

CHAPITRE

4

Introduction aux signaux
électriques

1 Charge électrique et intensité du courant

Cours

Un courant électrique est un **transport de charge électrique dans l'espace**. Dans le cadre du programme de PCSI nous étudions les courants qui circulent dans les fils conducteurs d'un circuit électrique. Ils sont assurés par un déplacement de porteurs de charge (généralement des électrons) soumis à l'action d'un champ électrique produit par un générateur.

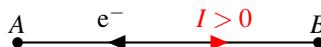
La charge électrique d'un porteur se mesure en **coulomb**. Elle peut être positive ou négative. Elle est quantifiée, c'est-à-dire qu'elle ne peut prendre que certaines valeurs particulières, toutes multiples entiers relatifs de la **charge élémentaire** $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Par exemple la charge d'un électron vaut $q = -e$ tandis que la charge du cation Cu^{2+} vaut $q = 2e$.

La grandeur qui mesure le courant électrique dans un fil conducteur est l'**intensité**, définie comme le **débit de charge électrique** dans le fil. Son unité SI est l'**ampère**, équivalent à un coulomb par seconde ($1 \text{ A} = 1 \text{ C} \cdot \text{s}^{-1}$). Mathématiquement, l'intensité du courant, à un instant t donné, est définie par :

$$i(t) = \frac{dq}{dt}$$

où dq est une quantité infinitésimale de charge transportée dans le fil pendant un intervalle de temps infinitésimal, entre t et $t + dt$.

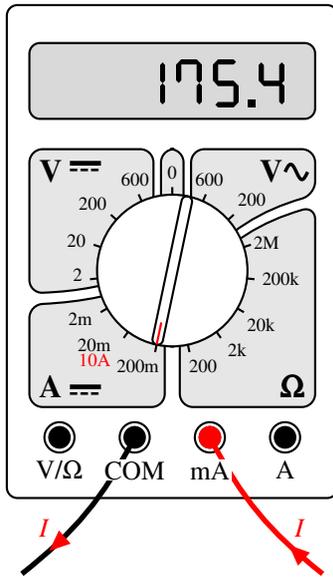
L'intensité du courant est une grandeur algébrique qui doit être **orientée**, de sorte que l'on sache dans quel sens s'effectue le transport des charges. Dans le schéma électrique d'un circuit on représente communément une intensité à l'aide d'une flèche surmontant le fil.



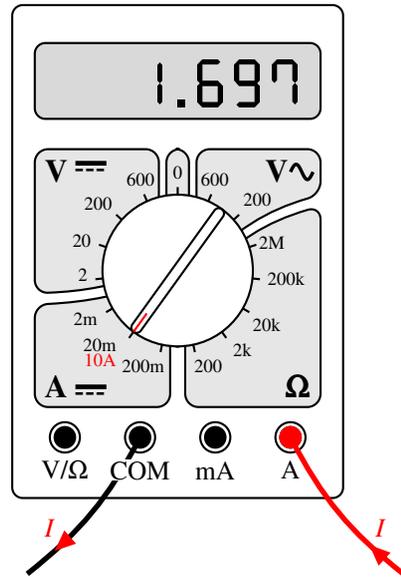
Par convention l'intensité est mesurée positivement dans le sens de transport des charges **positives**. En pratique, comme les porteurs sont le plus souvent des électrons de charge négative, un courant positif correspond à un déplacement d'électrons en sens contraire (voir figure ci-dessus).

► **Mesurer une intensité au laboratoire**

L'intensité du courant se mesure avec un **ampèremètre**. C'est un dipôle dont les bornes sont nommées COM et mA (ou bien COM et A pour mesurer des intensités plus élevées). Par convention l'ampèremètre mesure l'intensité dans le sens qui "entre" par la borne mA et "sort" par la borne COM (voir les figures ci-dessous qui représentent un multimètre utilisé en tant qu'ampèremètre pour mesurer un courant continu (mode DC ---)).

