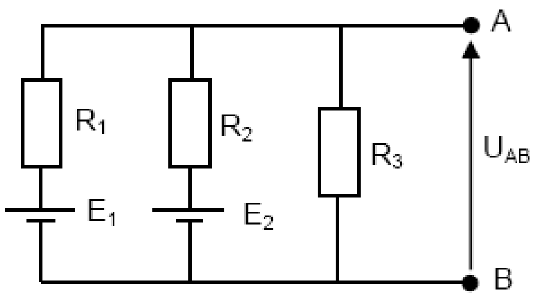
$$U_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{E_i}{R_i}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_i . G_i}{\sum_{i=1}^{n} G_i}$$

Avec :
- i : numéro de la branche
- G_i la conductance électrique ($G_i = 1/R_i$)

Remarque : Si dans une branche, il n'y a pas de générateur, on considère que la f.e.m correspondante est nulle,

- **Applications**

On considère le circuit électrique donné par la figure suivante :



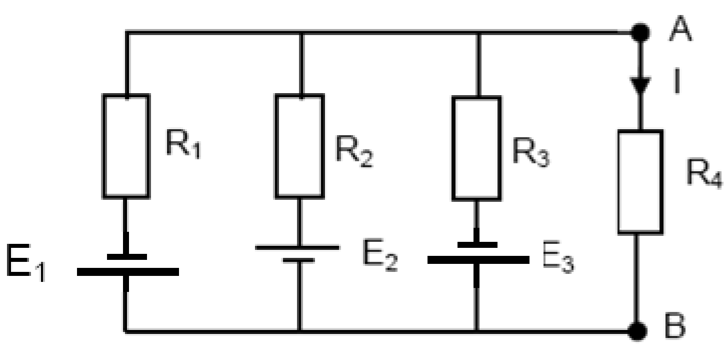
- On donne : $E_1 = 5$ v ; $E_2 = 20$ v ; $R_1 = 5\ \Omega$; $R_2 = R_3 = 10\ \Omega$
- Calculer U_{AB},

Solution :

$$U_{AB} = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + \frac{0}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{\frac{5}{5} + \frac{20}{10} + 0}{\frac{1}{5} + \frac{1}{10} + \frac{1}{10}} = 7{,}5\ \text{V}$$

❖ **<u>Exercice 1</u>**

On considère le circuit électrique donné par la figure suivante :



- On donne : $E_1 = 4$ v ; $E_2 = 5$ v ; $E_3 = 4$ V ; $R_1 = R_3 = 2\ \Omega$; $R_2 = R_4\ 1\ \Omega$
- Calculer U_{AB},

En utilisant le Théorème de Thévenin, calculer I dans R4

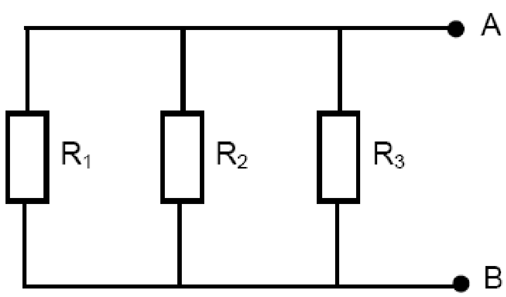
Solution :

En appliquant le Théorème de MILLMANN pour calculer U_{AB} :

Donc

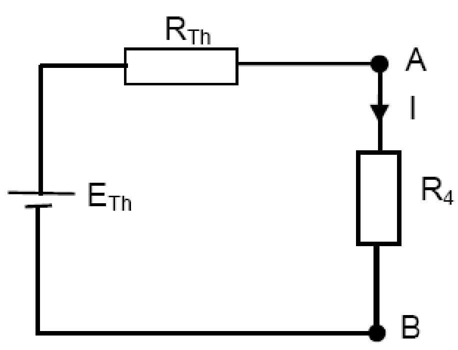
$$U_{AB} = \frac{-\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} - \frac{E_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{-2 + \frac{5}{1} - \frac{4}{2}}{\frac{1}{2} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2}} = 0,\ 5\,V$$

- Calcul de E_{Th} : on remarque que $E_{Th} = U_{AB} = 0,5$ V
- Calcul de R_{Th}



