

Chapitre 02

Systèmes électriques en régime continu

Capacités exigibles :

- Connaître et savoir utiliser les lois fondamentales de l'électricité (loi des nœuds, loi des mailles, loi d'Ohm).
- Comprendre, connaître et savoir utiliser la relation du pont diviseur de tension.
- Savoir calculer la résistance équivalente de deux (ou plusieurs résistances pour les ER) en série et en parallèle.
- Savoir calculer la puissance, l'énergie fournie par un générateur ou consommée par un récepteur.
- Savoir calculer l'autonomie d'une batterie à partir de sa capacité et de l'intensité électrique qu'elle délivre.
- Connaître le modèle équivalent (de Thévenin, dénomination non exigible) d'un générateur de signaux constants.

La plupart des systèmes électroniques/informatiques « connectés » nécessitent une tension d'alimentation continue (c'est-à-dire un signal de nature électrique, de valeur constante dans le temps) et une intensité continue délivrées par une batterie.

Exemples :

Enceintes portatives, smartphones, systèmes connectés de type « capteurs » (réseaux LORA / SIGFOX / Objenious), carte Arduino sur un système « portatif »

Les composants électroniques actifs nécessitent aussi une tension d'alimentation continue pour fonctionner.

Exemples :

Amplificateur linéaire intégré TL081 (-15 V et $+15\text{ V}$), écran OLED SSD1306 ($3,3\text{ V}$), le capteur de courant HLSR-P ($5,0\text{ V}$) etc.

❖ **Convention en Physique :**

Pour des signaux ne variant pas au cours du temps (« constants » ou encore « continus »), on utilise des lettres majuscules pour les étudier.

Pour des signaux variant au cours du temps, on utilise des lettres minuscules.

Par exemple, pour des tensions :

- Une tension constante de $5,0\text{ V}$ peut-être écrite ainsi : $U = 5,0\text{ V}$
- Une tension variant au cours du temps ; peut-être représentée par u ou encore $u(t)$.

Dans la suite du chapitre, on s'intéresse aux signaux constants (régime continu).

I. Qu'est-ce qu'une tension électrique ? une intensité électrique ?A. Qu'est-ce qu'une tension électrique ?Rappels :

La conduction électrique dans un matériau conducteur est modélisée par l'existence d'« électrons libres » dans ce matériau. Un matériau isolant n'en possède pas.

Dans ce modèle, les électrons sont dits « libres » car ils sont capables de se « déplacer » au sein d'un matériau conducteur.

Un électron est chargé négativement : $q_{electron} = -1,60 \times 10^{-19}\text{ C}$

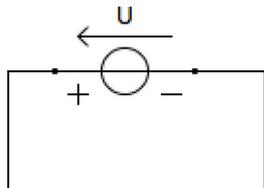
❖ 1^{er} cas : générateur seul – circuit ouvertDéfinition : tension électrique

Une tension électrique constante (ou « continue »), notée U , représente une différence de potentiel électrique (ou d'états électriques) entre deux points d'un système électrique.

L'unité d'une tension électrique est le Volt, de symbole V .

Symbole du générateur et schématisation d'une tension :

Une différence de potentiel électrique peut être créée par un générateur de tension (constante).



Le symbole d'un générateur idéal de tension est celui présenté à gauche.

On schématise une tension électrique, par une flèche « en dehors » du circuit.

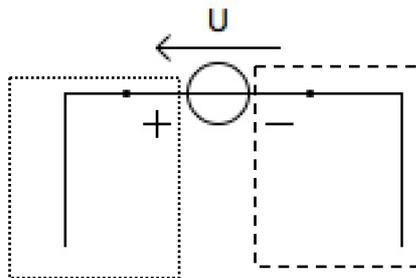
La pointe de la flèche est sur la borne considérée positive.

Le générateur de tension crée un déséquilibre dans la répartition des charges / des électrons libres :

- Le fil relié à la borne négative présente un excès d'électrons,
- Le fil relié à la borne positive présente un défaut d'électrons.

Zone A :

Points du fil présentant un défaut d'électrons (défaut de charges négatives)

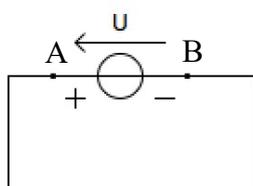


Zone B :

Points du fil présentant un excès d'électrons (excès de charges négatives)

Tous les points du fil dans la zone A sont au même potentiel électrique.

