

1.4 Électrocinétique.

1.4.1 Généralités.

L'électrocinétique est une branche de la physique qui étudie l'ensemble des lois qui régissent le mouvement des charges électriques dans les conducteurs à l'opposé de l'électrostatique qui étudie les phénomènes et les lois relatives aux charges immobiles. Elle permet aussi d'étudier les circuits et les réseaux électriques constitués de différents composants (générateurs, résistances, condensateurs ou bobine, etc., reliés entre eux par des fils conducteurs.

Les applications de l'électrocinétique sont variées et multiples, on peut les classer selon leurs natures en plusieurs domaines, à savoir l'électronique, l'électromagnétisme etc...

L'objectif de l'étude de l'électrocinétique en médecine est de pouvoir comprendre les phénomènes liés aux mouvements des charges électriques dans les corps vivants, tel que :

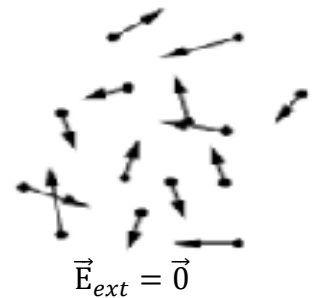
- **L'influx nerveux** : Les phénomènes liés à la dépolarisation, repolarisation des membranes cellulaires excitables. Ces phénomènes complexes font intervenir un échange de charges électriques (le sodium, le potassium, le chlore, le calcium, etc..) entre le milieu intra et le milieu extra cellulaire. Ce mouvement se fait à travers (l'ouverture et la fermeture) des canaux ioniques spécifiques. Ces canaux sont des portes d'entrées ou de sorties des charges, et se trouvent au niveau de la membranes cellulaire.
- **Synthèse de l'ATPase** : Au niveau de la mitochondrie, la synthèse de l'adénosine triphosphate (ATPase) fait intervenir le mouvement de proton (charge positive). Ce flux de protons est à l'origine de la synthèse de l'énergie nécessaire à la survie de la cellule.
- **Électrophorèse** : L'électrophorèse est une technique d'analyse des protéines. Les protéines sont de grosses molécules chargées, lorsqu'elles sont soumises à l'action d'un champ électrique on peut les faire migrer (séparation), cette migration dépend de leurs tailles ainsi que de la porosité du milieu traversé.

Dans ce chapitre nous allons introduire les grandeurs et les lois fondamentales de l'électrocinétique.

1.4.2 Origine Du Mouvement Des Charges, Rupture D'un Équilibre Electrostatique :

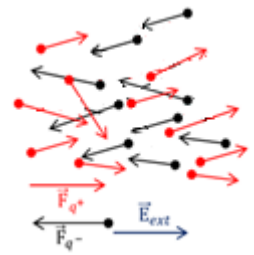
1.4.2.1 Mouvement aléatoire :

Il faut retenir que les charges électriques sont animées d'un mouvement désordonné dû à l'agitation thermique, même si ces charges ne sont pas soumises à l'action d'un champ électrique extérieur. Chaque charge est animée d'une vitesse aléatoire, ce mouvement est dû aux chocs avec les charges électriques avoisinantes, voir la figure ci-contre.



1.4.2.2 Mouvement Ordonné :

Mais si on leur applique un champ électrique, les charges auront un mouvement d'ensemble. Dans le cas général, il y a un déplacement des deux natures de charges. Les charges positives se déplacent dans le sens du champ électrique, et les charges négatives dans le sens opposé.

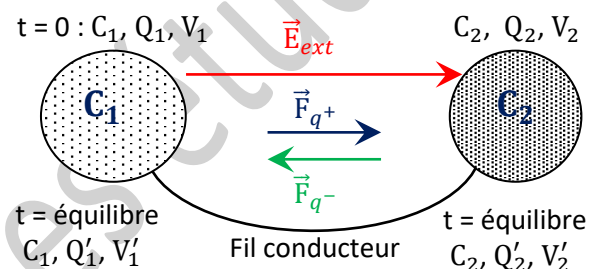


1.4.3 Courant Électrique :

Soit deux conducteurs (C_1) et (C_2) initialement chargés et suffisamment éloignés. Le premier conducteur est caractérisé par une capacité (C_1), une charge (Q_1) et un potentiel (V_1). Le second par une capacité (C_2), une charge (Q_2) et un potentiel (V_2).

Avant de relier les deux conducteurs, ils sont en équilibre électrostatique, et la répartition des charges libres élémentaires dans les deux conducteurs est supposée être uniforme. Après leurs mises en contact par un fil conducteur, l'équilibre est rompu. Un échange de charges apparaît entre ces deux conducteurs.

Les charges libres des conducteurs, se déplacent sous l'action d'une force électrique induite par le champ externe, et se déplacent entre les deux conducteurs (voir schéma ci-contre).



1.4.3.1 Définition :

On appelle courant électrique la quantité de charges en déplacement au sein d'un matériau conducteur par unité de temps.

1.4.3.2 Notation et Expression :

Le courant électrique est noté (i), son unité est l'ampère (A).

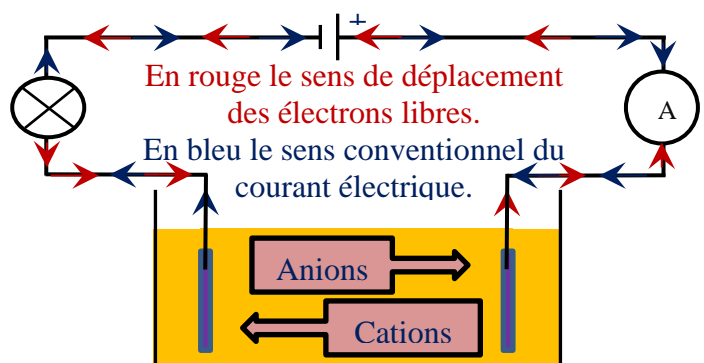
$$i = \frac{dQ}{dt} [\text{Coulombs/secondes} = \text{Ampère}]$$

1.4.3.3 Sens Conventionnel Du Courant Électrique (Choisi Par Ampère).

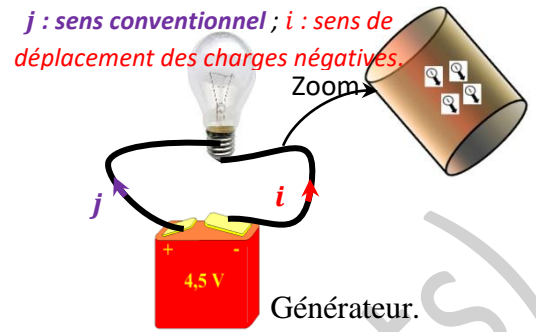
Dans les conducteurs électrolytes, les anions migrent vers la borne positive et les cations vers la borne négative.