$$R_{Th} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = 0,5\,\Omega$$

- Calcul de I

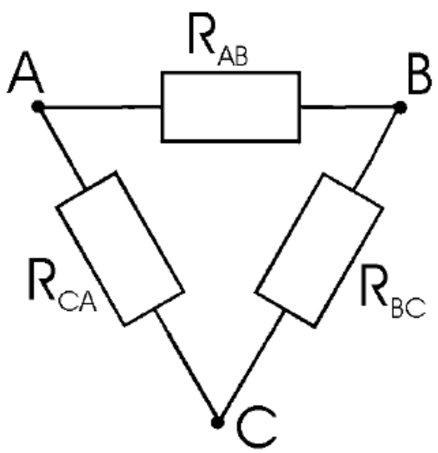


$$I = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R_4} = 0,3\text{ A}$$

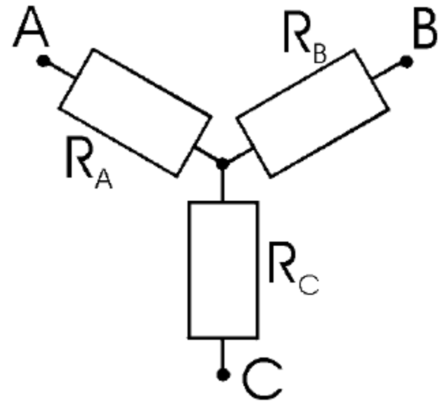
I.5.6. TRANSFORMATION DE KENNELY

Il permet de passer d'un réseau de trois résistances montées en étoile à un réseau de trois résistances montées en triangle et réciproquement,

MONTAGE TRIANGLE



MONTAGE ETOILE



Pour passer du montage triangle au montage étoile il faut utiliser les formules suivantes :

$$\mathbf{R_A=(R_{AB}\ x\ R_{AC})\ /\ (R_{AB}+R_{AC}+R_{BC})}$$

$$\mathbf{R_B=(R_{BC}\ x\ R_{AB})\ /\ (R_{AB}+R_{AC}+R_{BC})}$$

$$\mathbf{R_C=(R_{BC}\ x\ R_{AC})\ /\ (R_{AB}+R_{AC}+R_{BC})}$$

Pour passer du montage étoile au montage triangle il faut utiliser les formules suivantes :

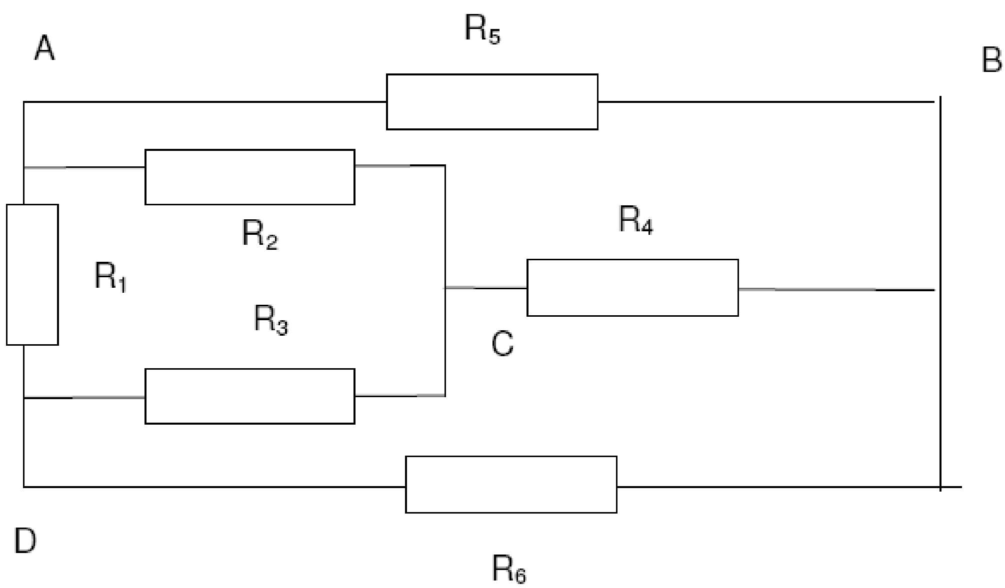
$$R_{AB}=(R_A x R_B + R_B x R_C + R_C x R_A) / R_C$$

