

#### Introduction

Dans le panorama des chaînes fonctionnelles des systèmes, dressé au chapitre 1.2, on remarque que :

- l'**énergie** est très souvent employée sous forme **électrique** ; *disponible* dans les bâtiments par raccordement au réseau, facile à stocker en faible quantité (batteries) – mais beaucoup moins à plus grande échelle – l'électricité est aussi *dosable* grâce à l'électronique ; elle constitue donc le **flux principal** depuis la fonction « alimenter » jusqu'à la fonction « convertir », caractérisée par sa **puissance** – on parle de « **courants forts** » ;
- l'**information** est presque toujours employée sous forme **électrique**, pour les mêmes raisons de disponibilité et de possibilités de traitements électroniques complexes ; elle apparaît également comme un ou plusieurs **flux**, mais de **faible puissance** – on parle de « **courants faibles** » – dont diverses caractéristiques (amplitude, fréquence, etc.) servent de support de **données**.

Qu'elle véhicule de l'énergie ou des données, l'électricité est techniquement mise en œuvre dans des **circuits** où elle peut donc « circuler ». En comprendre le fonctionnement nécessite de connaître les **notions fondamentales** d'électricité (les grandeurs que sont la **charge**, le **courant**, la **tension**, etc.) et les bases de l'**électrocinétique**, i.e. l'étude des circuits (typologie, composants, structures, régimes de fonctionnement, etc.).

#### I. Notions fondamentales d'électricité

##### I.1 Notion de charge électrique

■ La **charge électrique** est une propriété intrinsèque de certaines **particules de matière** qui fait qu'elles **créent**, **modifient** et **subissent** additivement le **champ de force électromagnétique**, sans qu'il soit possible de distinguer un ordre, une cause ou une origine à ce phénomène (cf. la photo ci-contre d'une expérience de visualisation des lignes d'un champ de force électrique).



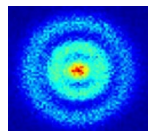
Il est intéressant de comparer la notion de charge électrique avec celle de masse qui, de façon analogue, rend les particules de matière aptes à créer, modifier et subir de façon additive le champ de force gravitationnel ; les forces électromagnétiques et gravitationnelles étant les deux forces fondamentales de l'univers opérant à l'échelle humaine et macroscopique<sup>1</sup>. On observe les différences majeures suivantes :

- la charge prend des **valeurs signées** (i.e. *positives* ou *negatives*) ; la masse n'est que positive ;
- à quantités de matière égales, la force électromagnétique est **10<sup>42</sup> fois plus intense** que la force gravitationnelle (un aimant attire plus un objet de sa taille que la Terre entière) ;
- la force électromagnétique est plus complexe, car elle combine deux forces distinctes :
  - la **force électrique**, engendrée et agissant sur les particules chargées ;
  - la **force magnétique**, naissant du *mouvement* des particules chargées, et qui en impacte les trajectoires.



■ Dans l'univers connu, les particules chargées, qu'on appelle aussi les **porteurs de charge**, sont :

- les **électrons**, de charge négative **-e** avec  $e \approx 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$  (**coulomb**<sup>2</sup>), qu'on appelle **charge élémentaire** ; ce sont les porteurs de charge dans les applications électriques usuelles ; cf. ci-contre, l'image de synthèse d'un atome d'hydrogène, avec en bleu clair une reconstitution du nuage électronique ;
- les **ions** – de charge négative (*anions*)/positive (*cations*), **multiple** de **e** – sont des atomes ou des molécules ayant perdu/gagné des électrons ; un *proton* est peut être vu comme un cation  $\text{H}^+$  ;



Dans un élément de matière (atome, molécule), et par extension dans le volume d'un milieu donné :

- on appelle **charge électrique**, ou **quantité d'électricité**, la **somme algébrique des charges** des particules chargées présentes, notée **q** ou **Q** et dont l'unité est le **coulomb** (symbole **C**) ;  $1 \text{ C} \approx 6,25 \times 10^{18} e$  !<sup>3</sup>
- le champ de force électrique engendré est **proportionnel** à **Q** et opère de façon **attractive entre charges de signes opposés** et **répulsive entre charges de même signe** ;
- si **Q = 0 C**, le volume ou l'élément est dit **neutre** car il n'engendre pas de champ électrique.

