

Circuits électriques dans l'ARQS

Pendant toute cette année nous nous plaçons dans un cadre particulier pour l'étude de l'électrocinétique, celui de l'*approximation des régimes quasi-stationnaires*, ou ARQS. Dans ce premier chapitre, nous nous attachons à définir ce cadre et donnons les lois générales des circuits électriques que nous pouvons alors établir.

I Courant électrique et intensité

A Charge électrique

Définition 1.1 : charge électrique

La charge électrique d'une particule, notée q , est une grandeur scalaire, caractérisant sa sensibilité aux interactions électromagnétiques.

Unités

La charge électrique s'exprime en Coulomb, de symbole C.

Exemple 1.1 : matière ordinaire

La matière ordinaire est constituée d'atomes, formés par :

- des **neutrons**, électriquement neutres (de charge nulle) ;
- des **protons**, de charge positive et fondamentale : $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$;
- des **électrons**, de charge négative opposée à celle des protons

Propriété 1.1 : charge électrique et conservation

Un système électrique de charge totale Q possède les propriétés suivantes :

- 1) Q est **algébrique** : elle peut être ≤ 0 ;
- 2) Q est **additive** : N particules de charges q_1, \dots, q_N forment une charge $Q = \sum_{i=1}^N q_i$;
- 3) Q est quantifiée : $Q = k \times e$ avec $k \in \mathbb{Z}$ et $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$;
- 4) Si le système est isolé, alors Q est constante.

B Courant électrique

Définition 1.2 : courant électrique

Le courant électrique est un **mouvement d'ensemble** de particules chargées, appelées *porteurs de charges*, dû à une action extérieure, le champ électrique \vec{E} (voir 2ème année).

Exemple 1.2 : porteurs de charges

On étudiera deux types de porteurs :

- 1) Les **électrons libres** dans les conducteurs métalliques ;
- 2) Les **ions en solutions** dites électrolytiques.

C Sens conventionnel du courant

Les particules sont déplacées par un champ électrique \vec{E} selon le sens algébrique de leur charge, avec une force $\vec{F} = q\vec{E}$ (voir mécanique première année) : les charges avec $q > 0$ sont déplacées dans le même sens que \vec{E} , celles de $q < 0$ dans le sens opposé. Ils apportent cependant la *même variation de charge* en valeur absolue. Avant de connaître quelles particules se déplaçaient dans les circuits électriques (les électrons), il a fallu choisir un sens conventionnel :

Définition 1.3 : sens conventionnel

Le sens conventionnel du courant est le sens de déplacement des porteurs charges positives (réels ou hypothétiques). Les charges négatives se déplacent en sens contraire.

D Intensité du courant

Définition 1.4 : intensité d'un courant

L'intensité électrique quantifie le **débit** de charges à travers une section orientée, c'est-à-dire un **nombre de charges par unité de temps** dans la section étudiée. Une charge est comptée $+q$ si elle traverse la section dans le même sens que son orientation (avec $q \leq 0$), et $-q$ sinon.

Unités

L'intensité se mesure en Ampère, de symbole A. De la définition, on a $1 \text{ A} = 1 \text{ C s}^{-1}$.

Notation

Par convention, i si elle varie, I si elle est fixe.

Propriété 1.2 : expression de l'intensité

Soit un système électrique de **section orientée** S traversée par des charges électriques. Si une quantité de charge δq la traverse entre deux instants t et $t + \delta t$, l'intensité i du courant sera $i = \delta q / \delta t$, d'où en prenant la limite

$$i(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta q}{\delta t} = \frac{dq}{dt}$$

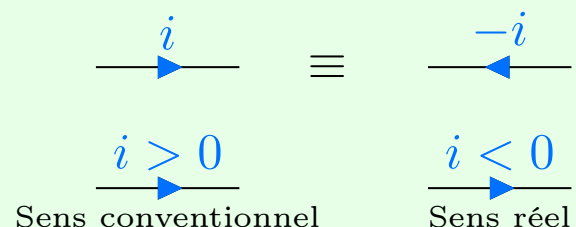
Implication 1.1 : signe et sens réel

Si $i > 0$, $\delta q > 0$: entre t et $t + dt$ il y a eu une traversée de charges avec résultante positive *dans le sens orienté*. Comme le sens conventionnel est **celui des charges positives**, on retiendra

- si $i > 0$, le sens conventionnel est respecté ;
- si $i < 0$, le sens conventionnel est opposé à l'orientation choisie.