Tous les points du fil dans la zone B sont au même potentiel électrique.

Convention sur l'écriture de la tension :

Si des lettres sont attribuées à deux points du circuit, la pointe de la flèche (symbolisant la tension) désigne la première lettre de cette tension.

Dans l'exemple ci-contre, la tension est donc notée U_{AB}

Conséquences : à comprendre

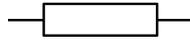
Dans l'exemple ci-dessus, le potentiel électrique d'un point de la zone A est plus élevé que le potentiel électrique d'un point de la zone B.

La différence de potentiel (ou tension électrique) entre deux points d'une même zone est nulle. Cela revient à dire que la tension aux bornes d'un fil est nulle.

Dans ce premier cas que nous venons d'étudier, les électrons ne peuvent pas se déplacer entre les deux zones.

B. Qu'est-ce qu'un conducteur ohmique ?

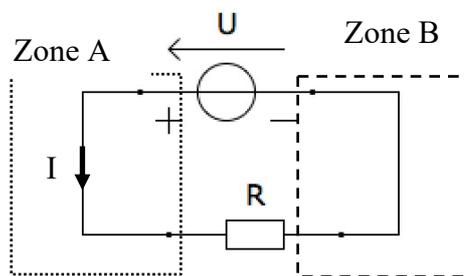
Un conducteur ohmique est caractérisé par sa résistance électrique, notée R , dont l'unité est l'ohm, de symbole Ω . Le symbole électrique du conducteur ohmique est :



C. Qu'est-ce qu'une intensité électrique ?

❖ 2^{ème} cas : générateur avec un conducteur ohmique – circuit fermé

On place entre les deux zones A et B, un matériau conducteur : un conducteur ohmique.



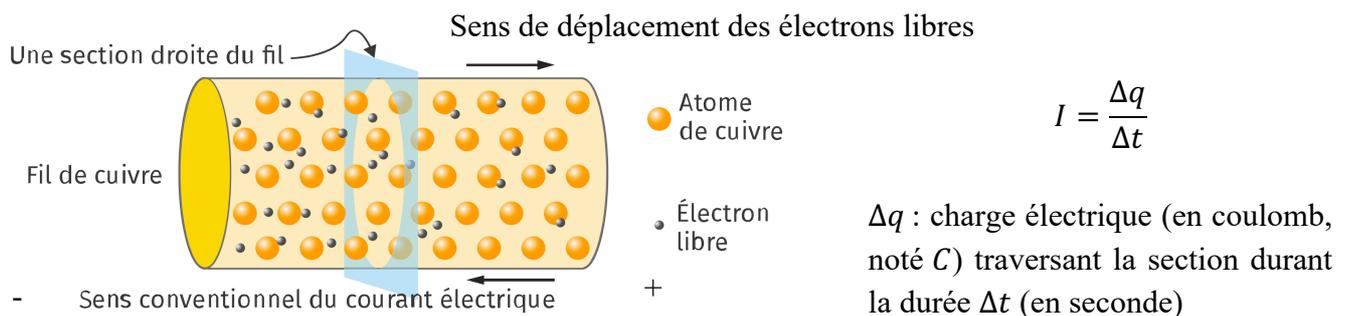
Des électrons libres peuvent donc quitter la zone B pour aller dans la zone A en traversant le conducteur ohmique.

Une fois arrivés dans la zone A, des électrons libres sont réinjectés dans la zone B par le générateur, afin de maintenir le déséquilibre des potentiels électriques entre les deux zones.

Définition de l'intensité électrique :

Le courant électrique correspond au déplacement des électrons libres au sein d'un conducteur électrique, de section S .

La grandeur nommée intensité, notée I , dont l'unité est l'ampère (de symbole A) correspond au débit de charge électriques dans ce conducteur, de section S .



1 A signifie donc 1 C/s ou encore 1 C.s⁻¹

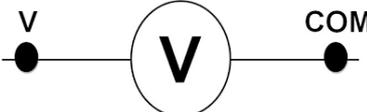
Par convention, on schématise cette intensité électrique, par une flèche « sur » le fil du circuit, allant toujours de la borne positive à la borne négative du générateur (sens opposé au « déplacement » des électrons libres).