1. Les autres forces fondamentales, dites d'*interaction forte* et d'*interaction faible*, n'opèrent qu'à l'échelle nucléaire de la matière.

2. Du nom de l'ingénieur physicien français du XVIII<sup>e</sup> siècle, Charles-Augustin COULOMB, auteur de plusieurs traités d'électricité.

3. Le nombre  $10^{18}$  égale un milliard de milliards ! Pour quantifier les charges statiques, on utilise des sous-multiples du coulomb.

■ En conséquence, les charges de mêmes signes ont donc tendance à se répartir dans l'espace de façon équilibrée et les charges de signes opposés à se regrouper. Mais un déséquilibre (accumulation locale de charges électriques de même signe) peut être créé lorsque les porteurs de charge *ne sont pas libres de circuler* spontanément (e.g. en frottant de l'ambre<sup>4</sup> avec un étoffe ou une peau d'animal). On observe ensuite des phénomènes de rééquilibrages violents dits « d'électricité statique » : cheveux qui se dressent, étincelle de décharge, etc.



## 1.2 Notion de courant électrique

■ Dans tout milieu, les porteurs de charges – comme d'ailleurs toutes les particules qui constituent la matière – sont individuellement sujets à d'incessants mouvements vibratoires désordonnés<sup>5</sup>, tout en restant globalement sur place, du fait des forces de répulsion et d'attraction mutuelles qui fondent l'équilibre du milieu. Mais dans certains milieux, des **porteurs de charge** sont peu soumis aux forces de cohésion du milieu et peuvent **circuler**, i.e. **se déplacer simultanément en très grand nombre dans une direction donnée**.

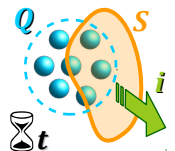
Ces milieux sont appelés **conducteurs** et comptent principalement (cf. illustrations ci-contre) :

1. les **métaux** et **alliages**, solides cristallins ou liquides ayant des électrons libres de se mouvoir d'un atome à un autre ; leur mouvement est « lent » (de l'ordre de  $10^{-2}$  mm/s, soit d'environ 30 000 atomes/s) mais il se propage à environ 90 % de la vitesse de la lumière  $c$ <sup>6</sup> ;
2. les **électrolytes** (solutions électrolytiques), liquides comportant des ions (eau non pure, acide, fluide corporel, etc.) ; des courants électriques bidirectionnels (cations dans un sens, anions dans l'autre sens) peuvent les parcourir à une vitesse de propagation d'environ 75 % de  $c$  ;
3. les **plasmas**, gaz ionisés (flamme, arc électrique, faisceaux de lumière à grande énergie) ; dans ce type de milieu peu dense qui n'est presque constitué que de porteurs de charge (ions), rien ne s'oppose à leur mouvement, qui peut donc être très rapide (jusqu'à environ  $c/3$ ) ; l'onde électrique s'y déplace elle-même à presque à 100 % de  $c$ .



Les milieux où les porteurs de charges ne peuvent se déplacer sont appelés **isolants** ; ils peuvent néanmoins « claquer » au-delà d'une **tension limite**. Il existe également des milieux dits **semi-conducteurs** où les porteurs de charge ne peuvent se déplacer que dans un seul sens, et seulement à partir d'un certain seuil de tension.

