E1 - LOIS GÉNÉRALES DE L'ÉLECTROCINÉTIQUE

OBJECTIFS

L'**Électrocinétique** est la branche de l'**Électromagnétisme** qui étudie le transport des charges électriques dans les circuits conducteurs. Ses applications, de l'**électrotechnique** à l'**électronique**, ont révolutionné la société humaine, à tel point que l'on peut placer l'invention du circuit électrique au même niveau que celles de l'agriculture, de la roue ou de l'écriture dans l'histoire de l'Humanité. Elle a envahi tous les secteurs de l'économie et de la vie quotidienne et jamais une société n'a été autant tributaire d'une technologie. Il suffit d'imaginer ce qu'il nous arriverait si la terre était privée de tout courant électrique pendant vingt-quatre heures...
L'énergie électrique est essentiellement obtenue par conversion d'énergie chimique, dans les centrales thermiques – les énergies hydrauliques (barrages) et nucléaires (centrales) restant minoritaires à l'échelle planétaire. Elle est ensuite distribuée sous forme de courant alternatif par un réseau triphasé en toile d'araignée et un sous-réseau diphasé radial à tous les utilisateurs.

Du fait de ses applications innombrables, l'**Électrocinétique** est enseignée dans un but pratique. Il ne s'agit pas d'exposer des théorie spectaculaires ou de réaliser des prouesses mathématiques, mais de décrire les situations simples et concrètes que rencontre la technologie.

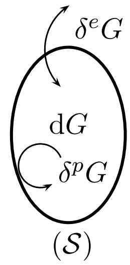
Objectifs de cette leçon :
- Vocabulaire et concepts de base de l'électrocinétique.
- Lois de KIRCHHOFF et cadre dans lequel elles sont valables.
- Étude énergétique d'un dipôle.

I COURANT ÉLECTRIQUE

I.1 Charge

◇ **Définition :** Une grandeur physique est une grandeur **extensive** lorsqu'elle est proportionnelle à la quantité de matière.
Le bilan d'une telle grandeur caractérisant un système $\mathcal{S}$, entre t et $t + \mathrm{d}t$, s'écrit :

$$\boxed{\mathrm{d}G = \delta^e G + \delta^p G} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \mathrm{d}G \text{ variation de la grandeur } G \text{ de } \mathcal{S} \text{ pendant } \mathrm{d}t \\ \delta^e G \text{ le terme d'échange (entre } \mathcal{S} \text{ et le milieu extérieur)} \\ \text{et } \delta^p G \text{ le terme de production(spécifique à } \mathcal{S}). \end{cases}$$



Principe de conservation de la charge : La charge est une grandeur extensive **conservative**.
→ La charge électrique ne peut être ni créé, ni détruite ; elle ne peut être qu'échangée :

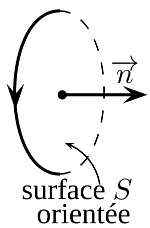
$$\boxed{\mathrm{d}Q = \delta^e Q} \text{ car } \boxed{\delta^p Q \equiv 0} \text{ – Il s'agit d'une loi fondamentale de la physique.}$$

Conséquence en électrocinétique : un générateur ne créé aucune charge ; par contre, il peut communiquer aux charges une énergie électrique et les mettre ainsi en mouvement.

I.2 Intensité

◇ **Définition :** L'**intensité** d'un courant à travers une surface S orientée est égale à la charge électrique qui traverse S par unité de temps :

$$\boxed{i = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}} \quad \text{où} \quad \begin{cases} i \text{ en ampère } (A) \\ \mathrm{d}Q \text{ est la charge élémentaire (en coulomb, } C) \text{ traversant } S \\ \text{pendant la durée élémentaire } \mathrm{d}t \text{ (en seconde, } s) \end{cases}$$



♦ **Q :** Si $i = 10\ mA$ dans un conducteur métallique de section S, quel est le nombre d'électrons N qui traversent cette section par seconde ?

Rép. : En régime stationnaire, $i = \dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = \dfrac{Q}{\tau}$ avec $Q = N.e$, $e = |q_e| = 1,6.10^{-19}\ C$ et $\tau = 1\ s$.

Soit $\boxed{N = \dfrac{i.\tau}{e} \simeq 6.10^{16} \text{ électrons}}$ (60 millions de milliards !).