Dans les conducteurs métalliques, seules les charges négatives (électrons libres) vont se déplacées, dans le sens opposé du champ.

Par convention, le sens du courant électrique choisi par Ampère (1820) est celui du mouvement des charges positives. Le sens du courant électrique est le même que celui du champ électrique.



Mais Thomson (1897) montre que dans le cas des conducteurs solides le sens du mouvement des charges négatives (électrons) est opposé au sens conventionnel choisi par ampère, voir le schéma ci-contre.



1.4.3.4 Courant Continu Et Courant Alternatif.

Le Courant Continu (CC) ou (DC) en anglais (Direct Current) est un courant électrique dans lequel les électrons circulent continuellement dans le même sens, du pôle négatif vers le pôle positif. Les circuits électriques tel que les appareils électriques ou électroniques sont alimentés par un courant est continu.

L'inconvénient principal de ce courant continu est la perte d'énergie par effet JOULE (très importante), lorsque le mouvement des charges se fait sur de très grandes distances.

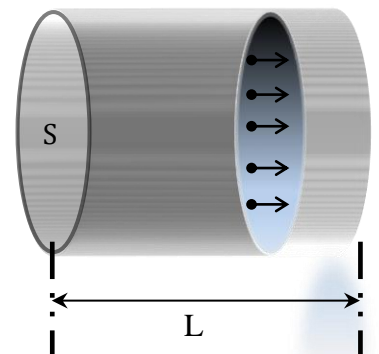
Le Courant Alternatif (CA) ou (AC) en anglais (Alternative Current) est un courant électrique, où les électrons circulent de manière alternative (un mouvement de va et vient) dans les deux sens du circuit. Ce mouvement de va-et-vient est généré par un alternateur.

Le transport d'électricité (énergie) se fait souvent en courant alternatif, car la perte d'énergie sous forme d'effet Joule est moins importante que la précédente dans le cas d'un courant continu.

1.4.3.5 Densité de courant :

L'intensité d'un courant est liée au débit de charges en mouvement par unité de surface du conducteur. Considérons un conducteur cylindrique de surface (S) constante, et de longueur (L), notons par (q) la charge de la particule, par (n) le nombre de particules traversant la surface (S).

Bien que le mouvement des charges à l'intérieur du conducteur soit chaotique, mais les électrons libres acquièrent un mouvement d'ensemble avec une vitesse moyenne ($v = dL/dt$) appelée vitesse de dérive.



Si l'on suppose que la quantité de charge est uniforme dans toute la section du conducteur, la charge totale (Q) qui traverse la surface (S) est l'ensemble de toutes les charges élémentaires libres contenues dans un cylindre de volume (V) de ce conducteur.

$$Q = n \times q \times V = n \times q \times S \times L.$$

Ce qui nous donne : $dQ = n \times q \times S \times dL$.

L'intensité du courant sera donnée par : $i = \frac{dQ}{dt} = n \times q \times S \times \frac{dL}{dt} \rightarrow i = n \times q \times S \times v$

On définit la densité de courant notée (J) par le rapport :

$$J = \frac{i}{S} = n \times q \times v$$

1.4.3.6 Régime Stationnaire Où Permanent :

Dans le cas où la quantité de charge en déplacement (Q) est constante dans le temps, on définit le régime permanent. Cette approximation consiste à dire que l'intensité du courant électrique est la même en tout point d'une branche d'un circuit. Il sera noté (I) et on le note par :

$$I = Q/t$$

Dans la suite du cours on choisira un courant continu en régime permanent, et comme sens du courant celui des charges négatives.

1.4.3.7 Effets Du Mouvement D'une Charge Électrique :

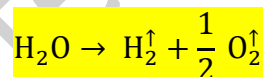
Le passage d'un courant dans un conducteur donné n'est pas observable à l'œil nu, mais ce déplacement est toujours accompagné d'effets que nous pouvons mesurer.

a) Effet Calorifique (Effet Joule) :

L'effet joule se manifeste par un dégagement de chaleur lors du passage d'un courant électrique au sein du corps conducteur. Cette chaleur est due au fait que les électrons en mouvement font vibrer les atomes du conducteur qu'ils traversent (frottements).

b) Effet chimique :

Dans le cas où le mouvement des charges se fait dans les électrolytes, le mouvement des charges provoque la décomposition des éléments constitutifs de l'électrolyte. Par exemple l'électrolyse de l'eau provoque la formation de l'oxygène et de l'hydrogène sous forme gazeux.



c) Effet Magnétique :

Le déplacement des charges électriques est toujours suivi par la création d'un champ magnétique (effet électromagnétique).

d) Effet Lumineux :

Le mouvement des charges provoque aussi l'émission d'une lumière caractéristique du milieu traversé, par exemple lorsqu'un courant traverse un fil de tungstène, ce dernier s'échauffe et émet de la lumière jaune. Le même phénomène se produit lorsque la charge traverse le gaz d'un tube à néon, la lumière émise est blanche.

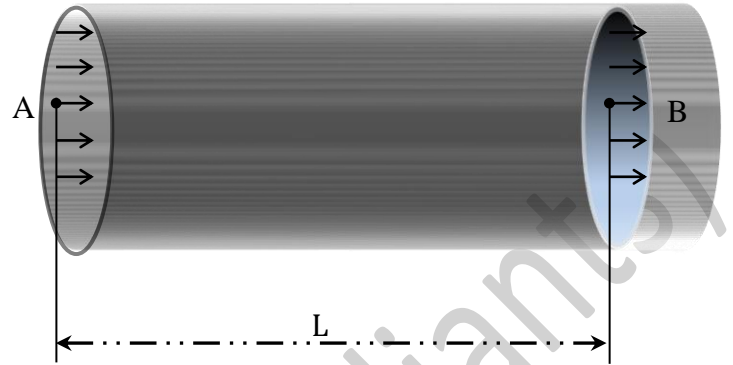
e) Effet Physiologique :

Un courant électrique traversant une structure biologique peut l'endommager (électrocution).

1.4.4 Différence de potentiel :

Soit deux points (A) et (B) d'un même conducteur de forme cylindrique. Le potentiel électrique au point (A) sera noté (V_A) de valeur inférieure à celle du potentiel au point (B) qui sera noté (V_B).