Notation 1.1 : représentation du sens

En représentant un fil électrique par un trait rectiligne, on oriente la section avec une flèche. La grandeur ainsi définie peut être ≤ 0 . Si on la flèche dans l'autre sens, sa valeur est opposée.



Important 1.1 : courant et intensité

Il vous faut savoir différencier le courant et l'intensité du courant :
 Le courant est le *phénomène physique*. L'intensité en est la *quantification algébrique*.

Ordre de grandeur 1.1 : intensités

Les valeurs mesurées sont :

- $\approx 1 \text{ mA}$ pour l'électronique du quotidien (téléphone);
- $[1\text{--}10] \text{ A}$ pour l'électroménager (four, aspirateur...);
- $\approx 10^2 \text{ A}$ pour l'électrotechnique (TGV : $[500\text{--}1000] \text{ A}$).

Le seuil létal pour le corps dépend de la durée de traversée, mais est **très faible** : 40 mA pendant 3 secondes, ou 300 mA pendant 0,1 seconde.

Exercice d'application

Un générateur délivre une intensité $I = 3,0 \text{ A}$. Quel est le nombre d'électrons émis chaque seconde ? Quelle durée faut-il à ce générateur pour émettre 1000 électrons ?

II Tension et potentiel

A Définition

Définition 1.5 : potentiel et tension

On appelle **potentiel** électrique la grandeur physique reliant la capacité d'un point à attirer les charges négatives : plus le potentiel est élevé plus il les attire. On appelle **tension** ou **différence de potentiel** entre deux points la différence entre les valeurs du potentiel en chacun des points.

Unités

Le potentiel, et par extension la différence de potentiel, s'exprime en Volt, de symbole V.

Notation

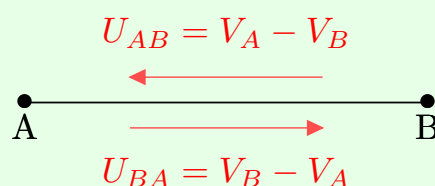
u si variable, U sinon.

En pratique

Seules les tensions se mesurent

Notation 1.2 : potentiel et tension

Il est convenu d'écrire le potentiel en un point A : V_A , et la tension **entre les points** A et B : $U_{AB} = V_A - V_B$. Sur un schéma, la tension est représentée par une flèche partant du **second potentiel vers le premier**.



Implication 1.2 : signe d'une tension

- $U_{AB} > 0$ si $V_A > V_B$ et inversement ;
- $U_{AB} = -U_{BA}$;
- $U_{AB} = U_{AC} + U_{CB}$.

Attention cependant, la flèche est opposée au sens usuel pour un vecteur \overrightarrow{AB} .

Ordre de grandeur 1.2 : tensions

Les valeurs mesurées sont :

- $\approx [0,100\text{--}5] \text{ V}$ pour l'électronique du quotidien (téléphone);
- $\approx 220 \text{ V}$ pour l'électroménager (four, aspirateur...);
- $\approx [100\text{--}1000] \text{ kV}$ pour l'électrotechnique (lignes hautes tensions).

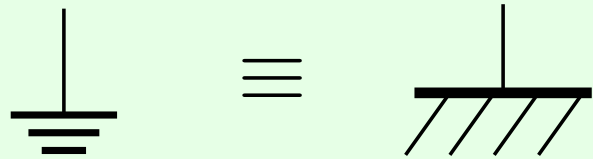
B Référence du potentiel : la masse

Définition 1.6 : masse d'un circuit

L'origine des potentiels d'un circuit est appelée la **masse** du circuit. C'est le point où $V = 0$. Elle sert de référence et est choisie arbitrairement, les tensions pouvant être négatives, et permet la mesure des tensions.