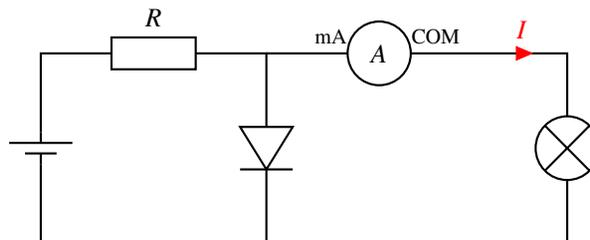


Branchement pour mesurer un courant inférieur à 200 mA



Branchement pour mesurer un courant supérieur à 200 mA

Le schéma ci-dessous montre un exemple de montage permettant de mesurer l'intensité du courant qui circule dans une lampe. **L'ampèremètre doit être branché en série avec la lampe.**



► **Déterminer la charge transportée dans un conducteur en régime variable**

On considère un fil conducteur dans lequel l'intensité $i(t)$ peut varier au cours du temps. Par définition la charge électrique infinitésimale transportée entre t et $t + dt$ vaut :

$$dq = i(t)dt$$

La charge électrique transportée pendant un intervalle de temps macroscopique $t_1 \leq t \leq t_2$ se calcule avec une intégrale :

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt$$

► **Déterminer la charge transportée dans un conducteur en régime stationnaire**

On considère maintenant le cas d'un fil dans lequel l'intensité est constante : $i(t) = I \forall t$. Le calcul de l'intégrale est très simple et conduit à la relation suivante :

$$Q = I \Delta t$$

avec $\Delta t = t_2 - t_1$ l'intervalle de temps sur lequel on mesure le transport des charges.

Application 1

Une ampoule est alimentée avec un courant continu $I = 50 \text{ mA}$. Quelle est la quantité de charge qui circule dans cette ampoule en une journée ?

2 Potentiel électrique, tension, masse

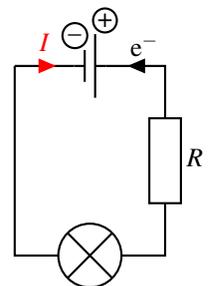
2.1 Potentiel électrique

Cours

Un potentiel électrique est une grandeur définie **localement**, c'est-à-dire en chaque point d'un circuit électrique. En un point P d'un circuit elle est notée $V(P)$ et se mesure en **volt** (V). De manière simplifiée, voici le sens concret que l'on peut donner au potentiel électrique. Dans un circuit :

- les charges négatives ont tendance à se déplacer spontanément en direction des potentiels les plus élevés ;
- les charges positives ont tendance à se déplacer spontanément en direction des potentiels les plus faibles.

On représente ci-contre le schéma d'une pile qui alimente un circuit constitué d'un résistor et d'une lampe. La borne \oplus a un potentiel plus élevé et la borne \ominus un potentiel plus faible. Les électrons libres, de charge négative, circulent spontanément en direction de la borne de plus haut potentiel. Ainsi, le courant est mesuré positivement de la borne \oplus vers la borne \ominus .

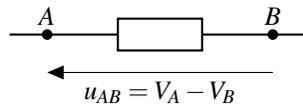


2.2 Tension

Comme on l'a vu sur l'exemple précédent de la pile avec sa borne positive et sa borne négative, il est nécessaire de **comparer** les potentiels des différents points d'un circuit si l'on veut anticiper les déplacements de charge. Plus que les potentiels, ce sont les **différences de potentiel** qui permettent de décrire le comportement électrique d'un circuit.

Cours

Soient A et B deux points quelconques d'un circuit électrique. On appelle **tension** $u_{AB} = V_A - V_B$ la différence de potentiel entre ces deux points, mesurée positivement si le potentiel de A est plus élevé que celui de B . Sur un schéma, une telle tension est représentée par une flèche orientée de B vers A (voir ci-dessous). Une tension se mesure en **volt**.



Lorsque l'on définit la tension entre deux points avec une flèche, cette tension est définie comme :

$$V_{\text{point au bout de la flèche}} - V_{\text{point au départ de la flèche}}$$

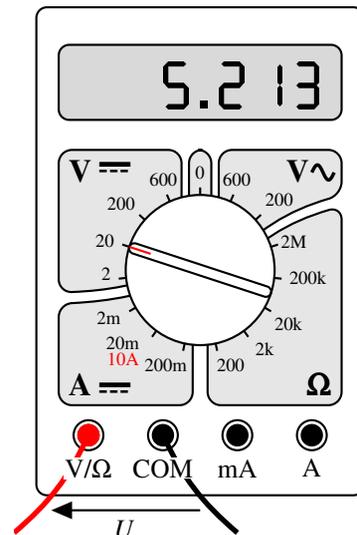
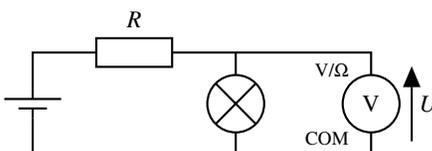
Les tensions vérifient les propriétés suivantes :

- **antisymétrie** : $u_{BA} = -u_{AB} \quad \forall(A, B)$;
- **additivité** : $u_{AC} = u_{AB} + u_{BC} \quad \forall(A, B, C)$.