La différence de potentiel entre les deux points (A) et (B) est une grandeur algébrique appelée aussi la tension accélératrice, notée (V_{AB}), elle est à l'origine du mouvement des charges électriques.



$$V_{AB} = V_A - V_B$$

Elle se mesure en volt (V), elle représente l'énergie nécessaire pour déplacer une charge de (1) coulomb entre les deux points distants de (1 m). L'appareil qui permet de mesurer le potentiel électrique est le voltmètre.

1.4.5 Résistance Électrique :

1.4.5.1 Origine De La Résistance Électrique :

La différence de potentiel entre les deux points précédents (A) et (B) fait déplacer les charges libres entre les atomes du conducteur. Ce mouvement est ralenti par les charges avoisinantes.

1.4.5.2 Schématisation Et Notation :

La résistance électrique est notée (R), et est schématisée par la figure ci-contre, elle est proportionnelle à la longueur (L) parcourue par la charge, inversement proportionnelle à la section transversale (S) ainsi qu'à la résistivité (ρ) du matériau traversé par la charge.



Son expression est :

$$R = \frac{\rho \times L}{S} \quad [\Omega] \quad \begin{cases} (\rho): \text{la résistivité du matériau en } [\Omega \times m]. \\ (S): \text{section transversale } [m^2]. \\ (L): \text{longueur parcourue par la charge } [m]. \end{cases}$$

La conductivité (σ) d'un matériau est inversement proportionnelle à sa résistivité (ρ).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad [\Omega^{-1} \times m^{-1}]$$

1.4.5.3 Caractéristiques D'une Résistance Électrique :

a) Loi D'OHM, Différence De Potentiel Au Borne D'une Résistance :

Soit une résistance (R) d'une portion d'un circuit électrique traversée par une intensité de courant (I), le point (A) étant la borne d'entrée de la charge et le point (B) sa borne de sortie.



Sachant que l'énergie de la charge est proportionnelle à la valeur de la charge en déplacement ($E_n = Q \times V$), lorsque celle-ci traverse une résistance électrique, son énergie diminue (**Effet Joule**), et le potentiel électrique aussi.

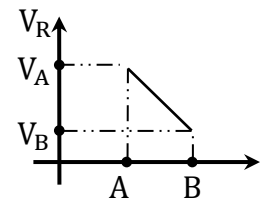
Si la charge parcourt la résistance dans le sens (AB) comme indiqué sur le schéma ci-dessus, la valeur du potentiel au point (A) sera toujours supérieure à celle du potentiel au point (B).

La tension électrique, notée (V_R), mesure la différence de potentiel électrique entre les bornes d'une résistance (R) traversée par l'intensité (I).

$$V_R = V_A - V_B$$

OHM montre que la tension électrique (V_R) imposé par un générateur est proportionnelle à l'intensité du courant électrique qui traverse une résistance entre ces bornes.

$$V_R = R \times I$$



b) Énergie Dissipée Par Effet Joule Dans Une Résistance :

Fixes et chargés positivement, les charges atomiques d'un conducteur ralentissent les électrons libres qui circulent dans un conducteur lorsqu'une tension électrique lui est appliquée.

L'énergie dissipée par ces charges en mouvement est notée ($E_{n_{diss}}$), et son expression est donnée par la loi de Joule :

$$E_{n_{diss}} = R \times I^2 \times t = (V_A - V_B) \times I \times t \quad \left\{ \begin{array}{l} R: \text{la résistance électrique en } (\Omega). \\ I: \text{intensité du courant en (A)}. \\ t: \text{le temps en seconde (S)}. \end{array} \right.$$

c) Puissance Dissipée Par Effet Joule.

La puissance électrique dissipée (P_{diss}) dans une résistance électrique est égale au produit de la tension électrique ($V_A - V_B$) entre ses bornes par l'intensité (I) du courant électrique qui la traverse. Elle est exprimée en **Watts**.

$$P_{diss} = (V_A - V_B) \times I = \frac{E_{n_{diss}}}{t} = R \times I^2 \text{ [Watts]}$$

1.4.5.4 Associations Des Résistances Électriques :

Un circuit électrique peut être constitué, dans certains cas, d'une association de plusieurs éléments. Selon la nécessité, les éléments qui constituent ce circuit peuvent être associés entre eux de deux manières différentes. Les associations de base sont :

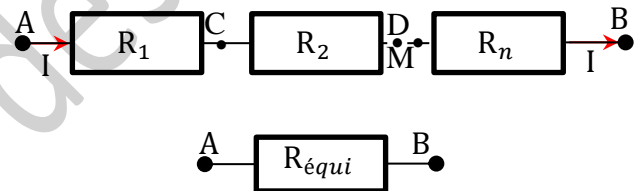
- Soit une association ou tous les éléments sont assemblés les uns à la suite des autres, ce montage est appelé montage en série. Dans cet assemblage, la même intensité du courant électrique y circule dans ce circuit. On utilise ce montage dans le but de diviser la tension afin de ne pas endommager les éléments du circuit. Ce montage est appelé diviseur de tension.
- Soit une association ou tous les éléments du circuit sont placés parallèlement les uns aux autres, cet assemblage est appelé montage en parallèle. Les éléments de cet assemblage seront soumis à la même différence de potentiel électrique. Cet assemblage est utilisé lorsque l'intensité qui circule dans le circuit est importante. Ce type de montage est appelé diviseur de l'intensité.

a) Association De Résistances En Série

Soient (n) résistances électriques (R_1, R_2, \dots, R_n) parcourue par une même intensité (I), ces résistances sont montées dans un circuit en série, comme indiqué dans le schéma ci-contre.

Déterminons l'expression de la résistance équivalente de ce montage.

La différence de potentiel entre les bornes du circuit (A) et (B) est :



$$V_{AB} = V_A - V_B = V_A - V_C + V_C - V_D + V_D - \dots - V_M + V_M - V_B ; \text{ avec : } \begin{cases} V_A - V_C = R_1 \times I \\ V_C - V_D = R_2 \times I \\ \vdots \\ V_M - V_B = R_n \times I \end{cases}$$

$$\rightarrow V_{AB} = R_1 \times I + R_2 \times I - \dots - R_n \times I \rightarrow V_{AB} = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) \times I = R_{\text{équi}} \times I$$

$$R_{\text{équi}} = \sum_{i=1}^{i=n} R_i$$

La valeur de la résistance équivalente d'un circuit formé d'un ensemble de résistances montées en série est la somme algébrique de toutes les valeurs des résistances de ce circuit.