Notation 1.3 : représentation

Dans un circuit électrique, elle est représentée par l'un de ces deux symboles

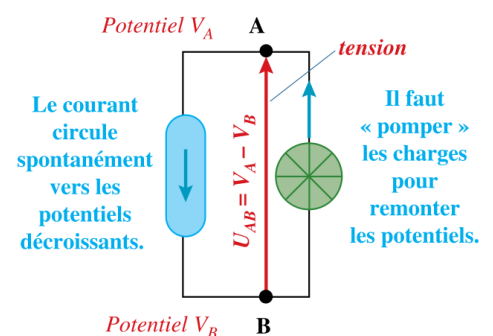
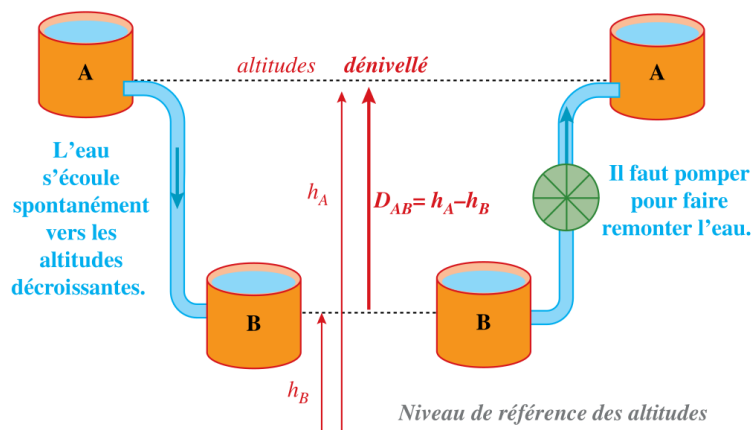


III Analogie électro-hydraulique

Les phénomènes régissant la tension et le courant électrique sont en tous points semblables à ceux régissant le dénivelé et le courant dans un circuit hydraulique. Cette vision permet de mieux comprendre le vocabulaire employé.

Considérons une analogie hydraulique : dans une conduite d'eau horizontale entre deux récipients, l'eau ne s'écoulera pas. Un courant d'eau apparaîtra si on surélève l'un des récipients par rapport à l'autre, et ce courant sera **vers le plus bas**. Le récipient surélevé va finir par se vider et le courant d'eau cessera. C'est la **différence d'altitude** entre les deux récipients qui permet la **circulation du courant**. Les deux sens ne sont pas équivalents, le courant d'eau ne se produit spontanément que vers le bas.

Par analogie avec l'**altitude** h de la canalisation, on définit le **potentiel** électrique V . Ainsi, un courant électrique apparaît spontanément dans le sens des **potentiels décroissants**. Pour que le courant remonte les potentiels, il faut « pomper » les charges à l'aide d'un générateur. L'équivalent électrique du dénivelé (différence d'altitudes) en hydraulique est la tension (différence de potentiels). Voir ce site et l'animation flash : https://www.pccl.fr/physique_chimie_college_lycee/quatrieme/electricite/



On définit de la même manière la puissance : pour l'hydraulique, la puissance d'un courant est égal au produit du dénivelé et du débit, en électrocinétique on aura donc

$$|P| = U \cdot I$$

Nous discutons de son signe dans la section suivante.

IV Vocabulaire des circuits électriques

A La base

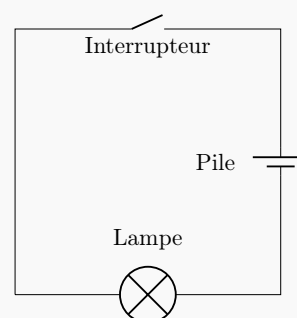
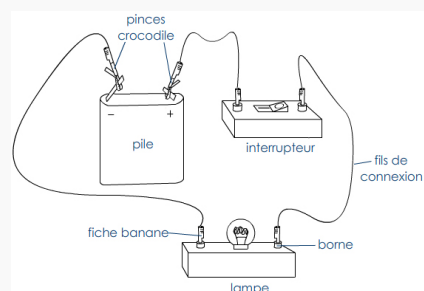
Définition 1.7 : base

Circuit électrique : ensemble de composants électriques reliés entre eux par des fils métalliques conducteurs.

Schéma électrique : représentation simplifiée d'un circuit dans laquelle les composants sont représentés par des symboles standardisés et les fils les reliant par des traits.

Dipôle : composant électriques comportant deux bornes sur lesquelles sont branchés des fils conducteurs.

Exemple 1.3 : circuit et schéma



B Décrire un circuit

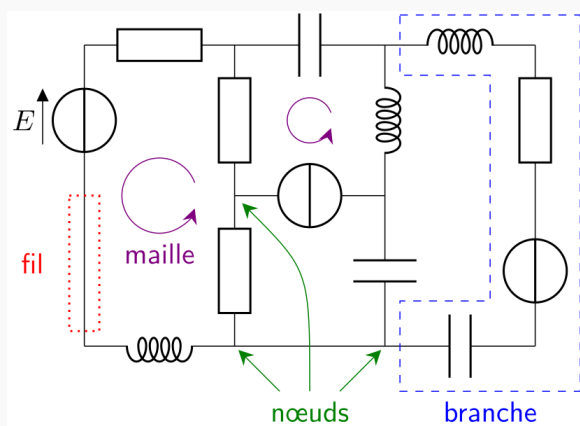
Définition 1.8 : description

Nœud : point où se rejoignent au moins 3 fils.