► Mesurer une tension au laboratoire

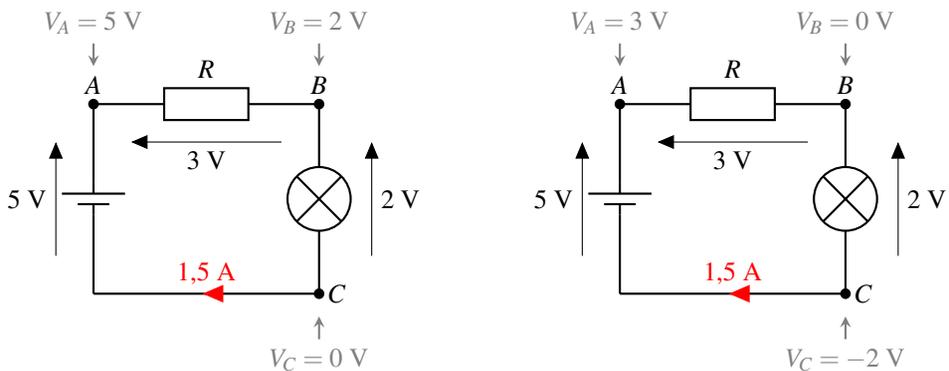
La tension entre deux points d'un circuit se mesure avec un **voltmètre**. C'est un dipôle dont les bornes sont nommées COM et V/ Ω . Par convention le voltmètre mesure la tension $U = V_{V/\Omega} - V_{\text{COM}}$ (voir la figure ci-contre qui représente un multimètre utilisé en tant que voltmètre pour mesurer une tension continue).

Le schéma ci-dessous montre un exemple de montage permettant de mesurer la tension aux bornes d'une lampe. **Le voltmètre doit être branché en dérivation avec la lampe.**



2.3 Masse d'un circuit électrique

Dans un circuit seules les valeurs des différences de potentiel (c'est-à-dire des tensions) donnent des informations sur le déplacement possible des porteurs de charge. Cela signifie que la valeur exacte d'un potentiel électrique n'a pas de signification particulière tant qu'on ne le compare pas à un autre potentiel du circuit. On dit que le potentiel électrique est défini **à une constante près**, c'est-à-dire que l'on peut arbitrairement décider d'augmenter ou diminuer tous les potentiels électriques du circuit de la même quantité, sans que cela n'affecte l'analyse que l'on en fait (les différences de potentiel restent les mêmes si tous les potentiels varient de la même quantité). Les deux schémas ci-dessous illustrent ce principe. Dans les deux cas il s'agit du même circuit, avec le même comportement électrique (tensions, intensité identiques).

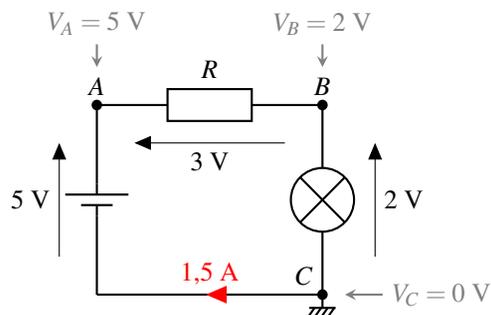


On voit que si l'on peut "translater" tous les potentiels d'une quantité arbitraire cela revient à dire que l'on peut choisir un point du circuit et décider que son potentiel électrique est nul (le point B ou le point C sur les exemples précédents, mais on aurait tout aussi bien pu choisir A).

Cours

La masse d'un circuit est un point de référence auquel on attribue arbitrairement un potentiel électrique égal à 0 V . On le représente sur le schéma d'un circuit avec le symbole /// .