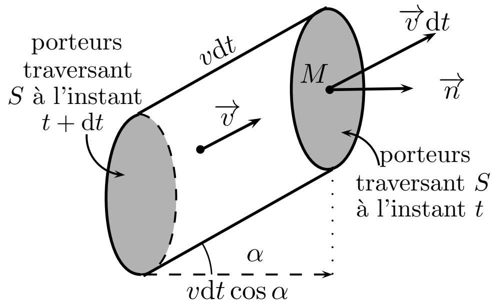
I.3 Vecteur densité de courant

a Définition

• On fait les hypothèses suivantes :

- Soit un matériau conducteur dans lequel tous les porteurs de charge sont de même type : tous les porteurs portent la même charge q (supposée positive sur le schéma).
- chaque porteur a une vitesse assimilée à la vitesse de groupe $\overrightarrow{v}$ (cf. cours d'Électromagnétisme).
- la densité volumique des porteurs (n, en m^{-3}) est uniforme.

• Pendant la durée élémentaire dt les porteurs qui traversent la surface S (plane et orientée) sont contenus :
- dans le cylindre de base S,
- de génératrice $\overrightarrow{v}\mathrm{d}t$
- et de hauteur $v\mathrm{d}t\cos\alpha$.



• Le volume de ce cylindre est $\mathrm{d}V = v\mathrm{d}t\cos\alpha.S$
Il contient le nombre dN de porteurs de charge qui traversent S entre t et $t+\mathrm{d}t$: $\mathrm{d}N = n.\mathrm{d}V$.
La charge qui traverse S pendant la durée dt est donc : $\mathrm{d}Q = q.\mathrm{d}N = q.n.v\mathrm{d}t\cos\alpha.S$
L'intensité du courant qui traverse S est donc : $i = \dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = nqv\cos\alpha S$

• À la surface S orientée par le vecteur unitaire $\overrightarrow{n}$, on associe le vecteur surface : $\boxed{\overrightarrow{S} = S\overrightarrow{n}}$.
Or, $\overrightarrow{v}\cdot\overrightarrow{n} = v\cos\alpha$, d'où : $\boxed{i = nq\overrightarrow{v}\cdot\overrightarrow{S} \equiv \overrightarrow{j}\cdot\overrightarrow{S}}$

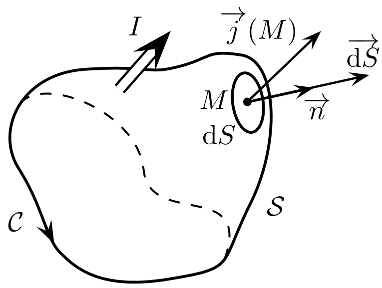
◇ **Définition :** On appelle **vecteur densité volumique de courant** et on note $\overrightarrow{j}$ le vecteur (exprimé en $A.m^{-2}$) :

$$\overrightarrow{j} = nq\overrightarrow{v} \quad \text{où} \quad \begin{cases} n \text{ est la densité volumique de porteurs (en } m^{-3}) \\ q \text{ est la charge d'un porteur (en } C) \\ \overrightarrow{v} \text{ est la vitesse d'ensemble des porteurs (en } m.s^{-1}) \end{cases}$$

Ou encore : $\overrightarrow{j} = \rho\overrightarrow{v}$ où ρ est la densité volumique de charges mobiles (en $C.m^{-3}$).

◇ **Définition :** (Généralisation)
L'**intensité** qui traverse une surface S *quelconque* et *orientée par un contour $\mathcal{C}$* est égale au **flux de la densité de courant** à travers S :

$$i = \iint_{S/\mathcal{C}} \overrightarrow{j}(M)\cdot\overrightarrow{\mathrm{d}S} \quad \text{avec} \quad \overrightarrow{\mathrm{d}S} = \mathrm{d}S.\overrightarrow{n}_{(M)}$$



b Courants créées par différents types de porteurs

Dans un milieu conducteur, la densité de courant totale $\overrightarrow{j}$ est la somme des densités de courants correspondant à chaque type de porteurs de charges :

$$\boxed{\overrightarrow{j} = \sum_k \overrightarrow{j_k} = \sum_k n_k q_k \overrightarrow{v_k} = \sum_k \rho_k \overrightarrow{v_k}}$$

c Exercice : section des fils électriques

Les fils de cuivre utilisés dans les installations domestiques supportent sans dommage une densité volumique de courants de l'ordre de 7 $A.mm^{-2}$.