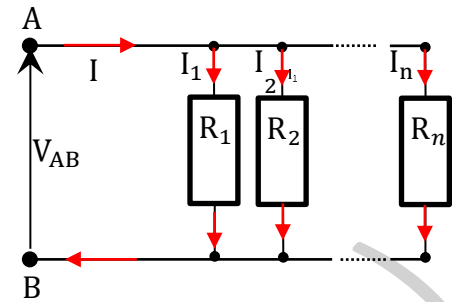
Remarque Importante

La valeur de la résistance équivalente dans un circuit où toutes les résistances sont montées en série sera toujours plus grande que la valeur de la plus grande résistance du circuit électrique.

b) Association De Résistances En Parallèle :

Soient (n) résistances électriques (R_1, R_2, \dots, R_n) montées en parallèle comme indiqué dans le schéma ci-contre, elles seront toutes soumises à la même différence de potentiel (V_{AB}), le principe de la conservation de la charge donne :

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$



Déterminons l'expression de la résistance équivalente de ce deuxième montage.

La différence de potentiel ($V_{AB} = V_A - V_B$) entre les bornes du circuit (A) et (B) est la même pour toutes les résistances :

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n ; \text{ avec : } \begin{cases} I_1 = V_{AB}/R_1 \\ I_2 = V_{AB}/R_2 \\ \vdots \\ I_n = V_{AB}/R_n \end{cases}$$

$$\rightarrow I = \frac{V_{AB}}{R_1} + \frac{V_{AB}}{R_2} + \dots + \frac{V_{AB}}{R_n} = V_{AB} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) = \frac{V_{AB}}{R_{\text{équi}}} \rightarrow \frac{1}{R_{\text{équi}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

L'inverse de la valeur de la résistance équivalente d'un circuit formé d'un ensemble de résistances montées en parallèles est la somme algébrique de toutes les inverses de toutes les valeurs des résistances de ce circuit.

Remarque Importante

La valeur de la résistance équivalente dans un circuit en parallèle sera toujours plus petite que la valeur de la plus petite résistance du circuit électrique.

c) Technique De Simplification D'un Circuit Formé De Plusieurs Résistances :

Soit le circuit électrique donné par le schéma suivant. Déterminer la résistance équivalente de ce circuit.

Il faut toujours commencer par simplifier les éléments les plus interne du circuit, c'est-à-dire à l'endroit où l'intensité ne se divise plus.

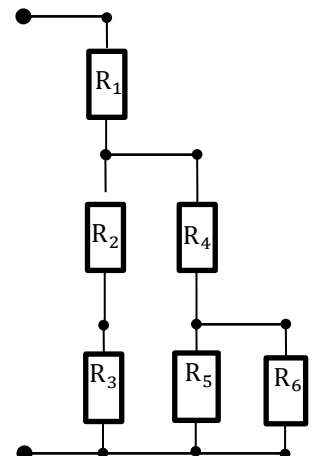
1^{ère} étape : les résistances (R_5) et (R_6) sont en parallèle, on calcule la résistance équivalente ($\frac{1}{R_{56}} = \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}$), on déduit $\rightarrow R_{56}$

2^{ème} étape : les résistances (R_4) et (R_{56}) sont en série, la résistance équivalente est ($R_{456} = R_4 + R_{56}$), on déduit $\rightarrow R_{456}$

3^{ème} étape : les résistances (R_2) et (R_3) sont en série, la résistance équivalente est ($R_{23} = R_2 + R_3$), on déduit $\rightarrow R_{23}$

4^{ème} étape : les résistances (R_{23}) et (R_{456}) seront en parallèle, la résistance équivalente de ces cinq résistances est ($\frac{1}{R_{23456}} = \frac{1}{R_{23}} + \frac{1}{R_{456}}$), on déduit $\rightarrow R_{23456}$

5^{ème} étape : les résistances (R_1) et (R_{23456}) seront en série, la résistance équivalente finale du circuit est : ($R_{\text{équi}} = R_1 + R_{23456}$), on déduit ($R_{\text{équi}}$) du circuit.



1.4.6 Générateur Électrique :

1.4.6.1 Rôle Du Générateur :

L'énergie électrique des charges diminue lors du déplacement de celles-ci. Cette énergie dissipée doit être régénérée pour que celles-ci puissent continuer leurs parcours. On distingue deux types de générateurs, les générateurs de tension et les générateurs de courant.

a) Générateur de tensions électriques :

Le générateur de tensions est un système qui produit une différence de potentiel entre ses bornes, cette différence de potentiel induit un champ électrique qui va créer une force électromotrice pour faire déplacer les charges électriques, exemple des piles, batteries, etc...

Les générateurs de tension génèrent une différence de potentiel (tension) entre ses bornes, elle sera supposée constante dans le circuit électrique.

b) Générateur de courants électriques :

Le principe du générateur de courants électriques est basé sur la loi fondamentale de l'électromagnétisme (loi de Faraday). Lorsque l'on fait déplacer un conducteur entre les bornes d'un aimant, une tension électrique est induite, cette tension génère un champ électrique qui crée une force pour déplacer les charges électriques libres du conducteur, exemple des bobines, dynamos, etc...

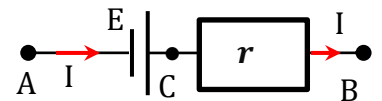
Les générateurs de courant génèrent une intensité de courant dans le circuit.

Dans la suite du cours on ne va considérer que les générateurs de tensions.

1.4.6.2 Schématisation Et Notations (Force Électromotrice) :

Un générateur est un dispositif qui permet de reproduire l'énergie de la charge électrique qu'elle a perdue lors de son déplacement.

Les électrons (courant électrique) circulent de la borne positive (+) vers la borne négative (-) à l'extérieur du générateur. Il sera noté (générateur réel) (E, r), et est schématisé par :



(E) : La force électromotrice ($f. é. m.$) est un des paramètres caractéristiques d'un générateur électrique. Elle est homogène à une tension et s'exprime en (Volts). La force électromotrice correspond au travail que fournit le générateur au circuit par unité de charge.

(r) : est la résistance interne du générateur, elle est exprimée en (Ω). Dans le cas d'un générateur idéal cette résistance interne est nulle.

On schématise le parcours d'une charge (Q) qui traverse un générateur en passant par les points (A), (C) et (B). Le point (A) représente le point d'entrée de la charge (la borne négative du générateur). Le point (B) est le point de sortie de la charge (la borne positive). Le point (C) est un point fictif que l'on place afin de séparer la force électromotrice (E) de la résistance interne (r) du générateur.