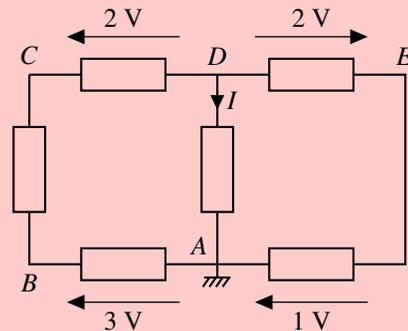
On illustre sur le schéma ci-dessous :



Application 2

Dans le circuit ci-contre :

1. Calculer le potentiel électrique des points A à E.
2. Représenter sur le schéma les tensions u_{BC} et u_{DA} puis déterminer leur valeur.

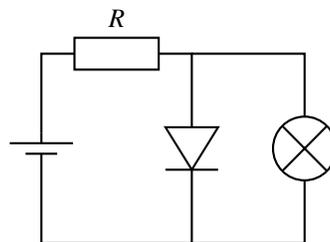


3 Schéma électrique

Un schéma électrique est une représentation symbolique de la structure et des propriétés d'un circuit électrique. Il répond à des codes (symboles, représentations des tensions et des intensités) qu'il faut comprendre et savoir manipuler.

3.1 Vocabulaire de base

Considérons le schéma ci-dessous. Il représente un circuit fermé contenant une pile, un résistor, une diode et une lampe. Ces composants sont des dipôles (ils possèdent chacun deux bornes par lesquelles ils sont connectés les uns aux autres). Les connexions s'opèrent à l'aide de fils conducteurs non résistifs.



Ce circuit s'organise sous la forme de nœuds, branches et mailles.

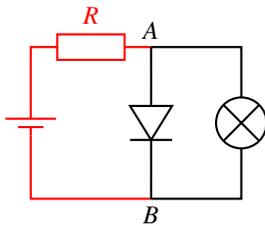
Cours

Un nœud est une connexion entre **au moins 3 fils**.

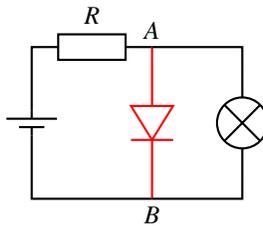
Une branche est une portion de circuit **située entre deux nœuds consécutifs**.

Une maille est une portion d'un circuit **formant un contour fermé** que l'on peut parcourir en ne passant qu'une seule fois par chaque nœud intermédiaire.

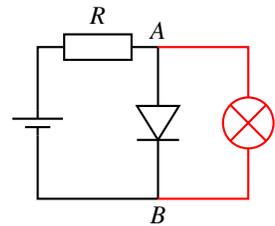
Ce circuit possède deux nœuds (notés A et B ci-dessous) et trois branches.



Branche 1

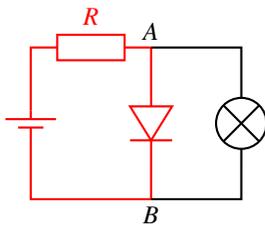


Branche 2

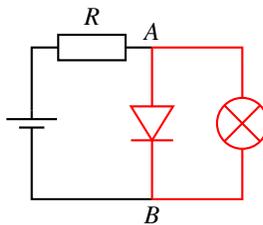


Branche 3

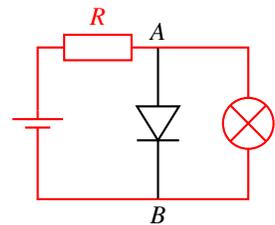
Il possède également trois mailles différentes.



Maille 1



Maille 2



Maille 3

3.2 Annoter un schéma

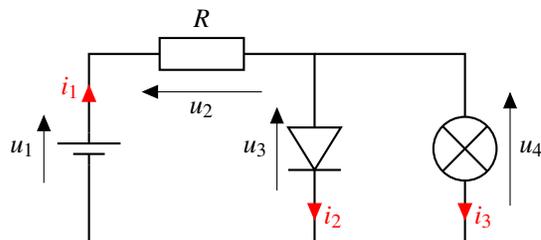
Avant d'entamer l'étude analytique d'un circuit il convient de déterminer combien de tensions et d'intensités sont nécessaires et suffisantes pour une analyse complète de ses propriétés électriques.

- À chaque branche correspond une intensité,
- à chaque dipôle correspond une tension.