♦ **Q :** Quelle est la section minimale d'un fil cylindrique destiné à véhiculer un courant de 16 A ?

Rép : Soit S l'aire de la section droite du fil cylindrique.
Supposons une répartition uniforme de courants, c'est-à-dire un vecteur densité volumique de courants $\overrightarrow{j}$ identique en tout point du fil, donc de sa section S.

On a : $i = \int_{S/C} \overrightarrow{j} \cdot \overrightarrow{\mathrm{d}S} = \int_{S/C} j\overrightarrow{n} \cdot \overrightarrow{n}\mathrm{d}S = \int_{S/C} j.\mathrm{d}S = j\int_{S/C} \mathrm{d}S = j.S.$

Puisque $I = 16\ A$ et que la densité de courants ne doit pas dépasser $j_{max} = 7\ A.mm^{-2}$,

on conclut : $\boxed{S_{min} = \frac{I}{j_{max}} \simeq 2,3\ mm^2}$

II LOI D'OHM

Physiciens

Fils de serrurier, Georg OHM commence à travailler avec son père. À la suite de plusieurs séjours en Suisse, il termine ses études à Erlangen et il accepte un modeste poste à Bamberg. Quelques années plus tard, il est très heureux d'être nommé à Cologne où il trouve un environnement et des moyens propices à ses recherches.

G. OHM est l'auteur en 1827 de la loi fondamentale qui relie la tension électrique aux bornes d'un conducteur à l'intensité qui le parcourt. Il découvre cette loi relativement simple après des séries de mesures très délicates sur les températures locales et les forces exercées au sein même des conducteurs.

Nommé professeur à l'Académie Militaire de Berlin, puis à l'Institut Polytechnique de Nuremberg et enfin en 1849 à l'Université de Munich, il poursuit ses travaux dans les domaines de la polarisation des piles électriques, de l'acoustique, de la polarisation de la lumière.

Georg Simon **Ohm**
Erlangen (Bavière) 1789 - Munich 1854

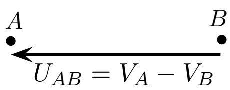
Il se fait remarquer par des expériences spectaculaires et par des traitements mathématiques sophistiqués. Dans le domaine de l'acoustique, il montre en 1843 que l'oreille est capable de séparer dans un son complexe les différentes composantes sinusoïdales.

II.1 Tension et potentiel électrique

• Le mouvement des charges qui constitue le courant dans une certaine région de l'espace est provoqué par un déséquilibre de nature électrique au sein de celle-ci. On définit en tout point de l'espace un champ scalaire noté $V(M)$ qu'on appelle **potentiel électrique**.

Nous ne pourrons définir correctement le potentiel électrique que dans le cours d'**Électromagnétisme**. Pour le moment, il suffit de savoir que lorsque le potentiel électrique n'est pas uniforme, il apparaît un **champ électrique** $\overrightarrow{E}$. Alors, les porteurs de charges mobiles sont soumis à la **force électrique** $q\overrightarrow{E}$ qui leur communique un mouvement d'ensemble. Ils engendrent alors un **courant électrique** (cf.**I**).

• la description d'une portion de circuit électrique comprise entre deux points A et B fait donc appel à deux grandeurs, d'une part l'intensité du courant, d'autre part la différence de potentiel $U_{AB} = V_A - V_B$ entre A et B.

> ◇ **Définition :** On appelle **tension (électrique)** la différence de potentiel entre A et B. Elle s'exprime, comme le potentiel, en volts (V).
> Par convention, la tension U_{AB} entre les points A et B se représente dans un schéma électrique par une flèche dirigée vers le point A.
>
> 
>

Rq1 : $\boxed{U_{AB} > 0 \Leftrightarrow V_A > V_B}$: si une tension est positive, alors la flèche de tension est dans le sens des potentiels croissants.
Rq2 : Les potentiels V sont définis à une constante près. *Seule la tension ou différence de potentiels a un sens physique.*

II.2 Loi d'Ohm

▮ Pour de nombreux conducteurs, la **tension** (= différence de potentiels) entre les extrémités du conducteur est proportionnelle à l'**intensité** traversant le conducteur :

$$\boxed{U_{AB} = V_A - V_B = RI_{A\to B} \Leftrightarrow I_{A\to B} = GU_{AB}} \quad \text{avec} \quad \boxed{R = \frac{1}{G}}$$

R est la **résistance** (en ohm, Ω) du **conducteur ohmique**
et G la **conductance** (en siemens, S).