Remarque : vitesse de déplacement des électrons libres et vitesse de propagation de l'onde

La vitesse moyenne de déplacement de ces charges électrique est de l'ordre du cm/h ou de la dizaine de cm/h , ce qui est très lent. Comment expliquer l'établissement quasi-instantané du courant lorsque l'on ferme un interrupteur ?

C'est en réalité un mouvement de proche en proche des électrons libres : le phénomène étudié peut être modélisé par une onde, de vitesse de propagation dans le cuivre, entre $1,75 \times 10^8 m/s$ et $2,00 \times 10^8 m/s$ (proche de la vitesse de propagation des rayonnements électromagnétiques dans le vide $c = 3,00 \times 10^8 m/s$).

D. Mesurage d'une tension, d'une intensité ou d'une résistance :❖ **Comment réaliser le mesurage d'une tension ?**



Le mesurage d'une tension électrique s'effectue à l'aide d'un voltmètre, placé en dérivation (ou en parallèle), entre les deux points étudiés du circuit.

La borne « V » du voltmètre sur le point ayant un potentiel électrique considéré positif (c'est-à-dire la première lettre, la pointe de la flèche)

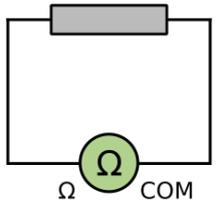
❖ **Comment réaliser le mesurage une intensité ?**



Le mesurage d'une intensité électrique s'effectue à l'aide d'un ampèremètre, placé en série, dans la branche étudiée du circuit.

La borne « A » est placée afin que l'intensité du courant I entre par la borne A.

❖ **Comment réaliser le mesurage d'une résistance ?**



Le mesurage d'une résistance électrique s'effectue à l'aide d'un ohmmètre, branché aux bornes du dipôle étudié, en dehors du circuit.

Le sens de branchement des bornes Ω et COM n'a pas d'importance pour l'obtention de la valeur expérimentale.

II. Lois de Kirchhoff :A. Concernant l'intensité électrique :❖ **Pour des dipôles en série :**

En régime continu, dans un circuit en série (ou une branche contenant des dipôles en série), l'intensité est la même en tout point.

❖ Pour des dipôles en dérivation : loi des nœuds

Soit un nœud N , sur lequel arrivent des courants d'intensités I_k . La loi des nœuds s'écrit alors :

$$\sum_{k=1}^n \varepsilon_k \times I_k = 0$$

avec $\varepsilon_k = +1$, si le courant I_k arrive sur le nœud
 $\varepsilon_k = -1$, si le courant I_k repart du nœud

B. Concernant la tension électrique :

❖ Loi des mailles (ou loi d'additivité des tensions) :

Soit une maille composée de plusieurs dipôles (non nécessairement en série). Les tensions aux bornes des dipôles sont notées U_k .

On oriente arbitrairement la maille : on place dans la maille une flèche tournante (avec un signe positif).

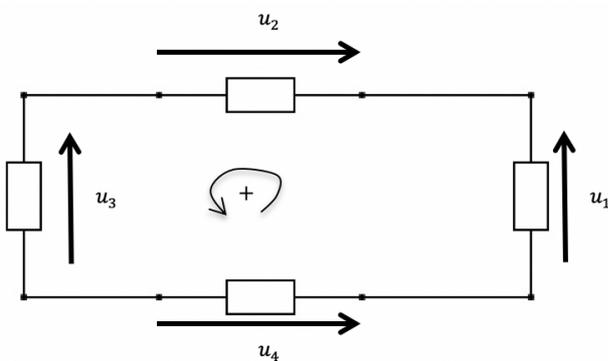
La loi des mailles s'écrit alors :

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

avec $\varepsilon_k = +1$, si la tension U_k est dans le même sens que le sens positif de la maille

$\varepsilon_k = -1$, si la tension U_k est dans le sens opposée de celui de la maille

Exemple :



Sur l'exemple ci-contre, la loi des mailles donne :

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

III. Loi d'Ohm et notion de résistance équivalente :

A. Convention générateur et convention récepteur :

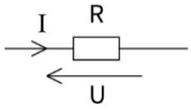
Lorsque l'on étudie un dipôle électrique soumis à un signal (ou une tension) constant, on peut adopter au choix deux conventions.