L'objectif est de déterminer l'ensemble de ces intensités et tensions, et nous verrons par la suite qu'il existe des relations entre elles.

Pour éviter toute confusion au niveau des signes **il est obligatoire de définir l'orientation des tensions et des intensités sur le schéma**. Au passage cela permet d'introduire des notations claires qui seront utilisées dans les calculs à venir. Retenez que toute tension et toute intensité peut être définie dans un sens **arbitraire**.

On montre sur la figure ci-contre un exemple de schéma annoté, sur lequel on a défini toutes les intensités et tensions utiles, dans un sens arbitraire.



3.3 Association de dipôles en série ou en dérivation

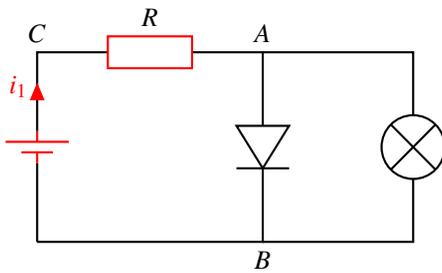
Pour simplifier l'étude analytique d'un circuit électrique il est avantageux d'identifier la présence éventuelle de dipôles en série ou en dérivation.

Cours

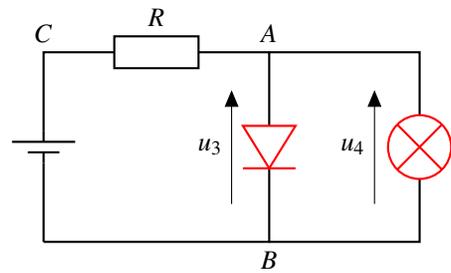
Deux (ou plus) dipôles sont en série **s'ils sont dans la même branche d'un circuit**. Deux dipôles en série sont parcourus **par des courants de même intensité**.

Deux (ou plus) dipôles sont en dérivation (en parallèle) **s'ils partagent les mêmes bornes**. Deux dipôles en dérivation ont **une même tension à leurs bornes**.

Sur le circuit présenté dans ce paragraphe, la pile et le résistor sont en série (ils sont parcourus par le même courant d'intensité i_1), tandis que la lampe et la diode sont en dérivation (les tensions u_3 et u_4 sont identiques : $u_3 = u_4 = V_A - V_B$).



La pile et le résistor sont dans la même branche parcourue par i_1 , ils sont associés en série

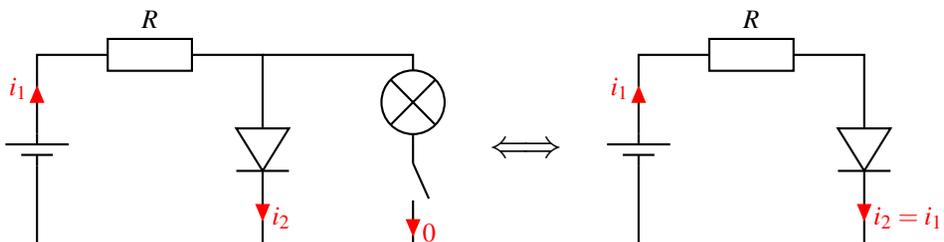


La diode et la lampe partagent les mêmes bornes A et B , elles sont associées en dérivation

3.4 Interrupteur ouvert, court-circuit

Cours

Un interrupteur ouvert, comme son nom l'indique, ouvre le circuit électrique dans l'une de ses branches et interdit la circulation des charges. **Le courant est toujours nul dans une branche ouverte.**

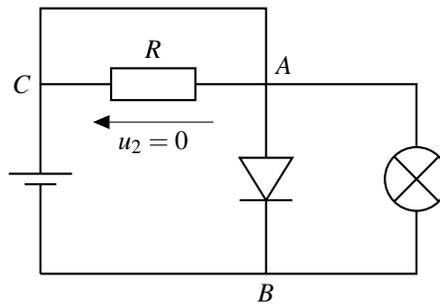


Quand une branche est ouverte elle n'influence pas le reste du circuit ; on peut la supprimer du schéma.