■ Un **courant électrique** est donc une **circulation de porteurs de charge** dans un milieu, i.e. un **mouvement général** dans une direction donnée. On caractérise un courant par son **intensité**, un scalaire noté  **$i$**  ou  **$I$** , dont l'unité est l'**ampère** (symbole **A**)<sup>7</sup>, et qui quantifie le **débit de charge** (quantité  **$Q$**  durant un temps  **$t$** ) à travers une surface  **$S$** , soit  **$I = Q/t$**  et donc  **$1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$** <sup>8</sup>.



Cette définition très générale permet de caractériser aussi bien :

- les **courants usuels** circulant dans les conducteurs métalliques linéaires (câbles, pistes, etc.) utilisés dans les circuits et les composants électrotechniques ou électroniques ; la surface  **$S$**  choisie pour déterminer  **$i$**  est alors toujours la section transversale du conducteur ;
- les courants se formant **en pleine matière** : éclairs de foudre, courants de terre, courants d'électrolyse, courants de Foucault<sup>9</sup>, etc. ; ces courants peuvent prendre des trajectoires très complexes, et la valeur de  **$i$**  dépend de l'orientation et de la taille de la surface  **$S$**  retenue pour le calcul.

■ À l'origine d'un courant électrique circulant entre deux points d'un milieu conducteur, il peut exister :

- soit un déséquilibre de répartition des charges dans le milieu, qui engendre un **champ de force électrique** s'exerçant sur ces charges pour rétablir l'équilibre ; cette origine est un phénomène d'**électrostatique** ;
- soit une **variation du champ magnétique** dans le milieu, provoquée par le mouvement d'un corps magnétique (e.g. un aimant), ou même par un conducteur parcouru par un courant ; cette origine est appelée l'**induction électromagnétique**.

Dans tous les cas, on peut décrire l'**état précédent la circulation du courant** par l'existence d'une **tension électrique** entre les deux points considérés.

4. Oléorésine formée de sève de pin fossilisée, dont le nom grec est justement *elektron* (ἤλεκτρον).

5. Agitation impossible à décrire avec précision mais d'autant plus ample que la température est élevée (phénomènes de dilatation).

6. Initiale du mot latin *celeritas*, en français « célérité » ; c'est une constante de l'Univers, qui vaut par définition  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ .

7. Du nom du mathématicien et physicien français (fin XVIII<sup>e</sup> – début XIX<sup>e</sup> siècle), André-Marie AMPÈRE.

8. Un ampère représente donc un débit de milliards de milliards (1 C) d'électrons par seconde ; et c'est une valeur d'intensité très banale !

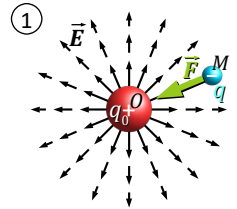
9. Courants bouclés dans la matière par induction électromagnétique, découverts en 1851 par le physicien français LÉON FOUCAULT.

### 1.3 Notions de tension électrique & différence de potentiel

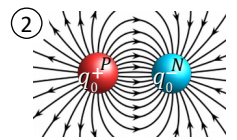
■ Intuitivement, la notion de **tension électrique** caractérise la « force » qui pousse les porteurs de charge à former un courant électrique dans un milieu, i.e. s'y déplacer en grands nombres dans une direction donnée. Si le milieu est isolant, le courant ne se forme pas mais la tension existe. Par analogie, en mécanique, la notion de force permet d'expliquer l'origine d'un mouvement, et si une force s'exerce sur un milieu indéformable, aucun mouvement ne se produit (hormis une déformation qu'on peut négliger) mais la force n'en existe pas moins.