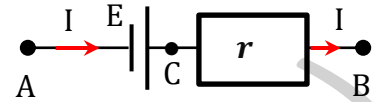
1.4.6.3 Caractéristiques D'un Générateur.

a) Différence De Potentiel Aux Bornes D'un Générateur :

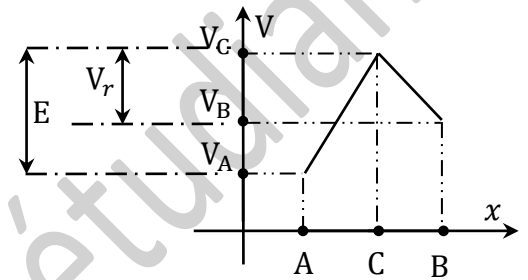
Soit une charge (Q) qui traverse un générateur électrique. Celle-ci rentre dans le générateur par sa borne (A) et ressort par le point (B).

Sachant que l'énergie est proportionnelle au potentiel électrique ($E_n = Q \times V$), entre les points (A) et (C) la force électromotrice fait augmenter l'énergie de la charge en mouvement, le potentiel au point (C) sera toujours supérieur au potentiel au point (A).

Entre les points (C) et (B), la résistance interne du générateur fait dissiper une partie de cette énergie par effet Joule, le potentiel électrique au point (B) sera inférieur au potentiel électrique au point (C).



La courbe suivante permet de schématiser l'évolution du potentiel électrique lorsque la charge traverse un générateur. L'axe des ordonnées représente le potentiel électrique, et l'abscisse l'espace (x)



La différence de potentiel entre les bornes du générateur (V_{BA}) est obtenue en faisant la différence, ($V_{BA} = V_B - V_A$).

$$V_{BA} = V_B - V_A = V_B - V_C + V_C - V_A = (V_B - V_C) + (V_C - V_A).$$

Entre les points (A) et (C), la force électromotrice fournit de l'énergie à la charge électrique, la valeur initiale d'entrée (V_A) augmente jusqu'à atteindre le potentiel (V_C). Cette différence de potentiel est donnée par la force électromotrice (E) :

$$V_C - V_A = +E.$$

Et entre les points (C) et (B), la résistance interne dissipe une partie de l'énergie de la charge acquise (effet Joule), et le générateur s'échauffe. La différence de potentiel entre ces deux points diminue, elle est appelée la chute de tension, et est donnée par la loi d'Ohm :

$$V_B - V_C = -r \times I \quad \begin{cases} I : \text{intensité du courant} \\ r : \text{résistance interne.} \end{cases}$$

L'expression de la différence de potentiel aux bornes d'un générateur est donnée par :

$$V_B - V_A = E - r \times I$$

Cette dernière expression est appelée la loi de Pouillet, elle donne la différence de potentiel aux bornes d'un générateur. Elle est appelée la tension disponible du générateur.

b) Puissance (Énergie) Mise En Évidence Dans Un Générateur.

On définit trois types d'énergie (puissance) dans un générateur.

✚ Puissance Fournie Par La Force Électromotrice Du Générateur.

Cette puissance représente, l'énergie fournie par le générateur à la charge pour la faire déplacer dans le circuit électrique par unité de temps.

Son expression est donnée par :

$$P_{\text{fournie}} = \frac{\text{Energie fournie}}{\text{temps}} = E \times I \text{ (Watts)} \quad \left\{ \begin{array}{l} (E) : \text{La (f. é. m.) en (Volts).} \\ (I) : \text{intensité du courant en (A).} \\ (t) : \text{le temps en secondes.} \end{array} \right.$$

✚ Puissance Dissipée Par Effet Joule Dans La Résistance Interne.

Elle correspond au travail des forces de frottement, et se traduit par une diminution de l'énergie.

Elle est donnée par :

$$P_{\text{dis}} = \frac{\text{Energie dissipée}}{\text{temps}} = r \times I^2 \text{ (Watts)} \quad \left\{ \begin{array}{l} (r) : \text{La résistance interne } (\Omega). \\ (I) : \text{intensité du courant.} \end{array} \right.$$

✚ Puissance Disponible :

Elle est déduite des deux puissances précédentes, elle représente l'énergie de la charge par unité de temps lorsque celle-ci sort du générateur, cette puissance est dite la puissance disponible.

Son expression est :

$$P_{\text{disp}} = P_{\text{fournie}} - P_{\text{dis}} = E \times I - r \times I^2 = (E - r \times I) \times I = (V_B - V_A) \times I$$

c) Rendement Du Générateur :

Le rendement du générateur est le rapport de la puissance électrique disponible sur la puissance électrique fournie par le générateur. Il est noté (Rend) son expression est donné par :

$$\text{Rend} = \frac{P_{\text{disponible}}}{P_{\text{fournie}}} = \frac{E \times I - r \times I^2}{E \times I} = \frac{(E - r \times I)}{E} = \frac{(V_B - V_A)}{E}$$

Remarque : Si la résistance interne du générateur est nulle, le générateur est dit parfait ou idéal. La valeur du rendement sera maximale et égale à 100%.

1.4.7 Récepteur Électrique :

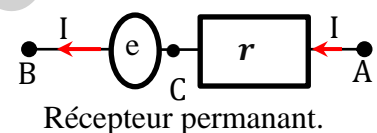
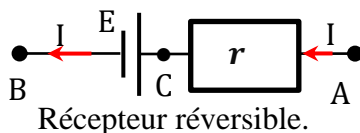
L'énergie électrique des charges diminue lorsque celles-ci traversent un récepteur. Dans un récepteur, le travail qui s'oppose au déplacement de la charge électrique permet de transformer son énergie électrique sous une autre forme.

1.4.7.1 Récepteur Permanent, Et Récepteur Réversible :

On distingue deux types de récepteurs, les récepteurs permanents et les récepteurs réversibles. Les récepteurs réversibles peuvent jouer le rôle de générateurs. Par exemple la batterie d'un téléphone joue le rôle d'un générateur lorsque celui-ci fonctionne, mais lorsqu'elle se vide on doit la charger et dans ce second cas elle va jouer le rôle d'un récepteur.

Dans un récepteur, les électrons le traversent de sa borne positive (+) vers sa borne négative (-).

Le récepteur permanent que l'on notera (e, r) possède un schéma légèrement différent de celui du récepteur réversible que l'on notera (E, r) . Dans les deux cas (E) et (e) seront des forces contre électromotrices ($f. c. e. m.$), (r) étant la résistance interne du récepteur.