Branche : portion du circuit entre deux nœuds voisins.

Maille : succession de branches partant et retournant au même point.

Exemple 1.4 : description



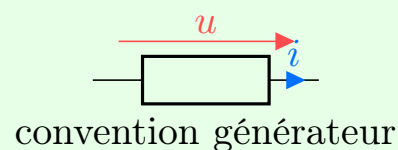
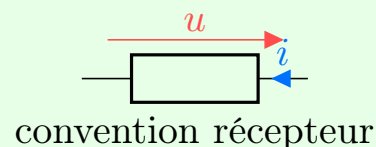
C Conventions générateur et récepteur

Chacune des orientations de l'intensité et de la tension est arbitraire. Pour étudier le comportement d'un dipôle, il nous faut choisir une dernière convention donnant l'orientation relative de la tension u à ses bornes et de l'intensité i du courant la traversant. Celle-ci dépend de la nature génératrice ou réceptrice d'un dipôle afin de respecter leurs physiques respectives.

Définition 1.9 : conventions récepteur et générateur

En convention **récepteur**, l'intensité i traversant un dipôle et la tension u à ses bornes sont orientées en **sens contraires**.

En convention **générateur**, l'intensité i traversant un dipôle et la tension u à ses bornes sont orientées en **dans le même sens**.

**D Relation entre dipôles****Définition 1.10 : série et dérivation**

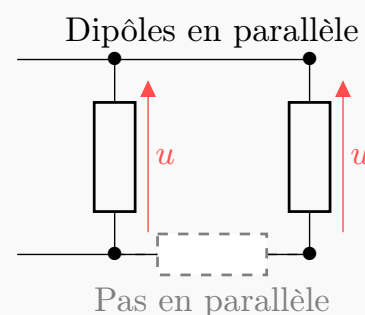
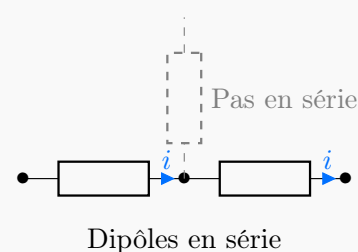
Deux dipôles sont dits **en série** s'ils partagent **une et une seule borne** qui **n'est pas un nœud** (de laquelle ne part aucune autre branche).

Deux dipôles sont dits **en dérivation/en parallèle** s'ils partagent leurs **deux bornes**.

Corollaire 1.1 : série et dérivation

Deux dipôles **en série** sont traversés par la **même intensité**.

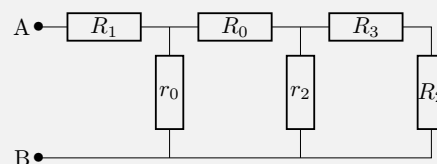
Deux dipôles **en parallèle/dérivation** ont la **même tension** à leurs bornes.

Exemple 1.5 : série et dérivation**Remarque 1.1 : série et dérivation**

Deux dipôles peuvent n'être ni en série, ni en dérivation.

Exercice d'application

Pour le schéma ci-dessous, indiquer si les couples de dipôles suivants sont en série, en parallèle ou ni l'un ni l'autre : $(R_1 \text{ et } R_0)$; $(r_0 \text{ et } r_2)$; $(R_2 \text{ et } R_0)$; $(R_3 \text{ et } r_2)$; $(R_3 \text{ et } R_2)$.