■ Formellement, la notion de tension est plus complexe qu'il n'y paraît. Pour l'introduire, on considère un **champ électrique constant** dans un milieu macroscopiquement exempt de charges comme l'air ou le vide :

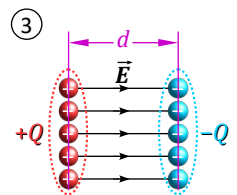
1. une charge fixe  $q_0$  centrée en un point  $O$  crée un champ électrique modélisable par un **champ vectoriel**, i.e. une application qui, à tout point  $M$  de l'espace, fait correspondre un vecteur  $\vec{E}_M$  *polaire* (i.e. radial en  $O$ ), dont la norme est proportionnelle à  $q_0$  et inversement proportionnelle au carré de la distance  $OM$  (cf. fig. ci-contre pour une charge  $q_0$  positive) ; une particule de charge  $q$  située en  $M$  subira alors une **force de Coulomb**  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}_M$  ; le sens de  $\vec{F}$  sur la droite  $(OM)$  dépend des signes respectifs de  $q_0$  et  $q$  ;



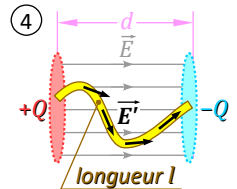
2. si deux charges fixes opposées  $+q_0$  et  $-q_0$  sont respectivement centrées en deux points distincts  $P$  et  $N$ , on observe un champ électrique *dipolaire* dont les lignes partent de  $P$  pour rejoindre celles de  $N$  ; comme dans le cas n°1, ce champ est complexe à caractériser puisqu'il varie en direction et en norme selon le point  $M$  considéré dans l'espace ;



3. pour créer un champ électrique  $\vec{E}$  constant (ou presque), il faut disposer **deux ensembles parallèles de charges fixes opposées**, comme dans un *condensateur*<sup>10</sup> à armatures planes, avec d'un côté une charge  $-Q$  (due à un excès d'électrons) et de l'autre une charge  $+Q$  (due à un déficit d'autant d'électrons) ; chaque ensemble de charges crée un champ complémentaire à celui de l'autre, leur somme donnant un champ  $\vec{E}$  linéaire de norme  $E$  **quasiment constante sur toute la distance  $d$**  qui sépare les armatures ;



4. si enfin on relie les deux ensembles de charges par un conducteur métallique curviligne de longueur  $l$  sans propriétés inductives notoires alors, **avant qu'un courant ne commence à circuler**, il apparaît tout au long du conducteur un champ électrique  $\vec{E}'_M$  tangent de norme constante  $E'$  telle que  $E' \cdot l = E \cdot d$  ; en effet, les porteurs de charge du conducteur canalisent le champ de proche en proche.



■ On peut donc caractériser l'action du champ électrique par un scalaire appelé la **tension électrique**, notée  $u$  ou  $U$  (ou aussi  $V$ ), dont l'unité est le **volt**<sup>11</sup> (symbole **V**) – et qui vaut  $U = E \cdot d = E' \cdot l$  dans le cas d'étude précédent :

- mathématiquement,  $U$  est définie comme la **circulation**<sup>12</sup> **du champ électrique** le long d'un chemin (si la norme du champ est constante et le chemin droit ou tangent au champ comme ici, on a un simple produit) ;
- physiquement,  $U$  représente le **travail**<sup>13</sup> **de la force électrique par unité de charge**, i.e. dans le cas d'étude précédent, la force qui s'exercerait<sup>14</sup> sur une charge  $q = 1$  C se déplaçant d'une armature à l'autre ; en d'autres termes, il s'agit de la **variation d'énergie potentielle** de la charge  $q$  sous l'effet de la force créée par le champ électrique sur la distance  $d$  ou  $l$  (selon le milieu) ; de ce qui précède, il résulte que  **$1 \text{ V} = 1 \text{ J/C} = 1 \text{ N.m/C}$** .