<p>La flèche représentant la tension U est dans le sens opposé à la flèche représentant l'intensité I</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p>On appelle cette convention, la convention récepteur.</p>	<p>La flèche représentant la tension U est dans le même sens que la flèche représentant l'intensité I</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p>On appelle cette convention, la convention générateur.</p>
--	---

B. Loi d’Ohm pour un conducteur ohmique :

La tension aux bornes d’un conducteur ohmique est proportionnelle à l’intensité qui le traverse :

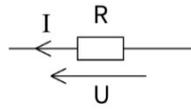
En convention récepteur :



La loi d’Ohm s’écrit :

$$U = R \times I$$

En convention générateur :



La loi d’Ohm s’écrit :

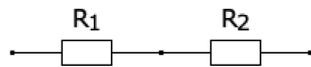
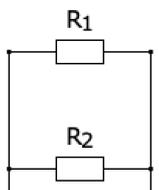
$$U = - R \times I$$

U: tension aux bornes du conducteur ohmique, en volt (de symbole V)
I: intensité traversant le conducteur ohmique, en ampère (de symbole A)
R: résistance du conducteur ohmique, en ohm (de symbole Ω)

C. Résistance équivalente :

On cherche dans ce paragraphe, à modéliser un ensemble de plusieurs conducteurs ohmiques en un seul conducteur ohmique, de résistance équivalente notée $R_{\text{éq}}$.

❖ **Pour deux conducteurs ohmiques :**

	Montage en série	Montage en dérivation
Schéma électrique		
Dipôle équivalent		
Expression de la résistance équivalente	$R_{\text{éq}} = R_1 + R_2$	$\frac{1}{R_{\text{éq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ ou encore $R_{\text{éq}} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$

❖ **Généralisation à n résistances : (pour les ER uniquement) :**

La résistance équivalente $R_{\text{éq}}$ à un ensemble de résistance **en série** $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ est :

$$R_{\text{éq}} = \sum_{k=1}^n R_k$$

La résistance équivalente $R_{\text{éq}}$ à un ensemble de résistance **en dérivation** $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ est :

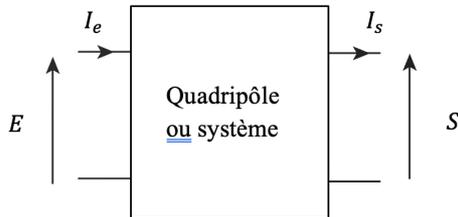
$$\frac{1}{R_{\text{éq}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}$$

IV. Système « pont diviseur de tension » :

A. Qu'est-ce qu'un système/quadripôle ?

Un quadripôle est un système électrique comportant quatre bornes de liaison avec l'extérieur :

- deux bornes reliées à un signal d'entrée
- deux bornes fournissant un signal de sortie.



E : signal/tension d'entrée du quadripôle, en volt

S : signal/tension de sortie du quadripôle, en volt

I_e : intensité entrante du quadripôle, en ampère

I_s : intensité sortante du quadripôle, en ampère

Quelques exemples de quadripôles :

Un transformateur de tension (chargeur de téléphone), un filtre passe-bas, un câble Ethernet, l'espace situé entre une antenne émettrice et une antenne réceptrice ...

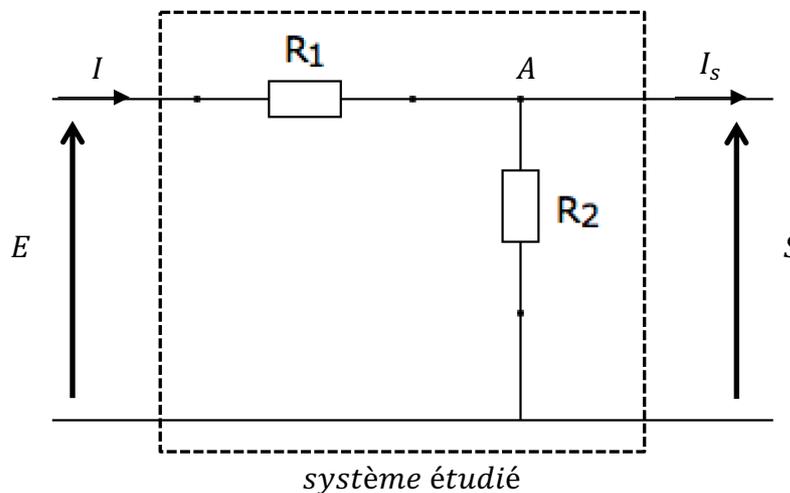
B. Savoir reconnaître un système « pont diviseur de tension »