Cas particulier : conducteur métallique cylindrique homogène, de longueur l et de section S :

$$\boxed{R = \rho\,\frac{l}{S}} \quad \text{avec} \quad \boxed{\rho \equiv \frac{1}{\gamma}} \quad \begin{cases} \rho \text{ s'appelle la } \textbf{résistivité} \text{ (en } \Omega.m) \\ \gamma \text{ s'appelle la } \textbf{conductivité} \text{ (en } S.m^{-1}) \end{cases}$$

Ordres de grandeur : • **conducteur** : $\rho \sim 10^{-8}\ \Omega.m$ et $\gamma \sim 5.10^{7}\ S.m^{-1}$:
$\rho_{Au} = 2,35.10^{-8}\ \Omega.m$ et $\rho_{Cu} = 1,67.10^{-8}\ \Omega.m$
• Pour un **isolant** comme le verre : $\rho \sim 10^{6}\ \Omega.m$ et $\gamma \sim 10^{-6}\ S.m^{-1}$.

♦ **Q :** Quelle est la résistance d'un fil électrique en cuivre de diamètre $\phi = 1\ mm$ et de longueur $l = 1\ m$? Pour un fil de même nature mais de diamètre double ($\phi' = 2\ mm$) ?

Rép. : $\boxed{R_{fil} = \rho_{Cu}\frac{l}{S} = \rho_{Cu}\frac{1}{\pi(\frac{\phi}{2})^2} \simeq 2.10^{-2}\ \Omega}$ et $\boxed{R'_{fil} \simeq 5.10^{-3}\ \Omega}$

▮ **Conclusion :**
La résistance d'un fil de connexion est négligeable devant les autres résistances d'un circuit : $\boxed{R_{\text{fil}} \simeq 0\ \Omega \Leftrightarrow U_{\text{fil}} \simeq 0\ V}$

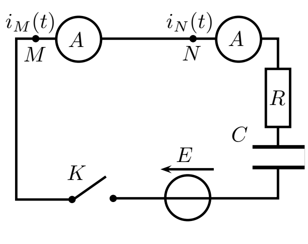
III Approximation des régimes quasi-stationnaires

III.1 Régime permanent et régime variable

◇ **Définition :** • On parle de réseau en **régime continu** [a] (ou **stationnaire** ou **permanent**) lorsque les grandeurs (intensité, courant, charge. . .) sont indépendantes du temps. On note de telles grandeurs par des majuscules (I, U_{AB}, Q_0. . .).
• Un réseau électrique fonctionne en **régime variable** lorsque les grandeurs qui lui sont associées varient au cours du temps ($i(t)$, $u(t)$, $q(t)$. . .).

a. ce terme n'a aucun rapport avec la continuité mathématique.

III.2 Approximation des régimes quasi-stationnaires



♦ **Q :** Soit le circuit ci-contre. Le condensateur C est initialement déchargé. Après la fermeture de l'interrupteur K, les ampèremètres vont-ils indiquer, à chaque instant, la même valeur de l'intensité ?
Rép : en toute rigueur, non.
Car l'expérience montre que l'intensité i (la tension u, et toutes leurs manifestations) sont des grandeurs qui se **propagent** avec une vitesse énorme ($c \sim c_0 = 3.10^8\ m.s^{-1}$) mais avec une vitesse finie.

Ainsi, en toute rigueur, $i_N(t)$ est en retard sur l'intensité $i_M(t)$: $i_N(t) = i_M(t-\tau)$, où τ est la **durée de propagation** du signal électrique de M à N.
♦ **Q :** Pourtant, en régime variable (sinusoïdal le plus souvent) nous considérerons que l'intensité est la même en tous points d'une même branche, *sous certaines conditions*.
D'où la question : à quelle condition peut-on parler de *l'*intensité i dans une branche d'un circuit, c'est-à-dire, à quelle condition a-t-on : $i_M(t) \simeq i_N(t)$?
Rép : Une étude complète nécessite le cadre de l'**Électromagnétisme** et sera abordée en Math. Spé. Mais nous pouvons retenir que cela nécessite que la durée de propagation $\tau = \dfrac{MN}{c}$ soit négligeable devant les durées caractéristiques du régime étudié (temps de relaxation lorsque le signal est transitoire, ou période lorsque le signal est périodique).