Au regard de ce dernier point, et en l'absence de phénomènes significatifs d'induction électromagnétique, on définit une tension comme une **différence de potentiel**, plus exactement une **différence d'énergie potentielle électrostatique** entre deux points  $A$  et  $B$  d'un milieu. On pose  **$U_{AB} = V_A - V_B$**  où  $V_A$  et  $V_B$  sont respectivement appelés **potentiel** (électrique) en  $A$  et  $B$ , et exprimés comme  $U_{AB}$  en volt. Dans l'absolu, il est impossible de déterminer la valeur exacte d'un potentiel, mais il suffit d'attribuer en un point du milieu une valeur arbitraire – en général,  **$V = 0 \text{ V}$  à la masse du circuit** ou à la borne négative du générateur – pour définir ensuite les tensions en tous points  $M$  du milieu. C'est cette définition de la tension qu'on emploie usuellement.

10. Composant décrit à la section III.

11. Du nom du physicien italien (XVIII<sup>e</sup> – XIX<sup>e</sup> siècle), Alessandro VOLTA, inventeur de la première pile (qui est un générateur de tension).

12. Notion de mathématiques basée sur celle de somme intégrale curviligne, qui n'est abordée qu'à partir du 1<sup>er</sup> cycle universitaire.

13. Cf. le cours au chap. 2.3 (puissance & rendement), §I.1, p. 1.

14. L'emploi du conditionnel s'impose ici car dans la pratique, aucun électron n'est censé traverser le milieu isolant du condensateur.



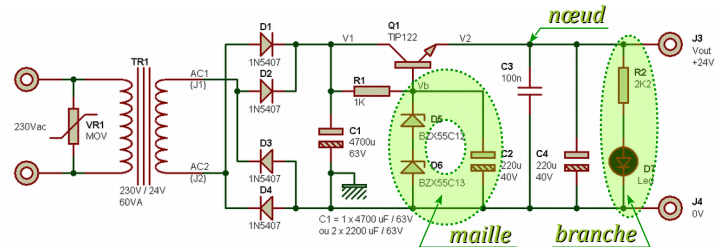
■ Par rapport à l'analogie intuitive entre mécanique et électricité par laquelle nous avons débuté, expliquons pourquoi la **tension** n'est pas définie comme une force mais comme le **travail d'une force par unité de charge** :

- notons d'abord que le courant n'est pas caractérisé par une *vitesse* mais un *débit* :  $I = Q/t$  ; en effet, la vitesse globale des porteurs de charge varie d'un milieu à l'autre, elle n'est pas pertinente pour caractériser les phénomènes électriques à l'échelle macroscopique car elle n'informe en rien sur la charge qui se déplace ;
- notons aussi que l'*intensité du champ de force électrique* varie avec la distance entre les accumulations de charges dans le milieu, alors qu'à l'échelle macroscopique usuelle, cette distance n'est pas influente sur les aspects électriques (tension, courant), du moins tant qu'on ne quantifie pas finement la résistivité du milieu ;
- surtout, rappelons (cf. chap. 2.3) que la puissance est définie en mécanique par  $P = F \cdot V$  et en électricité par  $P = U \cdot I$  (en régime continu) ; dans notre cas, on a  $U = E \cdot d = (F/Q) \cdot d$  donc  $P = (F/Q) \cdot d \cdot (Q/t) = F \cdot (d/t) = F \cdot V$  car  $V = d/t$  ; la **tension**  $U$  est donc la **grandeur électrique complémentaire au courant**  $I$  pour que le produit  $U \cdot I$  caractérise, à l'échelle macroscopique, l'**échange instantané d'énergie** mis en œuvre globalement par les forces et vitesses microscopiques s'exerçant sur la somme  $Q$  des charges des particules considérées ;
- enfin, pour corroborer la considération précédente, on verra plus loin (cf. section III.3) que dans un milieu purement résistif, tension et courant sont liés par une loi de proportionnalité (la célèbre loi d'Ohm  $U = R \cdot I$ ).

## II. Introduction aux circuits électriques

### II.1 Structure d'un circuit – vocabulaire général

■ Un **circuit électrique** (ou électronique) est en fait un **réseau**<sup>15</sup> de **composants** (générateur, résistors, condensateurs, bobines, transistors...) reliés à leurs bornes par des **conducteurs** (câbles, fils, pistes...). On peut le représenter par divers **schémas** conformément à des normes précises (cf. ci-contre le schéma d'une alimentation linéaire stabilisée).