Vidéo pour comprendre les notions abordées dans ce paragraphe
« Pont diviseur de tension en régime continu »



Le système étudié est le quadripôle suivant :



❖ **Apprendre à repérer un pont diviseur de tension :**

Le système est constitué de deux conducteurs ohmiques dont les résistances respectives sont R_1 et R_2 .

La tension E est la tension aux bornes de R_1 et R_2 .

La tension S est la tension aux bornes de R_2 .

La tension S est mesurée à l'aide d'un voltmètre (ou d'un oscilloscope ou encore d'une carte d'acquisition).

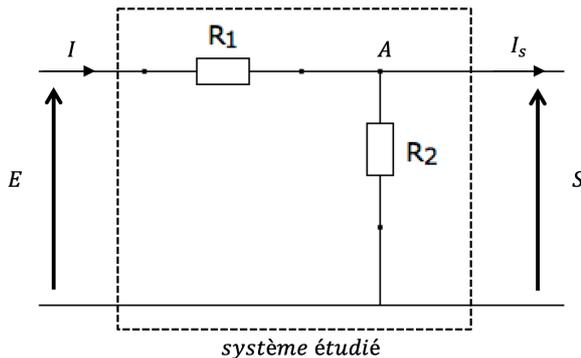
La résistance interne de cet appareil de mesure étant infiniment grande (en théorie), l'intensité du courant de sortie I_s est donc nulle.

En appliquant la loi des nœuds au point A, on obtient que l'intensité circulant dans le conducteur ohmique de résistance R_2 est I . R_1 et R_2 sont donc montées en série.

C. Étude du pont diviseur de tension :

❖ Formule littérale pour le pont diviseur de tension : à connaître par cœur (démonstration dans le TP 03 - appel 0)

Il faut être capable de reconnaître sur un système, un pont diviseur de tension.



Pour un système « pont diviseur de tension », la formule littérale liant la tension de sortie, à la tension d'entrée est la suivante :

$$S = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times E$$

On retiendra que le numérateur de la fraction correspond à la résistance R_2 , la tension S étant aux bornes de cette même résistance R_2 .

❖ Isoler la grandeur R_2 dans l'expression du pont diviseur de tension : à savoir faire

On cherche à isoler R_2 dans l'expression du pont diviseur de tension : $S = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times E$

$$S = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times E \Leftrightarrow S \times (R_1 + R_2) = R_2 \times E$$

On développe :

$$\Leftrightarrow S \times R_1 + S \times R_2 = R_2 \times E$$

On place tous les termes en R_2 dans le même membre :

$$\Leftrightarrow S \times R_1 = R_2 \times E - S \times R_2$$

On factorise par R_2 :

$$\Leftrightarrow S \times R_1 = R_2 \times (E - S)$$

On isole R_2 :

$$\Leftrightarrow \frac{S}{E - S} \times R_1 = R_2$$

$$\Leftrightarrow R_2 = \frac{S}{E - S} \times R_1$$



V. Puissance, énergie en régime continu, comportement des dipôles :

A. Qu'est-ce qu'une puissance ? une énergie ?

Exemple en thermodynamique :

On place une masse $m = 300g$ d'eau liquide (étant initialement à $20^{\circ}C$) dans un four micro-ondes. Pour réussir à faire bouillir cette masse m , il faut fournir une certaine quantité d'énergie.

On suppose que la puissance est constante, tout au long du transfert d'énergie. Quelle que soit la puissance sélectionnée sur le four, la quantité totale d'énergie à fournir est toujours la même.



Plus la puissance sélectionnée est grande, plus la puissance fournie à l'eau de masse m est grande et plus la durée pour arriver à faire bouillir l'eau (température de $100^{\circ}C$) est faible.