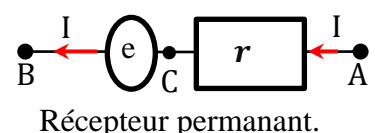
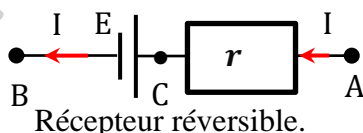
La force contre électromotrice ($f. c. é. m.$) est un paramètre qui caractérise un récepteur électrique, elle est homogène à une tension et s'exprime en volts. Elle représente l'énergie de la charge qu'il va transformer par unité de temps. (r) : est la résistance interne du récepteur.

Le point (A) représente la première borne du récepteur, et le point (B) sa seconde borne. Le point (C) est un point fictif que l'on place pour séparer la force contre électromotrice de la résistance interne (r) .

1.4.7.2 Caractéristiques D'un Récepteur.

a) Différence De Potentiel Aux Bornes D'un Récepteur :

Soit une charge (Q) qui traverse un récepteur, on schématise son parcours par les points (B), (C) et (A). Le point (C) sépare la force contre électromotrice (E) de sa résistance interne (r) .



Entre les points (A) et (C) la résistance interne fait dissiper une partie de l'énergie de la charge traversant le récepteur, le potentiel électrique au point (A) étant supérieur au potentiel au point (C).

Entre les points (C) et (B), le travail de la force contre électromotrice (E) ou (e) lui fait aussi diminuer son énergie, le potentiel au point (B) est inférieur au potentiel au point (C).

La courbe suivante schématise l'évolution du potentiel d'une charge traversant un récepteur électrique.

On peut écrire que :

$$V_{AB} = V_A - V_B = V_A - V_C + V_C - V_B.$$

Entre les points (A) et (C) la différence de potentiel est donnée par la loi d'Ohm :

$$V_A - V_C = +r \times I.$$

Entre les points (C) et (B) la différence de potentiel sera égale à (E) dans le cas d'un récepteur réversible, et est égale à (e) dans le cas d'un récepteur permanent :

$$V_C - V_B = + (E \text{ ou } e).$$

On déduit que pour un récepteur la différence de potentiel entre ces bornes est :

$$V_B - V_A = e + r \times I$$

Cette loi est dite aussi la loi de Pouillet dans le cas d'un récepteur.

b) Puissance (Énergie) Mise En Évidence Dans Un Récepteur :

On définit trois types de puissances (énergies) dans un récepteur.

Puissance Transformée Par La Force Contre Électromotrice.

La force contre électromotrice transforme une partie de l'énergie de la charge sous une autre forme. Par exemple si le récepteur est un moteur, il transforme l'énergie électrique sous une forme mécanique, et si le récepteur est une lampe, elle la transforme en une énergie rayonnée, etc...

Cette puissance transformée (P_{trans}) représente, l'énergie libérée par la charge lorsque celle-ci traverse la force contre électromotrice du récepteur, par unité de temps.

Son expression est donnée par :

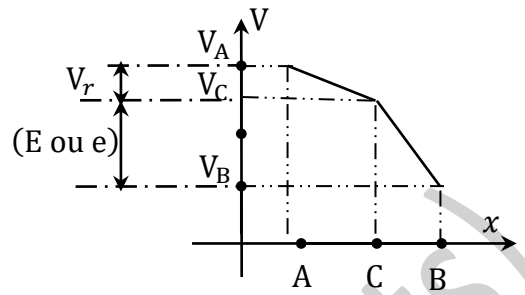
$$P_{trans} = \frac{\text{Energie fournie}}{\text{temps}} = e \times I \text{ (Watts)} \quad \left\{ \begin{array}{l} (e) : (\text{f. c. é. m.}) \text{ en (Volts)}, \\ (I) : \text{intensité du courant.} \\ (t) : \text{le temps en secondes.} \end{array} \right.$$

Puissance Dissipée Par Effet Joule Dans La Résistance interne.

Cette puissance dissipée (P_{diss}) par effet Joule correspond au travail résistant des forces de frottement, qui se traduit par une diminution de l'énergie des charges pendant leurs traversées du récepteur.

Son expression est donnée par la loi de Joule :

$$P_{diss} = r \times I^2 \text{ (Watts)} \quad \left\{ \begin{array}{l} (r) : \text{La résistance interne } (\Omega). \\ (I) : \text{intensité du courant.} \end{array} \right.$$



Puissance Consommée :

Elle représente la puissance totale consommée (P_{cons}) par le récepteur. C'est-à-dire la somme algébrique de la puissance transformée, et de la puissance dissipée par effet Joule dans le récepteur. Son expression est donnée par :

$$P_{cons} = P_{trans} + P_{diss} = e \times I + r \times I^2 = (e + r \times I) \times I = (V_B - V_A) \times I$$

c) Rendement Du Récepteur :

Le rendement du récepteur est défini par le rapport de la puissance transformée sur la puissance électrique totale consommée.

On le note (**Rend**) et son expression est donné par :

$$\text{Rend} = \frac{P_{trans}}{P_{cons}} = \frac{e \times I}{e \times I + r \times I^2} = \frac{e}{e + r \times I} = \frac{e}{(V_B - V_A)}$$

Remarque : Si la résistance interne du récepteur est nulle, le récepteur est dit parfait ou idéal, la valeur du rendement sera maximale égale à 100%.

1.4.8 Lois de KIRCHHOFF.

Dans un circuit complexe, il est nécessaire de calculer les différences de potentiels aux bornes de chaque élément du circuit ainsi que les différentes intensités du courant qui y circule.

Le physicien allemand (**Gustav KIRCHHOFF**), en utilisant les lois de conservation de l'énergie et de la charge dans un circuit électrique, établit les lois qui régissent la répartition des intensités dans les différentes branches d'un circuit électrique. Ces lois portent son nom (loi de **KIRCHHOFF**).

Ces deux lois sont :

- La loi des nœuds.
- La loi des mailles.

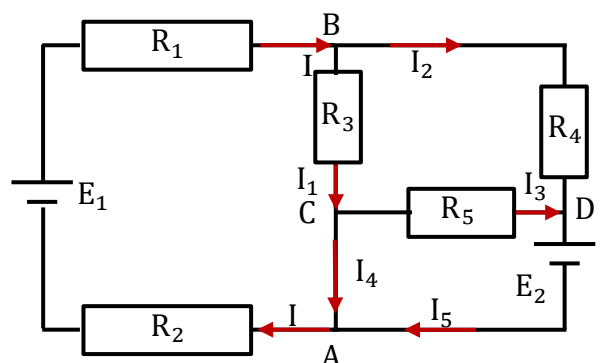
Soit une portion d'un circuit électrique complexe composée d'un ensemble d'éléments, voir la figure ci-dessus.