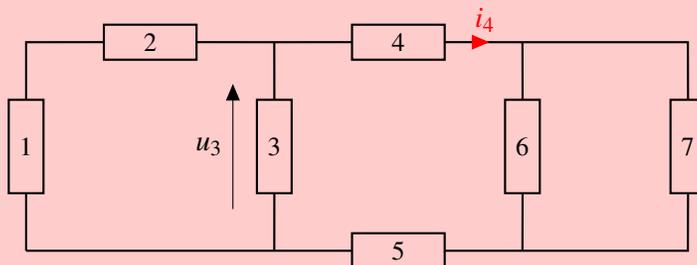
Cours

Un court-circuit est une connexion électrique directe entre deux points d'un circuit, généralement symbolisée sur un schéma sous la forme d'un fil. **La tension est toujours nulle aux bornes d'un court-circuit.**

Sur l'exemple ci-dessous on dit que le résistor est court-circuité. Le court-circuit impose que les points C et A sont au même potentiel électrique donc $u_2 = V_C - V_A = 0$.



Application 3



Dans le circuit ci-dessus :

1. Identifier le nombre de nœuds et de branches.
2. Identifier les dipôles associés en série et en dérivation.
3. On souhaite mesurer la tension u_3 et l'intensité i_4 . Indiquer sur le schéma les appareils à utiliser et la manière de les connecter au circuit. On précisera la position de leurs bornes.

4 Loi des nœuds/des mailles

4.1 Loi des nœuds

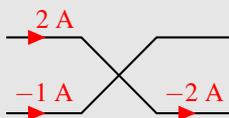
Cours

La somme des intensités se dirigeant vers un nœud N est égale à la somme des intensités qui s'en éloignent.

$$\sum i_{\text{vers } N} = \sum i_{\text{quitte } N}$$

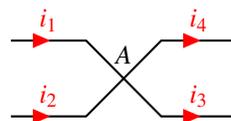
Exemple

Calculer l'intensité manquante dans le circuit ci-dessous :



► Annoter le schéma

On oriente arbitrairement l'intensité manquante. On donne un nom au nœud ainsi qu'aux différentes intensités afin de les manipuler dans des calculs littéraux. Cela peut sembler superflu pour une application aussi simple mais c'est une bonne habitude à prendre pour étudier les circuits électriques.



► Appliquer la loi des nœuds

On applique la loi des nœuds en A . La somme des intensités se dirigeant vers le nœud est égale à la somme des intensités qui s'en éloignent :

$$i_1 + i_2 = i_3 + i_4 \iff i_4 = i_1 + i_2 - i_3 = 3 \text{ A}$$

Afin de faciliter la compréhension du lecteur il est important de préciser en quel nœud on applique la loi, en particulier lorsque le circuit en possède plusieurs.

4.2 Loi des mailles

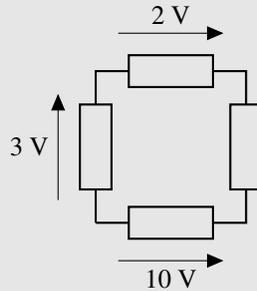
Cours

Dans une maille orientée arbitrairement, la somme des tensions orientées dans le sens direct est égale à la somme des tensions orientées dans le sens inverse.

$$\sum u_{\text{sens direct}} = \sum u_{\text{sens inverse}}$$

Exemple

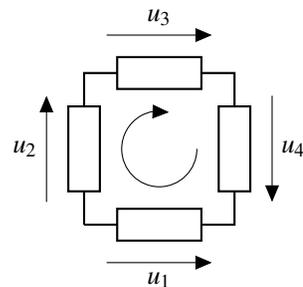
Calculer la tension manquante dans le circuit ci-dessous :



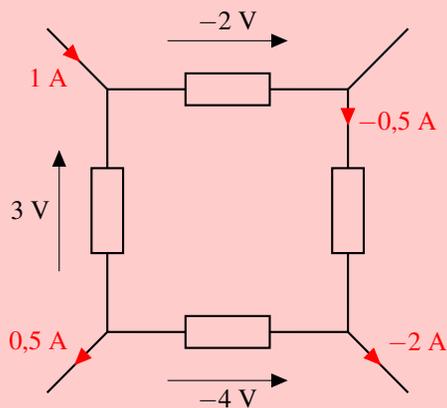
► Annoter le schéma + appliquer la loi des mailles