❚ L'**approximation des régimes quasi stationnaires** ($ARQS$) ou **quasi permanents** ($ARQP$) revient à négliger tous les **effets liés à la propagation** des signaux électro-magnétiques sous forme de tension ou de courant.
Alors, l'intensité est la même en tous les points d'une branche d'un circuit :

$$\boxed{i_M(t) = i_N(t) = i(t)}$$

❚ **Conditions de l'ARQS pour un signal sinusoïdal :**

$$\lambda \gg l \iff \boxed{T \gg \tau} \iff f \ll \frac{1}{\tau} \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{l}{c}$$

- l est la *dimension caractéristique* du circuit (longueur d'un fil de connexion)
- τ est la *durée caractéristique* de propagation des signaux.
- T est la *période* du signal sinusoïdal, $f = \frac{1}{T}$ sa *fréquence* et $\lambda = c.T$ sa *longueur d'onde*.

Ordre de grandeur : En pratique, au laboratoire, $l \sim 1\ m \rightarrow \tau = \dfrac{l}{c} \sim \dfrac{1}{3.10^8} \simeq 3.10^{-9}\ s = 3\ ns$.
Et la condition : $T \gg \tau \iff f < \dfrac{1}{\tau} = 3.10^8\ Hz$.

Conclusion : pour $\boxed{0\ Hz < f < 1\ MHz} \ll 3.10^8\ Hz$, on est dans l'$ARQS$ au laboratoire.
Alors la mesure de l'intensité dans une branche a un sens.
Ceci revient à travailler avec des signaux de période : $T > \dfrac{1}{f_{max}} = 10^{-6}\ s = 1\ \mu s$.

IV LOIS DE KIRCHOFF

IV.1 Vocabulaire

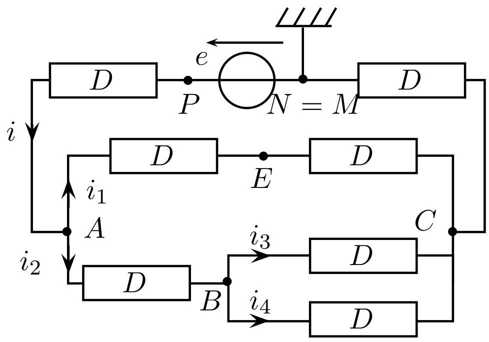
Fil de connexion : fil dont la résistance est négligeable devant les autres résistances du montage.
Masse Signal : référence des potentiels d'un circuit *donné*. ce potentiel n'est pas forcément constant dans le temps (mais ce n'est pas grave puisque seules les différences de potentiels nous intéressent). Symbole : .
Masse Carcasse ou « **Terre** » : c'est un point de potentiel constant. La carcasse métallique d'un appareil électrique ayant vocation à être reliée à la terre par l'intermédiaire de la prise de terre et la Terre étant conventionnellement au potentiel nul, la carcasse électrique peut servir de référence des potentiels. Symbole : .
Dipôle : composant électrique limité par deux bornes, appelées encore « pôles ».
Multipôles : composant électrique dont l'accès se fait par plus de deux bornes.
En particulier : les **quadripôles**.
Souvent, les quadripôles possèdent une borne commune entre l'entrée et la sortie.
On branche un quadripôle entre un dipôle d'entrée (« **source** ») et un dipôle de sortie qu'on appelle dipôle d'utilisation ou encore « **charge** ».

Nœud : c'est un point du circuit qui est la borne commune à plus de deux dipôles (et/ou multipôles).
Branche : ensemble de dipôles montés en série et situés entre deux nœuds.
Maille : ensemble de branches formant un contour fermé qu'on ne peut parcourir en ne passant qu'une seule fois par chaque nœud intermédiaire. **Une maille est orientée *arbitrairement* !**
Maille élémentaire : c'est une maille délimitant dans le circuit un enclos connexe.
Réseau ou Circuit : système de conducteurs reliés les uns aux autres (par des fils de connexion) qu'on peut analyser en terme de mailles, nœuds, branches ...

Exercice : Dans le circuit ci-contre, tous les dipôles D sont identiques.
♦ **Q** : Dénombrer les branches (b) et nommer les mailles élémentaires (m) et les nœuds (n).