1.4.8.1 Lois Des Nœuds :

a) Définitions D'un Nœud :

Dans un circuit électrique, le point d'intersection de plusieurs fils électriques est appelé un nœud.

Dans le circuit électrique ci-contre, les nœuds sont représentés par les points (A), (B), (C), et (D).



b) Loi Des Nœuds :

La somme algébrique des intensités des courants qui entrent dans un nœud est égale à la somme algébrique des intensités des courants qui en sortent du même nœud. On peut dire aussi que la somme algébrique des courants circulant dans les branches adjacentes à un nœud est nulle. Il n'y a pas d'accumulation de courant (de charges) dans un nœud.

c) Application :

La loi des nœuds appliquée au circuit précédent donne les équations suivantes.

- ☐ Le nœud (B) donne : $I = I_1 + I_2$
- ☐ Le nœud (C) donne : $I_1 = I_3 + I_4$
- ☐ Le nœud (D) donne : $I_3 + I_2 = I_5$
- ☐ Le nœud (A) donne : $I_4 + I_5 = I$

1.4.8.2 Loi Des Branches :

a) Définition D'une Branche :

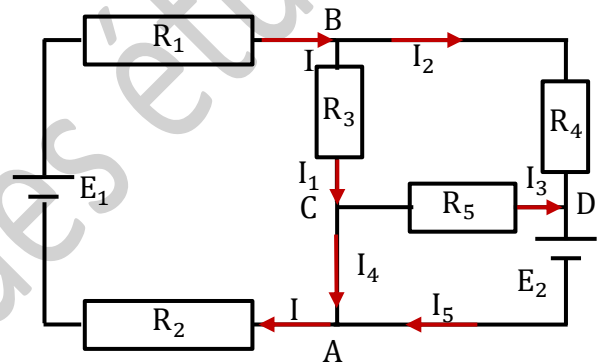
L'ensemble de tous les éléments qui se trouve entre deux nœuds consécutifs est appelée une branche.

Bien que cette dernière ne soit pas une loi de **Kirchhoff**, elle est souvent utilisée pour vérifier les résultats obtenus après un calcul donné.

Tous les éléments se trouvant dans une même branche (éléments montés en série) sont parcourus par la même intensité de courant. Dans le circuit précédent on retrouve plusieurs branches, par exemple la branche (AB), (BD), (CD), ...etc.

b) Loi Des Branches :

La différence de potentiel entre deux nœuds successifs est la somme algébrique de toutes les différences de potentiels de tous les éléments qui forme cette branche.



Cette différence de potentiel est toujours constante quel que soit le parcours suivi.

Par exemple la branche (AB) peut-être parcourue du point (A) vers le point (B) en passant par les éléments (R_2), (E_1) et (R_1), ou bien elle peut être parcourue en passant les éléments (R_4) et (E_2), ou bien elle peut être parcourue en passant l'élément (R_3) uniquement. On doit trouver la même valeur de la différence de potentiel dans les trois parcours précédents.

c) Application :

La loi des branches appliquée à la branche (AB) du circuit précédent donne :

$$V_{AB} = V_{R_1} + V_{E_1} + V_{R_2} = V_{R_4} + V_{E_2} = V_{R_3} + V_{R_5} + V_{E_1} = V_{R_3} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{R_1} = \text{d.d.p au borne } R_1 \\ V_{E_1} = \text{d.d.p au borne } E_1 \\ V_{R_2} = \text{d.d.p au borne } R_2 \\ V_{R_4} = \text{d.d.p au borne } R_4 \\ V_{E_2} = \text{d.d.p au borne } E_2 \\ V_{R_3} = \text{d.d.p au borne } R_3 \\ V_{R_5} = \text{d.d.p au borne } R_5 \end{array} \right.$$

1.4.8.3 Loi Des Mailles :

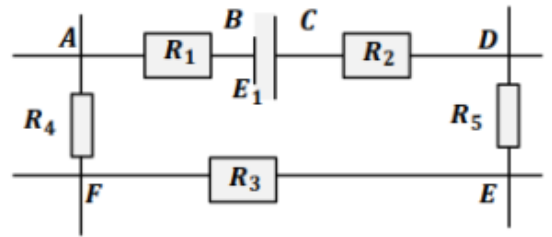
a) Définition D'une Maille :

Dans un circuit électrique, l'ensemble des branches formant un circuit fermé est appelés une maille.

b) Loi Des Mailles :

La somme algébrique de toutes les différences de potentiels de tous les éléments rencontrés lors du parcours d'une maille est nulle. Le sens de parcours d'une maille peut être le même sens que celui de l'intensité du courant, comme il peut être différent.

Le schéma ci-contre représente une portion d'un circuit électrique, on peut parcourir la maille dans le sens des aiguilles d'une montre en passant successivement par les points (A), (B), (C), (D), (E), (F), (A). Comme on peut parcourir la maille dans le sens trigonométrique, c'est-à-dire en passant successivement par les points (A), (F), (E), (D), (C), (B), (A), l'équation finale sera la même.



Si l'on parcourt la maille dans le sens des aiguilles d'une montre, l'équation de la maille sera donnée par :

$$V_A - V_A = V_A - V_B + V_B - V_C + V_C - V_D + V_D - V_E + V_E - V_F + V_F - V_A$$

C'est-à-dire que :

$$V_A - V_A = V_{R1} + V_{E1} + V_{R2} + V_{R5} + V_{R3} + V_{R4} = 0$$

1.4.9 Application Des Lois De Kirchhoff À Un Circuit Ramifié :

Lorsqu'un circuit est formé de plusieurs mailles, l'écriture de toutes les lois de Kirchhoff conduit à un excès d'équations. Il faut bien choisir les bonnes équations afin de pouvoir résoudre le problème.

On propose les étapes suivantes :

- ✚ La première étape consiste à simplifier le circuit, c'est-à-dire remplacer les éléments montés en série ou en parallèle par un élément équivalent.
- ✚ La seconde consiste à déterminer le nombre d'inconnues du système. Et commencer par choisir des nœuds et écrire les lois de conservations de la charge (loi des nœuds).
- ✚ Ensuite choisir des mailles, et écrire les lois des mailles.
- ✚ Enfin résoudre le système d'équation.