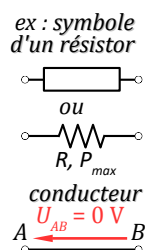
Pour l'étude des systèmes techniques, les circuits électriques sont schématisés de façon **déployée** afin de mettre en évidence les structures qui les composent. On adopte le vocabulaire suivant (cf. fig. ci-dessus) :

- un **nœud** est une jonction d'au moins trois conducteurs (ne pas confondre avec une borne de composant) ;
- une **branche** est une partie de circuit entre deux nœuds voisins (i.e. sans nœuds intermédiaires) ;
- une **maille** est une partie de circuit formant une boucle (ce que l'on pourrait qualifier de « circuit »).

Par convention, un schéma est exécuté dans le **sens de lecture** usuel au regard du fonctionnement du circuit : il est orienté des entrées vers les sorties de gauche à droite et de haut en bas.

■ Pour l'étude d'un circuit électrique, il faut modéliser ses composants et ses conducteurs :

- chaque composant est identifié par son **symbole** qui spécifie son appartenance à une **famille** (résistor, etc.) ; ses principaux **paramètres** (résistance, puissance maximale...) sont chiffrés ;
- chaque conducteur est figuré par un **trait droit** signifiant que la **liaison électrique** est supposée **parfaite**, i.e. que le conducteur est **équipotentiel** (en deux points A et B du conducteur,  $U_{AB} = 0$ ).



Outre leur classement par familles, on distingue des catégories transversales de composants :

- par le **nombre de bornes** ou broches de connexion qu'ils possèdent ; on appelle **dipôle**, **tripôle** et **quadripôle** ceux qui ont exactement deux, trois ou quatre bornes ;
- par le fait qu'ils sont **actifs** ou **passifs**, i.e. qu'ils sont capables ou non de **fournir de l'énergie électrique** ; un composant est dit **actif**, soit s'il est source de courant ou de tension (e.g. une pile), soit s'il requiert une alimentation spécifique pour fonctionner (e.g. un amplificateur opérationnel).

Enfin, on distingue les composants par le **rôle** qu'ils jouent dans un circuit et une situation donnée :

- un composant est dit **générateur** s'il agit comme **source** de courant ou de tension dans le circuit ;
- sinon, un composant est dit **récepteur** : il reçoit de l'énergie fournie par un générateur.

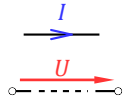
Par exemple, un accumulateur rechargeable (dipôle actif) est **générateur** lorsqu'il fournit du courant au système, et **récepteur** lorsqu'il est en situation de recharge.

15. Dans la pratique, on réserve le terme de *réseau* aux « circuits » de distribution d'électricité ou de communication (internet, etc.).

## II.2 Représentation des courants et tensions dans un circuit

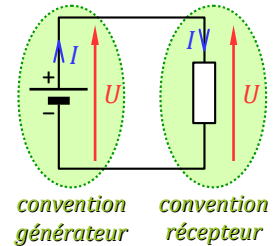
Dans le schéma d'étude d'un circuit électrique, on utilise **deux types de flèche**. On représente :

- un **courant** par une flèche tracée **sur le trait** du **conducteur** considéré ;
- une **tension** par une flèche tracée **entre les 2 points** du circuit (à côté des conducteurs).



Sur un même circuit, le **sens des flèches** est l'objet de **deux conventions**. Sans considérations sur le sens de déplacement des porteurs de charges<sup>16</sup>, le **courant** est orienté, i.e. fléché et considéré comme **positif** :

- aux bornes d'un **générateur**, dans le sens des **potentiels croissants** ; il donc est fléché comme « sortant » de la borne « + » et « entrant » dans la borne « - » d'une pile ;
- aux bornes d'un **récepteur**, dans le sens des **potentiels décroissants**, i.e. dans le **sens inverse de la tension**.