On annote le schéma puis on choisit une orientation arbitraire pour la maille, symbolisée par une flèche. La somme des tensions orientées dans le sens direct est égale à la somme des tensions orientées dans le sens inverse :

$$u_2 + u_3 + u_4 = u_1 \iff u_4 = u_1 - u_2 - u_3 = 5 \text{ V}$$

**Application 4**

Calculer la tension et les intensités manquantes dans le circuit ci-dessous :



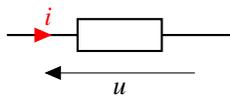
5 Puissance et énergie échangée par un dipôle

5.1 Conventions générateur et récepteur

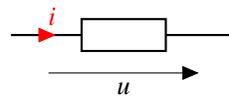
Cours

Quand un dipôle est représenté sur un schéma électrique avec la tension à ses bornes et l'intensité dans sa branche, on dit :

- qu'il est représenté en convention récepteur si les flèches de la tension et de l'intensité sont de sens contraires,
- qu'il est représenté en convention générateur si les flèches de la tension et de l'intensité sont de même sens.



Convention récepteur



Convention générateur

Cette convention concerne uniquement la représentation schématique du dipôle, elle n'a rien à voir avec le fait que le dipôle se comporte comme un générateur ou bien un récepteur électrique.

5.2 Puissance reçue ou fournie par un dipôle

Cours

La puissance instantanée échangée par un dipôle avec le circuit (exprimée en watt (W)) s'écrit :

$$\mathcal{P}(t) = \pm u(t)i(t)$$

Le signe \pm dépend du sens dans lequel la puissance est mesurée (puissance **reçue** par le dipôle ou bien puissance **fournie** par le dipôle) ainsi que de la convention de représentation (convention générateur ou convention récepteur). Le tableau ci-dessous résume les différents cas de figure.

convention \ puissance	reçue	fournie
	récepteur	$+ui$
générateur	$-ui$	$+ui$

Le signe de la puissance instantanée reçue/fournie par un dipôle permet de conclure sur son rôle en termes d'échange d'énergie dans le circuit :

- un dipôle se comporte comme un **générateur** électrique, à l'instant t , si sa puissance fournie est positive,
- un dipôle se comporte comme un **récepteur** électrique, à l'instant t , si sa puissance reçue est positive.

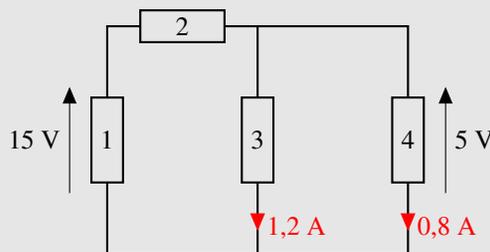
5.3 Mise en œuvre pratique

En résumé

- S'il n'est pas déjà fourni dans l'énoncé, réaliser un schéma annoté du circuit en choisissant arbitrairement la convention de représentation du dipôle étudié ;
- évaluer la tension aux bornes du dipôle et l'intensité dans sa branche, selon la convention choisie ;
- Exprimer la puissance reçue ou fournie en adaptant la formule en fonction du cas de figure (voir tableau précédent) ;
- Faire l'application numérique et conclure quant à la nature du dipôle (générateur ou récepteur) en fonction du signe obtenu.

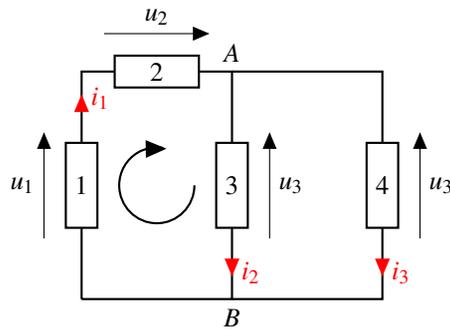
Exemple

Calculer la puissance reçue par les dipôles de ce circuit. Lesquels sont générateurs ? récepteurs ?



► Annoter le schéma

On introduit des notations littérales pour les différentes tensions et intensités ainsi que pour les nœuds (voir page suivante). Les tensions aux bornes des dipôles 3 et 4 sont égales car ceux-ci sont branchés en dérivation.