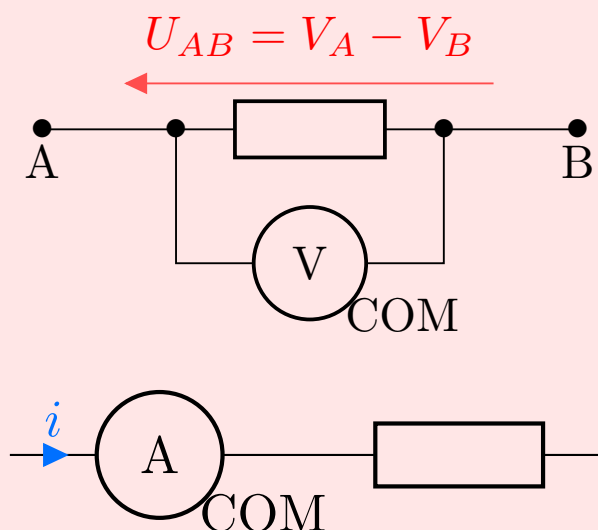


E Mesures de tensions et d'intensités

Propriété 1.3 : voltmètre et ampèremètre

Une tension se mesure à l'aide d'un voltmètre, qui se branche entre les points A et B où on veut mesurer la tension, donc en parallèle du ou des dipôles qui s'y trouvent déjà. On dit souvent qu'« **un voltmètre se monte en parallèle** ». Pour mesurer la tension U_{AB} il faut placer la borne COM au point B.

Une intensité se mesure à l'aide d'un ampèremètre, qui se place directement dans la branche où on souhaite mesurer l'intensité : on dit souvent qu'« **un ampèremètre se monte en série** ». Le sens du courant affiché par l'ampèremètre est relié au sens de branchement.



V Lois fondamentales des circuits électriques dans l'ARQS

A L'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)

Loi 1.1 : ARQS

L'approximation des régimes quasi-stationnaires correspond à considérer que les variations des grandeurs électriques se propagent *instantanément* dans la totalité d'un circuit. Si sa longueur totale est L et si la fréquence de variation du signal électrique est f (ou temps de variation T), l'ARQS est applicable si

$$L \ll \frac{c}{f} \iff L \ll cT \iff T \gg \frac{L}{c}$$

Démonstration 1.1 : ARQS

Dans un fil, les électrons sont mis en mouvement par un champ électrique. La théorie électromagnétique nous montre que le champ électrique est une onde qui se déplace à la célérité $c \approx 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Ainsi, la variation du potentiel dans un fil se fait à vitesse finie et il y a en général un **retard à la propagation**. Si le champ varie dans le temps avec une période T , il varie dans l'espace avec une période $\lambda = cT$. On peut alors considérer que le champ électrique est le même le long d'un fil si sa taille est beaucoup plus petite que la longueur d'onde λ .

Application

Vérifier si l'ARQS est valable pour les 3 cas suivants :

- En travaux pratiques avec $f = 1 \text{ kHz}$;
- Sur une ligne à haute tension de 100 km à basse fréquence (50 Hz) ;
- À l'intérieur d'une carte mère d'un ordinateur de 10 cm à $f \approx 1 \text{ GHz}$.

Oui, si $L \ll 300 \text{ km}$; oui, si $L \ll 6000 \text{ km}$; non, $Lf = 1 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \not\ll c$.

Définition 1.11 : régimes continu et variable

Régime continu : toutes les intensités et les tensions du circuit sont constantes ou cours du temps.

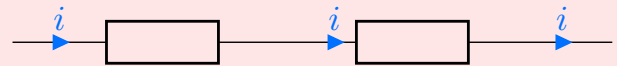
Régime variable : au moins une tension ou une intensité du circuit varie au cours du temps. Si on se place dans l'ARQS, on parle parfois de régime lentement variable.

B Loi des nœuds

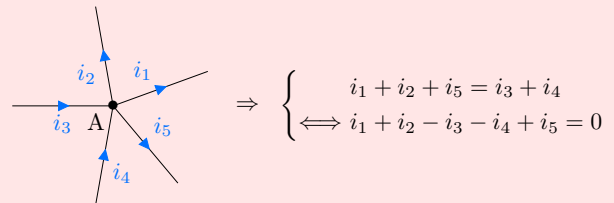
Dans le cadre de l'ARQS, il ne peut y avoir d'accumulation de charges en un point du circuit : toutes les charges apportées par un courant doivent immédiatement être évacuées par un autre courant, donnant lieu aux lois des branches et des nœuds :

Loi 1.2 : loi des branches

L'intensité est la même le long d'une branche.

**Loi 1.3 : loi des nœuds**

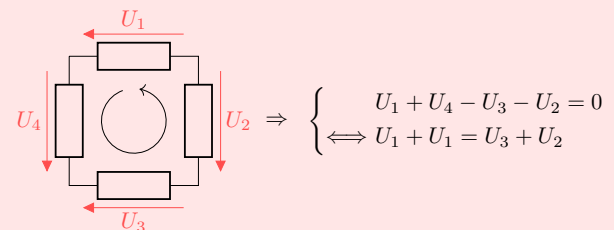
La somme des intensités dirigées vers un nœud est égale à la somme de celles dirigées à l'opposé, ou la somme algébrique des intensités en un point est nulle.