N.B. Le système d'équation doit être linéairement indépendant, c'est-à-dire que le système d'équation doit avoir une solution unique.

1.4.9.1 Exemple d'application (1) :

Soit le circuit électrique schématisé dans la figure suivante. Déterminer les différentes équations qui régissent la répartition des intensités des courants dans le circuit.

1^{ère} étape :

Le circuit ne pouvant pas être simplifié, et le nombre d'inconnues du problème est de six (6), six intensités de courant à déterminer :

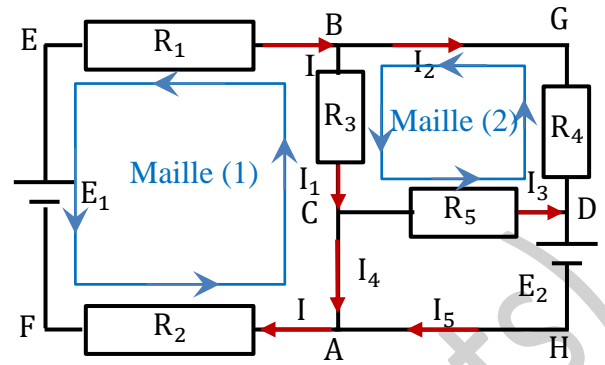
On choisit des nœuds, par exemple les nœuds (B), (C), et le nœud (A).

- L'équation des nœuds en (B) donne : $I = I_1 + I_2 \dots \dots \dots$ équation (1)
- L'équation des nœuds en (C) donne : $I_1 = I_3 + I_4 \dots \dots \dots$ équation (2)
- L'équation des nœuds en (A) donne : $I_4 + I_5 = I \dots \dots \dots$ équation (3)

2^{ème} étape :

On choisit trois mailles, de tel sort à compléter le nombre total d'équations nécessaires pour résoudre le système. Dans notre cas il nous faudra trois autres équations, c'est-à-dire trois mailles.

- On parcourt la maille (1) dans le sens trigonométrique, on obtient la quatrième équation.

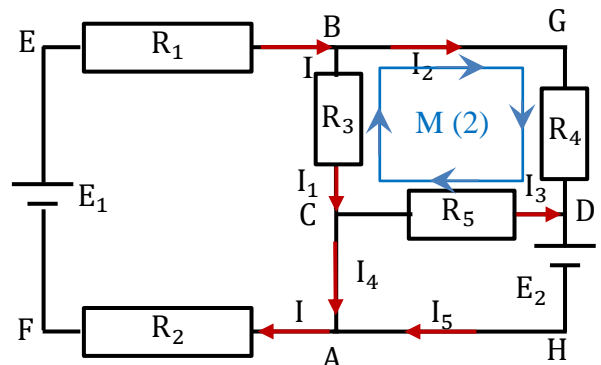


$$V_A - V_A = (V_A - V_C) + (V_C - V_B) + (V_B - V_E) + (V_E - V_F) + (V_F - V_A) = 0.$$

{	entre les points (A) et (C) la résistance du fil est négligeable ($V_A - V_C = 0$).	
	entre les points (C) et (B) la d.d.P	$(V_C - V_B = -R_3 \times I_1).$
	entre les points (B) et (E) la d.d.P	$(V_B - V_E = -R_1 \times I).$
	entre les points (E) et (F) la d.d.P	$(V_E - V_F = +E_1).$
	entre les points (F) et (A) la d.d.P	$(V_F - V_A = -R_2 \times I).$

L'équation (4) devient : $0 = 0 - R \times I_1 - R_1 \times I - E_1 - R_2 \times I \dots \dots \dots$ équation (4)

- On parcourt la maille (2) dans le sens des aiguilles d'une montre, et on obtient la cinquième équation.



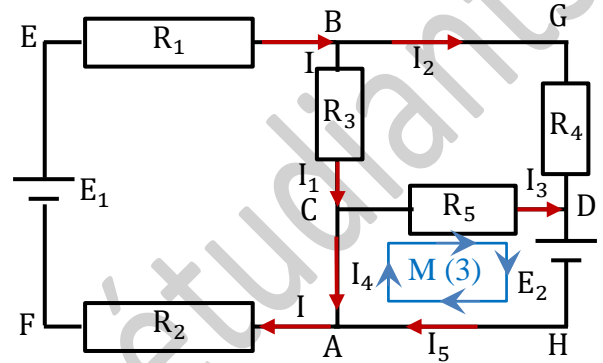
$$V_B - V_B = (V_B - V_G) + (V_G - V_D) + (V_D - V_C) + (V_C - V_B)$$

$$\begin{cases} \text{entre les points (B) et (G) la résistance du fil est négligeable } (V_B - V_G = 0). \\ \text{entre les points (G) et (D) la d.d.P} & (V_G - V_D = +R_4 \times I_2). \\ \text{entre les points (D) et (C) la d.d.P} & (V_D - V_C = -R_5 \times I_3). \\ \text{entre les points (C) et (B) la d.d.P} & (V_C - V_B = -R_3 \times I_1). \end{cases}$$

L'équation (5) devient :

$$0 = 0 + R_4 \times I_2 + -R_5 \times I_3 + -R_3 \times I_1 \dots \dots \dots \text{équation (5)}$$

- On parcourt la maille (3) dans le sens des aiguilles d'une montre, et on obtient la cinquième équation.



$$V_C - V_C = (V_C - V_D) + (V_D - V_H) + (V_H - V_A) + (V_A - V_C) = 0.$$

$$\begin{cases} \text{entre les points (C) et (D) la d.d.P} & (V_C - V_D = +R_5 \times I_3). \\ \text{entre les points (D) et (H) la d.d.P} & (V_D - V_H = +E_2). \\ \text{entre les points (H) et (A) la résistance du fil est négligeable } (V_A - V_H = 0). \\ \text{entre les points (A) et (C) la résistance du fil est négligeable } (V_A - V_C = 0). \end{cases}$$

La sixième équation devient :

$$0 = R_5 \times I_3 + E_2 + 0 + 0 \dots \dots \dots \text{équation (6)}$$

Pour déterminer les différentes intensités qui circulent dans cette portion d'un réseau électrique, il faut résoudre le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} I = I_1 + I_2 \\ I_1 = I_3 + I_4 \\ I = I_4 + I_5 \\ R_4 \times I_2 + -R_5 \times I_3 + -R_3 \times I_1 = 0. \\ R_4 \times I_2 + -R_5 \times I_3 + -R_3 \times I_1 = 0. \\ R_5 \times I_3 + E_2 = 0. \end{cases}$$