► **Appliquer la loi des nœuds/des mailles**

On applique la loi des nœuds en A (elle s'écrirait de la même manière en B) :

$$i_1 = i_2 + i_3 = 2A$$

On applique la loi des mailles (voir sens arbitraire sur le schéma) :

$$u_1 + u_2 = u_3 \iff u_2 = u_3 - u_1 = -10V$$

► **Identifier les conventions de représentation**

Le dipôle 1 et le dipôle 2 sont en convention générateur.

Le dipôle 3 et le dipôle 4 sont en convention récepteur.

► **Exprimer une puissance reçue**

On calcule les puissances reçues \mathcal{P}_1^r et \mathcal{P}_2^r , respectivement par le dipôle 1 et le dipôle 2, en convention générateur :

$$\boxed{\mathcal{P}_1^r = -u_1 i_1 = -30W} \quad \text{et} \quad \boxed{\mathcal{P}_2^r = -u_2 i_1 = 20W}$$

On calcule les puissances reçues \mathcal{P}_3^r et \mathcal{P}_4^r , respectivement par le dipôle 3 et le dipôle 4, en convention récepteur :

$$\boxed{\mathcal{P}_3^r = u_3 i_2 = 6W} \quad \text{et} \quad \boxed{\mathcal{P}_4^r = u_3 i_3 = 4W}$$

► **Conclure quant à la nature des dipôles**

La puissance reçue par les dipôles 2, 3 et 4 est positive ; ce sont des **récepteurs**.

La puissance reçue par le dipôle 1 est négative donc sa puissance fournie est positive ; c'est un **générateur** ($\mathcal{P}_1^f = -\mathcal{P}_1^r = 30W$).

Remarque : Les puissances calculées sont telles que :

$$\mathcal{P}_1^f = \mathcal{P}_2^r + \mathcal{P}_3^r + \mathcal{P}_4^r$$

Ce résultat était attendu, il traduit le **bilan de puissance global du circuit** ; la puissance fournie par le générateur est égale à la somme des puissances consommées par les récepteurs.

5.4 Travail électrique reçu ou fourni par un dipôle

► Déterminer le travail électrique échangé par un dipôle en régime variable

L'énergie échangée par un dipôle avec le circuit est appelée travail électrique car elle est liée à la force d'interaction entre le dipôle et les porteurs de charge. Le travail électrique échangé sur un intervalle de temps infinitésimal, entre t et $t + dt$, s'écrit :

$$\delta W = \mathcal{P}(t)dt = \pm u(t)i(t)dt$$

Les conventions de signe sont les mêmes que pour les puissances (dépend de la convention et si l'énergie est reçue ou fournie par le dipôle). Le travail électrique échangé sur un intervalle de temps macroscopique $t_1 \leq t \leq t_2$ vaut :

$$W = \pm \int_{t_1}^{t_2} u(t)i(t)dt$$

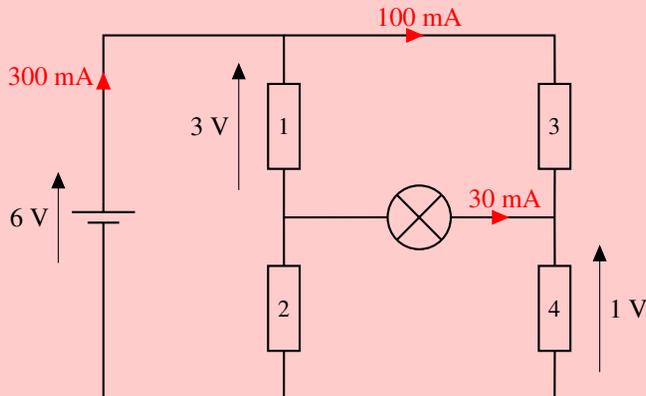
► Déterminer le travail électrique échangé par un dipôle en régime stationnaire

Dans le cas où la tension et l'intensité sont constantes : $u(t) = U$ et $i(t) = I \forall t$, l'intégrale se calcule simplement :

$$W = \pm UI\Delta t$$

avec $\Delta t = t_2 - t_1$ l'intervalle de temps.

Application 5



1. Indiquer parmi ces dipôles lesquels sont générateurs et lesquels sont récepteurs.
2. Comparer la puissance totale fournie par les générateurs et la puissance totale reçue par les récepteurs.
3. Calculer, en kilowatt-heures, le travail électrique fourni par la pile et le travail électrique consommé par la lampe en une année.