❖ **Sens physique de la grandeur « énergie » :**

L'énergie (en joule) représente ce qu'il faut fournir à un système pour l'amener d'un état initial à un état final. La manière dont le chemin est parcouru entre les 2 états n'a pas d'importance.

❖ **Sens physique de la grandeur « puissance » :**

La puissance caractérise le **débit d'énergie** fournie entre l'état initial et l'état final. Elle ne dépend ni de l'état initial, ni de l'état final du système, mais permet de décrire la rapidité de ce transfert d'énergie.

❖ **Lien entre puissance et variation d'énergie : à connaître par cœur**

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}, \text{ ou encore } \Delta E = P \times \Delta t$$

P est la puissance (issue de la variation d'énergie ΔE). Son unité est le watt, de symbole W .

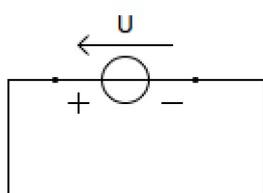
ΔE : variation d'énergie, dont l'unité est le joule, de symbole J

Δt : durée de cette variation d'énergie, en seconde, de symbole s

$1 W$ signifie donc $1 J/s$ ou encore $1 J \cdot s^{-1}$

B. Signal constant, puissance et conventions :

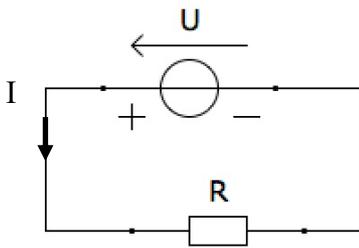
❖ **1^{er} cas : générateur seul – circuit ouvert**



Soit un signal constant U . Ce signal « seul » ne peut ni fournir de l'énergie à l'extérieur, ni recevoir une énergie de l'extérieur. L'énergie électrique du signal est donc constante : elle ne varie pas $\Delta E = 0 J$

Dans ce cas simple, il ne peut pas avoir de conversion de l'énergie électrique portée par le signal, en une autre forme d'énergie.

La puissance, étant un débit d'énergie, ne peut donc pas être définie.

❖ 2^{ème} cas : générateur avec un conducteur ohmique – circuit fermé

Le conducteur ohmique est parcouru par un courant électrique (débit d'électrons traversant une section de conducteur) : il y a conversion d'énergie.

Le signal électrique fournit de l'énergie électrique au conducteur ohmique, qui la transforme en énergie thermique

L'énergie électrique du signal varie au cours du temps : $\Delta E \neq 0 J$

La puissance, étant un débit d'énergie, peut donc alors être définie.

À connaître par cœur :

En régime continu, on définit la puissance électrique de ce signal, notée P , dont l'unité est le watt, de symbole W :

$$P = U \times I$$

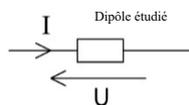
U : tension aux bornes du système, en Volt

I : intensité traversant le système, en Ampère

❖ Convention générateur et convention récepteur : à connaître par cœur

Lorsque l'on étudie un dipôle électrique soumis à un signal (ou une tension) constant, on peut adopter au choix deux conventions.

La flèche représentant la tension U est dans le sens opposé à la flèche représentant l'intensité I



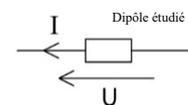
On appelle cette convention, la **convention récepteur**.

La puissance P s'appelle la **puissance reçue** par le dipôle étudié.

Si $P > 0$ alors le dipôle reçoit effectivement une puissance de l'extérieur (provenant du signal).

Si $P < 0$ alors le dipôle effectivement fournit une puissance à l'extérieur.

La flèche représentant la tension U est dans le même sens que la flèche représentant l'intensité I



On appelle cette convention, la **convention générateur**.

La puissance P s'appelle la **puissance fournie** par le dipôle étudié :

Si $P > 0$ alors le dipôle fournit effectivement une puissance à l'extérieur.

Si $P < 0$ alors le dipôle reçoit effectivement une puissance de l'extérieur (provenant du signal).

❖ Comportement d'un dipôle vs convention choisie :

Un dipôle se **comportant en récepteur** (le dipôle reçoit de l'énergie provenant du signal et la transforme en une autre forme d'énergie) a :

- en **convention récepteur**, une puissance reçue **positive**
- en **convention générateur**, a une puissance fournie **négative**.