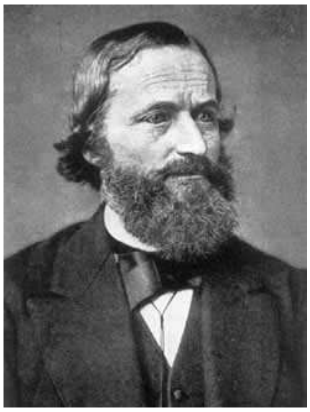
Rép : On compte :
- $b = 5$ branches (autant que d'intensités)
- $m = 3$ mailles élémentaires : $(PAECNP)$, $(ABCEA)$ et (BCB).
- $n = 3$ noeuds : A, B et C.

Attention : N, P et E ne sont pas des nœuds.



Physiciens

Après des études effectuées à Königsberg, Gustav Kirchhoff enseigne la physique à Berlin. **À vingt ans**, il établit les lois qui régissent les courants électriques dans les circuits dérivés (1845). Plus tard, il élabore une théorie générale de l'électricité dans laquelle il introduit les notions de potentiel scalaire et de potentiel vecteur.
Nommé professeur à Breslau, il collabore avec son ami R. Bunsen qui l'entraîne en 1854 à Heidelberg où ils effectuent ensemble des travaux remarquables. Dans une expérience célèbre de spectroscopie des flammes, ils montrent que les raies d'un gaz peuvent être inversées, brillantes à l'émission, obscures à l'absorption. Ils expliquent ainsi le doublet noir du sodium observé en 1814 par J. Franhofer dans le spectre solaire.
Sur la base d'un seul argument de thermodynamique, G. Kirchhoff établit en 1859 la proportionnalité entre le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant des corps chauds.
Introduisant ensuite le concept de corps noir, il identifie en 1862 ce cœfficient de proportionnalité avec la brillance du rayonnement thermique. Il émet également l'hypothèse que les lois du corps noir ne doivent dépendre que de la température, hypothèse qui joue un grand rôle dans les recherches en ce domaine à la fin du XIX^e siècle.
Il invente un spectroscope qu'il utilise avec R. Bunsen pour réaliser en 1859 l'analyse spectrale des composés chimiques. Cette méthode leur permet de découvrir peu après deux éléments chimiques nouveaux, le césium et le rubidium. Le thallium, l'indium et le gallium seront ensuite identifiés avec cette même méthode d'analyse.



Gustav Robert **Kirchhoff**
Königsberg (Allemagne)
1824 - Berlin 1887

IV.2 Loi des nœuds

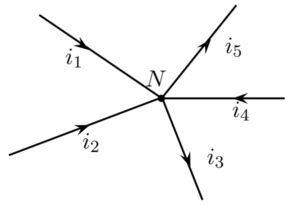
Dans les réseaux et en régime variable, il n'est pas toujours facile de connaître le sens du courant.
→ **On choisit un sens arbitraire du courant pour chaque branche**, le courant réel I étant algébrique.

▮ **Loi des nœuds** : En régime continu, comme dans l'*ARQS*, La somme des intensités des courants arrivant en un nœud N est égale à la somme des intensités qui en repartent :

$$\sum_{\text{allant vers } N} i_j = \sum_{\text{venant de } N} i_k$$

Exemple d'application :
Sur le schéma ci-contre, la loi des nœuds au nœud N donne :
somme des intensités arrivant en N = somme des intensités repartant de N

Soit : $$i_1 + i_2 + i_4 = i_3 + i_5$$



Qu'on peut encore écrire : $$i_1 + i_2 - i_3 + i_4 - i_5 = 0$$

Ce qui conduit au corollaire suivant de la loi des nœuds :

> **Corollaire :** En régime continu, comme dans l'$ARQS$,
> La somme algébrique des intensités en un nœud est nulle : $\boxed{\sum_{\text{nœud}} \epsilon_k i_k = 0}$
> en comptant : - positivement les intensités des courants arrivant en A ($\epsilon_k = +1$)
> - et négativement celles des courants repartant de A ($\epsilon_k = -1$).