Dans un circuit, ces deux conventions coexistent en vertu des lois l'électrocinétique. Dans l'exemple représenté ci-contre, la tension  $U$  est la même aux bornes du récepteur et du générateur (car ils sont reliés par des conducteurs parfaits, donc équipotentiels), alors que le courant  $I$  parcourt le circuit en boucle (en régime continu), donc « tourne ».

Dans un conducteur, si le sens du courant n'est pas connu *a priori*, il suffit de choisir un **sens arbitraire** ; par les lois de l'électrocinétique, en déterminant le signe de sa valeur algébrique  $I$ , on en déduira *a posteriori* son sens conventionnel : si on obtient  $I > 0$ , le courant est orienté dans le **sens choisi**, sinon il est dans le **sens contraire**.

## II.3 Régimes de fonctionnement – vocabulaire général

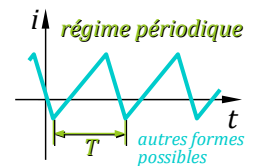
■ Le cas le plus simple est celui où le courant et la tension entre deux points d'un circuit (ou d'une partie du circuit) sont, durant tout le fonctionnement du système, des **grandeurs constantes** ou **quasi-constantes** (e.g. lorsque l'usure d'une pile est négligée dans le cadre d'une étude de fonctionnement). On parle de **régime continu** (en abrégé **CC** pour *courant continu*, en anglais *direct current*, **DC**, symbole  $\text{---}$ ) et on emploie les **lettres majuscules**  $U$  et  $I$  pour désigner la tension et le courant.



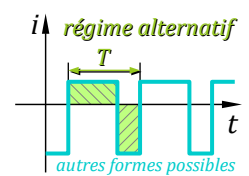
Dans le cas le plus général, le courant et la tension sont des **grandeurs variables dans le temps**. On peut les modéliser par des fonctions de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathbb{R}$ , respectivement notées  $i : t \mapsto i(t)$  et  $u : t \mapsto u(t)$  ou, pour alléger les notations, juste par **lettres minuscules**  $u$  et  $i$ . On parle de **régime variable**, qui inclut des sous-cas « gigognes » remarquables, lorsque :



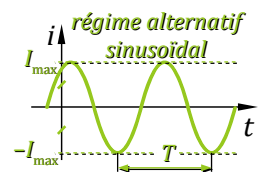
- les fonctions  $i$  et  $u$  répètent un **cycle de variation** identique toutes les  $T$  secondes ; commune à  $u$  et  $i$ , la durée  $T$  est appelée la **période** et son inverse  $f = 1/T$  la **fréquence** qui donne le nombre de cycles par secondes, et s'exprime en **Hertz**<sup>17</sup> (symbole **Hz**) : on a donc  $1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$  ; on parle alors de **régime périodique** ;



- les fonctions  $i$  et  $u$  sont périodiques avec une fraction de période positive, l'autre négative, telles que sur la période entière, la grandeur a une **valeur moyenne nulle** ; on parle de **régime alternatif** (en abrégé **CA** pour *courant alternatif*, en anglais *alternative current*, **AC**, symbole  $\sim$ ) ;



- les fonctions  $i$  et  $u$  sont périodiques, alternatives, et s'écrivent comme une expression de la forme  $A \cdot \sin(ft)$  à un décalage temporel près ( $A$  étant l'**amplitude**) ; on parle alors de **régime alternatif sinusoïdal** et ce cas correspond à celui des réseaux de distribution électrique domestiques et industriels avec, en France,  $f = 50 \text{ Hz}$ .