**C Loi des mailles**

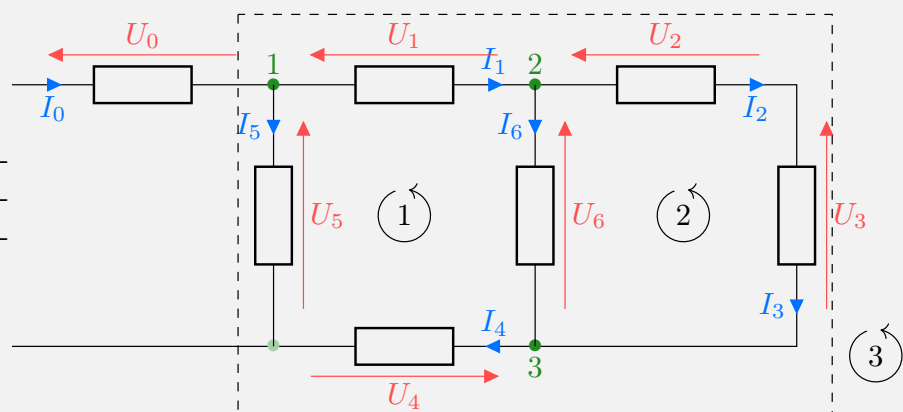
Avec le principe d'additivité des tensions (implication 1.2), on en déduit la loi des mailles.

Loi 1.4 : loi des mailles

Dans une maille orientée, la somme algébrique des tensions est nulle, ou la somme des tensions dans le sens de la maille est égale à la somme des tensions dans le sens opposé

**Exercice d'application**

Pour le circuit ci-contre, établir les liens entre les différents courants et les différentes tensions.



- $I_2 = I_3$ par unicité à droite ;
- $I_0 = I_1 + I_5$ par LdN 1 ;
- $I_1 = I_2 + I_6$ par LdN 2 ;
- $I_3 + I_6 = I_4$ par LdN 3.
- $U_4 + U_6 + U_1 = U_5$ par LdM 1 ;
- $U_3 + U_2 = U_6$ par LdM 2 ;

Le dernier nœud, non numéroté, donne une relation redondante avec les autres.

La LdM 3 donne une relation redondante avec les deux premières : $U_4 + U_2 + U_3 + U_1 = U_5$ est la somme des deux.

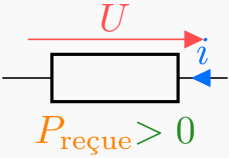
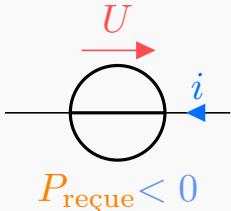
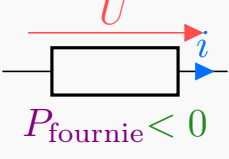
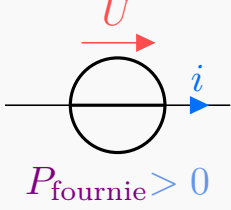
D Puissance électrocinétique

Définition 1.12 : puissance récepteur

Un dipôle **fonctionne comme récepteur** s'il **reçoit de l'énergie** du reste système. Dans ce cas-là, sa puissance *en convention récepteur* est $P_{\text{reçue}} = u \times i > 0$. Si après calcul une puissance reçue est négative, c'est que le dipôle est en fait générateur.

Un dipôle **fonctionne comme générateur** s'il **fournit de l'énergie** au reste système. Dans ce cas-là, sa puissance *en convention générateur* est $P_{\text{fournie}} = u \times i > 0$. Si après calcul une puissance fournie est négative, c'est que le dipôle est en fait récepteur.

Exemple 1.6 : puissances

	Dipôle récepteur	Dipôle générateur
Convention récepteur $P_{\text{reçue}}$		
Convention générateur P_{fournie}		

Propriété 1.4 : conservation de l'énergie

L'**énergie** est une **grandeur conservative**. Elle ne peut être créée ou détruite. Elle ne peut qu'être convertie d'une forme en une autre et/ou transférée d'un système à un autre. Il en découle que dans une maille, **les puissances reçues sont égales aux puissances émises**, c'est-à-dire

$$\sum P_{\text{fournies}} = \sum P_{\text{reçues}}$$