IV.3 Loi des mailles

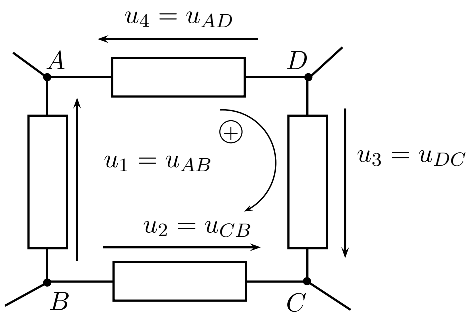
> **Loi des mailles :** En régime continu comme dans l'$ARQS$,
> La somme algébrique des tensions prises le long d'une maille orientée est nulle :
> $\boxed{\sum_{\text{maille}} \epsilon_k u_k = 0}$ avec $\begin{cases} \epsilon_k = +1 \text{ si la tension } u_k \text{ est dirigée dans le sens } \textit{choisi} \text{ pour la maille} \\ \epsilon_k = -1 \text{ sinon} \end{cases}$

Exemple d'application :

Loi des mailles pour la maille **orientée** ($ADCBA$) ci-contre :

$$-u_4 + u_3 - u_2 + u_1 = 0$$

Soit :
$$u_{DA} + u_{CD} + u_{BC} + u_{AB} = 0$$



> **Corollaire : loi d'additivité des tensions** (ou relation de CHASLES) :
> Si A, B et C sont trois points d'un circuit, alors : $\boxed{u_{AC} = u_{AB} + u_{BC}}$

IV.4 Application

On reprend le circuit étudié dans l'exercice de **IV.1**.
♦ **Q :** Écrire toutes les lois des nœuds et toutes les lois des mailles élémentaires.
Données : $U_{PN} = 12\ V$, $U_{AC} = 3,6\ V$, $U_{BC} = \dfrac{U_{AB}}{2}$, $i = 0,042\ A$ et $i_4 = 0,012\ A$.
♦ **Q :** Déterminer toutes les intensités du circuit, la tension aux bornes de chaque dipôle et le potentiel de chaque point.

Rép. : Lois des nœuds :

Nœud A :	$i = i_1 + i_2$	(N_1)
Nœud B :	$i_2 = i_3 + i_4$	(N_2)
Nœud C :	$i_1 + i_3 + i_4 = i$	$(N_3) = (N_1) + (N_2)$

Lois des mailles :

$(PACNP)$:	$U_{PN} + U_{AP} + U_{EA} + U_{CE} + U_{NC} = 0$	(M_1)
$(ABCEA)$:	$U_{BA} + U_{CB} + U_{EC} + U_{AE} = 0$	(M_2)
(BCB) :	$U_{CB}(i_4) + U_{BC}(i_3) = 0$	(M_3)

• Deux dipôles identiques parcourus par le même courant sont soumis à la même tension. Donc :
∘ $U_{AE} = U_{EC}$ pour la branche parcourue par l'intensité i_1.
Donc $U_{AC} = U_{AE} + U_{EC} = 2U_{AE}$, soit $\boxed{U_{AE} = U_{EC} = \dfrac{U_{AC}}{2} = 1,8\ V}$.

∘ $U_{AP} = U_{NC}$, soit $(M1) \Leftrightarrow e + 2U_{AP} + U_{CA} = 0 \Rightarrow \boxed{U_{PA} = U_{CN} = \frac{e - U_{AC}}{2} = 4,2\ V}$

De plus, comme $U_{BC} = \frac{U_{AB}}{2}$ et $U_{AC} = U_{AB} + U_{BC} = 3,6\ V$, on en déduit :

$\boxed{U_{AB} = \frac{2}{3}U_{AC} = 2,4\ V}$ et $\boxed{U_{BC} = \frac{U_{AB}}{2} = 1,2\ V}$.

• Entre B et C, on a deux dipôle identiques soumis à la même tension, donc : $\boxed{i_3 = i_4 = 0,012\ A}$.

La loi des nœuds en B donne : $\boxed{i_2 = 2i_3 = 0,024\ A}$. Celle en A : $\boxed{i_1 = i - i_2 = 0,018\ A}$.

• Par définition de la masse, $\boxed{V_N = V_M = 0\ V}$.