Un dipôle se **comportant en générateur** (le dipôle fourni de l'énergie électrique à l'extérieur) a :

- en **convention récepteur**, une puissance reçue **négative**,
- en **convention générateur**, a une puissance fournie **positive**.

A retenir :

Afin d'éviter le signe « - » dans nos calculs, il est pertinent d'adopter la convention correspondant au comportement du dipôle.



Quelle que soit la convention adoptée, le sens « réel » du transfert d'énergie ne change pas entre le signal constant et le dipôle étudié.

Remarque :

Il existe des dipôles capables de se comporter comme un récepteur puis comme un générateur (exemples : condensateurs, bobines, batteries, piles rechargeables etc.). Le choix de la convention se fait alors « au hasard ».

VI. Modélisation du comportement générateur d'une batterie électrique (régime continu) :

A. Modèle de Thevenin d'un générateur de tension continue :

❖ **Les générateurs idéaux :**

Les générateurs idéaux ne possèdent pas de résistance interne.

Schéma d'un générateur idéal de tension	Schéma d'un générateur idéal d'intensité

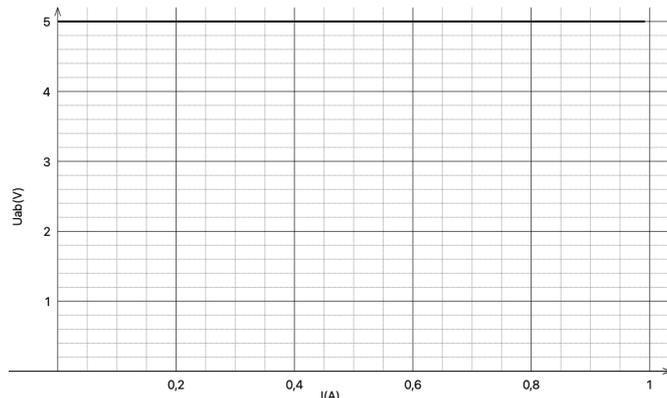
❖ **Modèle de Thévenin d'un générateur de tension :**

Générateur idéal de tension	Générateur réel de tension : modèle de Thévenin
<p style="text-align: center;">Schéma d'un générateur idéal</p>	<p style="text-align: center;">Schéma équivalent à un générateur réel</p>

Expression de la tension délivrée
par ce générateur idéal :

$$U_{AB} = E$$

E : tension délivrée aux bornes du générateur idéal



Quelle que soit l'intensité I débitée par le générateur, la tension U_{AB} aux bornes du générateur est toujours la même :

$$U_{AB} = E$$

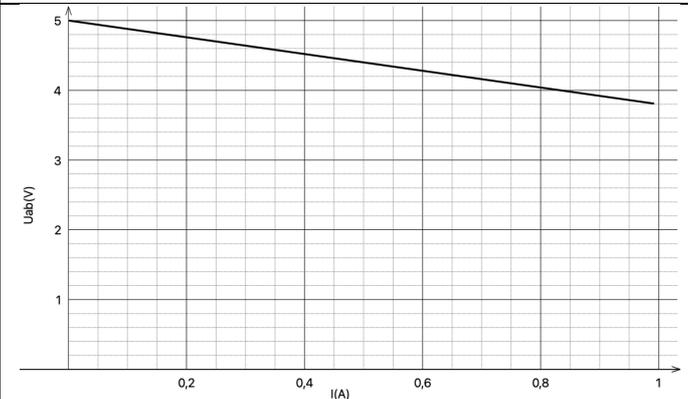
Expression de la tension délivrée
par ce générateur réel :

$$U_{AB} = E - R_{int} \times I$$

U_{AB} : tension délivrée aux bornes du générateur réel

E : tension à vide aux bornes du générateur

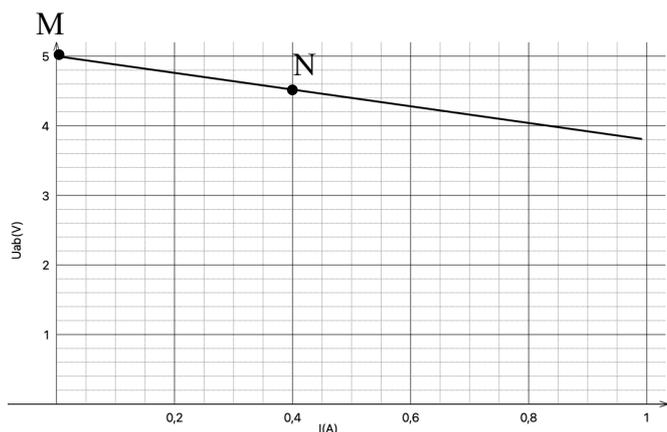
R_{int} : résistance interne du générateur