$$R_{BC}=(R_A x R_B + R_B x R_C + R_C x R_A) / R_A$$

$$R_{AC}=(R_A x R_B + R_B x R_C + R_C x R_A) / R_B$$

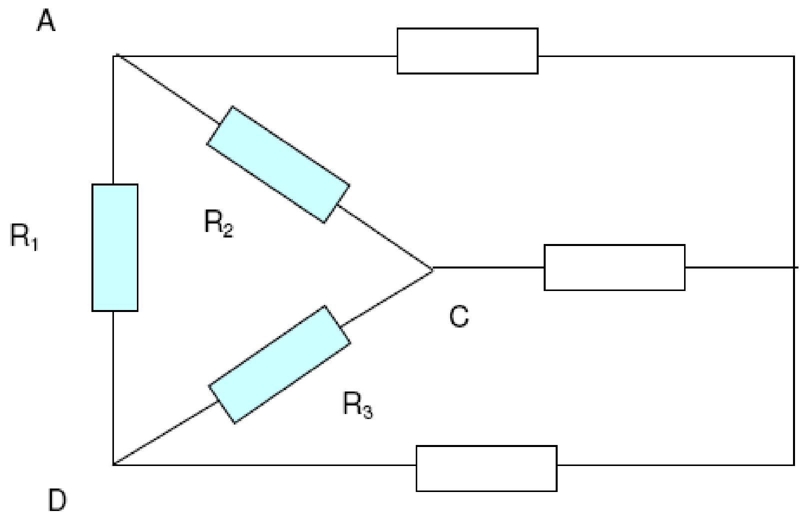
- **Applications**

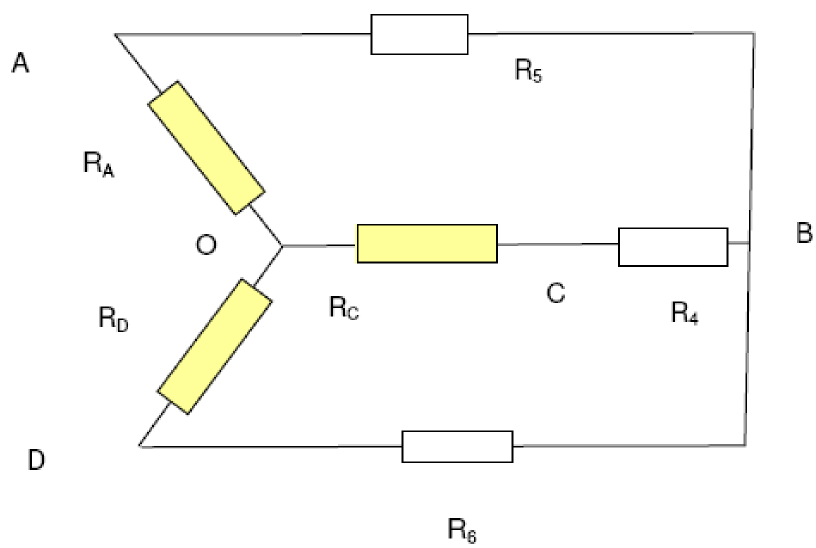
Par application du théorème de Kennely, déterminer la valeur de la résistance équivalente R_{AB}



$R_1 = 2\Omega$ $R_2 = 3\Omega$ $R_3 = 5\Omega$ $R_4 = 1\Omega$ $R_5 = 5\Omega$ $R_6 = 6\Omega$

- ***Solution :***



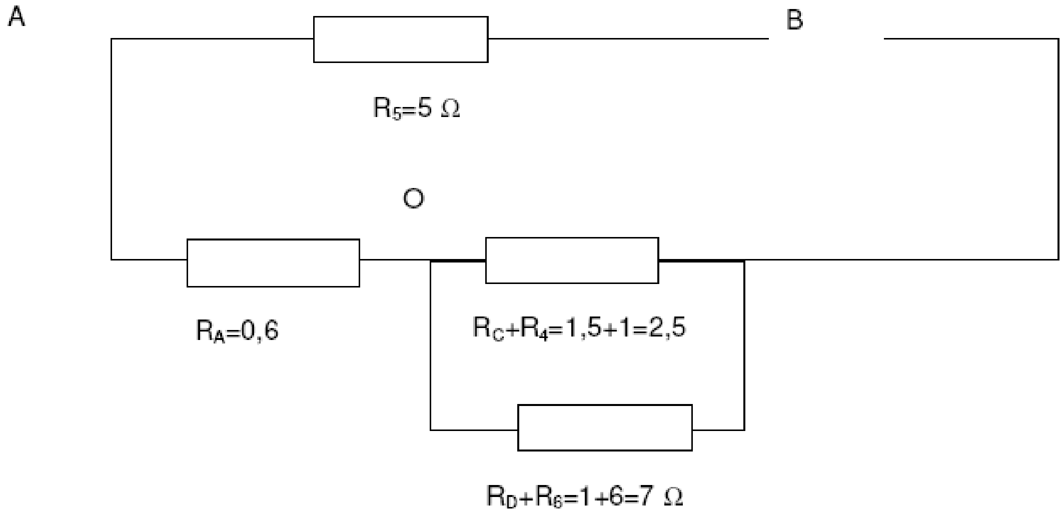


En les points A, C et D, on effectue une transformation étoile triangle :

$$\mathbf{R_A = \frac{R_1R_2}{R_1+R_2+R_3} = 0,6\,\Omega} \qquad \mathbf{R_C = \frac{R_2R_3}{R_1+R_2+R_3} = 1,5\,\Omega}$$

$$\mathbf{R_D = \frac{R_1R_3}{R_1+R_2+R_3} = 1\,\Omega}$$

Les valeurs des résistances sont indiquées sur le schéma.



$$\mathbf{R_{AB}} = \frac{5\left(0,6+\frac{2,5\times 7}{2,5+7}\right)}{5+\left(0,6+\frac{2,5\times 7}{2,5+7}\right)} = 1,64\ \Omega$$