• La définition de la tension $(U_{ab} = V_a - V_b)$ permet d'obtenir les potentiels de tous les points :

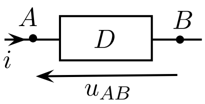
$\boxed{V_P = 12\ V \qquad V_A = 7,8\ V \qquad V_B = 5,4\ V \qquad V_C = 4,2\ V \qquad V_E = 6\ V}$

V DIPÔLE ET PUISSANCE ÉLECTROCINÉTIQUE

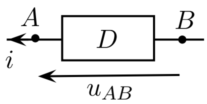
V.1 Caractéristique d'un dipôle

◇ **Définition :** Deux conventions pour étudier un dipôle :

- i et u de *sens opposés* $(i = i_{A \to B})$: il s'agit de la **convention récepteur** :



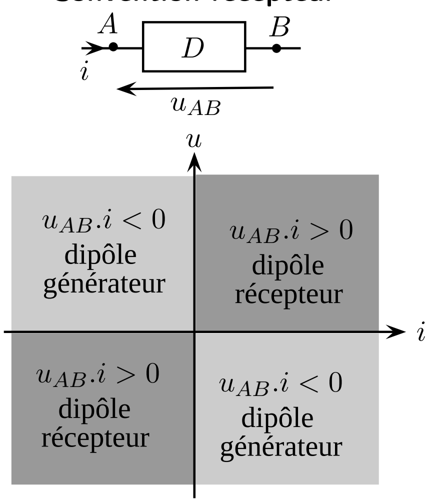
- i et u sont de *même sens* $(i = i_{B \to A})$: il s'agit de la **convention générateur** :



◇ **Définition :** Deux courbes permettent de caractériser un dipôle :
- La courbe $u = u(i)$ est la **caractéristique Tension-Intensité**.
- La courbe $i = i(u)$ est la **caractéristique Intensité-Tension**.

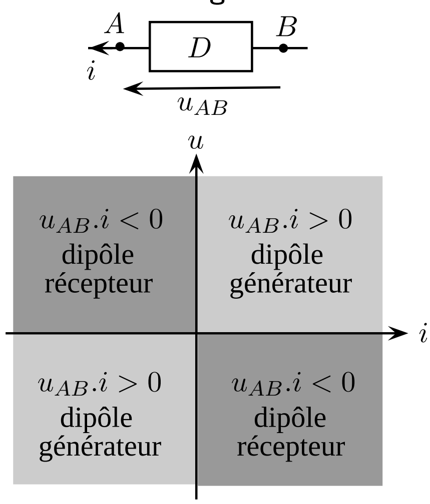
Rque : Toujours indiquer la **convention** choisie lorsqu'on trace une caractéristique $u(i)$ ou $i(u)$. Pour cela, indiquer le symbole du dipôle et l'indication des sens de i et u à proximité de la caractéristique.

Convention récepteur



En convention récepteur, si l'intensité traversant le dipôle et la tension à ses bornes ont le même signe, alors le dipôle possède un **caractère récepteur**.

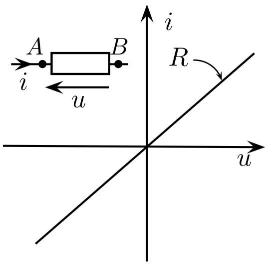
Convention générateur



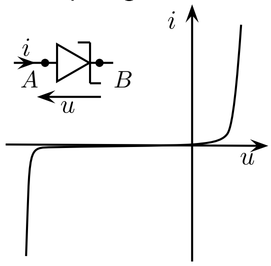
En convention générateur, si l'intensité traversant le dipôle et la tension à ses bornes ont le même signe, alors le dipôle possède un **caractère générateur**.

◇ **Définition :** On appelle :

Dipôle Symétrique : un dipôle dont le fonctionnement ne dépend pas du sens du courant.
Exemples : résistance, condensateur, bobine, thermistance...



Dipôle di-symétrique ou encore **dipôle « polarisé » :** un dipôle dont le fonctionnement dépend du sens du courant.
Exemples : diode, condensateur électrochimique, générateurs...



Rq : la caractéristique Intensité-Tension (ou Tension-Intensité) d'un dipôle polarisé n'est pas symétrique par rapport à l'origine $O(0,0)$, d'où le nom de «dipôle non-symétrique».

◇ **Définition : Dipôle passif :** dipôle ayant une tension nulle à ses bornes quand il n'est parcouru par aucun courant :

$$I = 0 \iff U = 0 \qquad \iff \qquad \text{sa caractéristique passe par l'origine.}$$

Dans le cas contraire, on parle d'un **dipôle actif**.

Exemples :
- dipôles passifs : diode, résistance.
- dipôles actifs : générateur de courant ($I(U=0) \neq 0$) ou de tension ($U(I=0) \neq 0$).

V.2 Puissance reçue par un dipôle