Si $I = 0$, alors le générateur réel délivre une tension au reste du circuit $U_{AB} = E$

Mais plus l'intensité I débitée par le générateur augmente, plus la tension U_{AB} aux bornes du générateur diminue.

❖ Exploitation du graphe $U_{AB} = f(I)$ pour un générateur réel : comment déterminer graphiquement E et R_{int} ?



La valeur de E correspond à la valeur de l'ordonnée à l'origine (l'ordonnée du point M sur le graphe ci-contre).

La valeur de R_{int} correspond à la valeur absolue du coefficient directeur de la droite :

$$R_{int} = \left| \frac{U_{AB}(M) - U_{AB}(N)}{I(M) - I(N)} \right|$$

Une batterie électrique peut se modéliser (en comportement générateur) par un générateur de tension continue réel (ou de Thévenin).

B. Capacité d'une batterie électrique :

❖ **Définition :**

La capacité d'une batterie (ou accumulateur) est la quantité maximale de charges électriques emmagasinée par le dispositif. Elle est notée C et son unité dans le Système International est $A \cdot s$ (Ampère.seconde) :

$$C = I \times \Delta t$$

I : intensité constante délivrée par l'accumulateur, en ampère (de symbole A)

Δt : durée de fonctionnement de la batterie ou « autonomie » de la batterie, en seconde (de symbole s)

Remarques :

$$1 A \cdot s = 1 \text{ Coulomb}$$

Les constructeurs indiquent très souvent la capacité en $A \cdot h$ (Ampère.heure)

$$1 A \cdot h = 3600 A \cdot s$$

❖ **Lien entre capacité d'une batterie et l'énergie fournie :**

Une batterie (ou accumulateur) est capable de fournir une énergie ΔE en délivrant une tension U :

$$\Delta E = C \times U$$

C : capacité de la batterie en $A \cdot s$ (Ampère.seconde)

Chapitre 02 - Ce qu'il faut savoir :

- Connaître l'unité de la charge électrique, la définition d'une tension électrique et l'unité associée.
- Savoir qu'aux bornes d'un fil, la tension électrique est nulle.
- Connaître le symbole du conducteur ohmique, l'unité de la résistance.
- Connaître la formule liant l'intensité, la charge électrique et la durée.
- Connaître la loi des nœuds et la loi des mailles
- Connaître la loi d'Ohm (selon la convention)
- Connaître les formules des résistances équivalentes (en série et en dérivation)
- Connaître la formule du pont diviseur de tension
- Connaître la différence entre énergie et puissance.
- Connaître la formule liant durée, énergie et puissance et la formule liant puissance, tension, intensité.
- Connaître les conventions récepteur et générateur.
- Comprendre la différence entre les termes « convention » et « comportement »
- Connaître le modèle de Thévenin d'un générateur réel
- Connaître la définition (et les unités possibles) de la capacité d'une batterie

Chapitre 02 - Ce qu'il faut savoir-faire :

- Utiliser les majuscules lorsque les tensions et les intensités sont constantes
- Savoir flécher correctement une tension et une intensité
- Savoir placer un voltmètre, un ampèremètre, dans un circuit (avec les bornes correctement placées)
- Savoir mesurer la résistance d'un conducteur ohmique
- Savoir utiliser la loi des nœuds et la loi des mailles
- Savoir utiliser la loi d'Ohm
- Savoir déterminer l'expression littérale de résistances équivalentes
- Savoir repérer un pont diviseur de tension dans un système
- Savoir isoler une des grandeurs de cette formule du pont diviseur
- Savoir calculer une puissance à partir d'une variation d'énergie et réciproquement.
- Savoir calculer l'autonomie d'une batterie