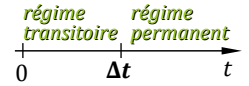
En **régime périodique**, on appelle **valeur efficace**, qu'on note respectivement par les **lettres majuscules**  $U$  et  $I$  (donc comme en régime continu), la **moyenne quadratique** des fonctions  $u$  et  $i$  sur une période, i.e. la racine carrée de la moyenne des carrés<sup>18</sup> des valeurs instantanées  $u(t)$  et  $i(t)$ . Ce choix de notation identique permet que la formule  $P = U \cdot I$  de la puissance électrique en régime continu reste valable avec les valeurs efficaces en **régime périodique synchrone** (i.e. lorsque les fonctions  $u$  et  $i$  n'ont pas de décalage temporel entre elles).

16. Le sens conventionnel du courant a été fixé par Ampère en 1820, à une époque où l'on ignorait l'existence même des électrons, donc on ne pouvait pas savoir qu'ils étaient les porteurs de charges majoritaires. En définitive, la convention adoptée ne pose aucun problème puisqu'il en faut bien une et qu'il existe des situations où les porteurs de charges sont positifs.

17. Du nom du physicien allemand du XIX<sup>e</sup> siècle, Heinrich Rudolf HERTZ, découvreur des ondes radio-électriques dites *hertziennes*.

18. En anglais *root mean square*, origine du sigle **RMS** ; cette notion et bien d'autres seront revues en détails au chapitre 3.2 du cours.

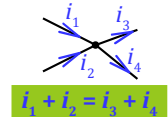
■ Par ailleurs, que le régime d'alimentation d'un circuit soit **continu** ou **périodique**, à sa mise en service (instant  $t = 0$ ), il faut un temps  $\Delta t$  pour que courants et tensions prennent leur valeur ou leur forme « définitive » (à une marge d'erreur près). Entre l'instant  $t = 0$  et l'instant  $t = \Delta t$ , on dit que le circuit est en **régime transitoire**, et à partir de l'instant  $t = \Delta t$ , en **régime permanent** ou **établi**.



## II.4 Lois fondamentales de l'électrocinétique – dites lois de Kirchhoff

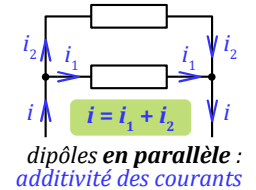
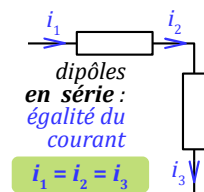
Dans un circuit électrique, si l'on néglige les phénomènes de propagation d'onde<sup>19</sup> et les éventuelles perturbations électromagnétiques externes, le **principe général de conservation de l'énergie** peut s'écrire sous des formes remarquables, faciles à retenir. Ce sont les deux fameuses **lois de Kirchhoff**<sup>20</sup>, dites aussi **loi des nœuds** et **loi des mailles**, qui sont valables aussi bien en **régime continu** que **variable**, transitoire ou permanent, en valeurs instantanées ou efficaces. Ces lois ont aussi un énoncé remarquablement simple dans les cas d'association de deux dipôles en **série** et en **dérivation** (i.e. en **parallèle**).

■ La **loi des nœuds** exprime la **conservation de la charge électrique** : puisqu'il n'y a en principe aucune accumulation de porteurs de charges circulant dans des conducteurs parfaits, alors la somme des courants entrants dans un nœud est toujours égale à la somme des courants sortants.



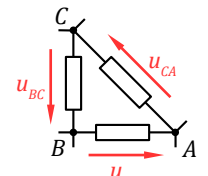
En notation mathématique abrégée, elle s'écrit  $\sum i_{\text{entrants}} = \sum i_{\text{sortants}}$ <sup>21</sup>.

La loi des nœuds permet d'établir immédiatement des équations sur les courants au sein d'un circuit en repérant les associations en série et en parallèles de dipôles (cf. les deux cas ci-contre). Il faut ensuite prendre en compte les types de dipôles et leurs caractéristiques pour en déduire, connaissant les tensions, les valeurs des courants.

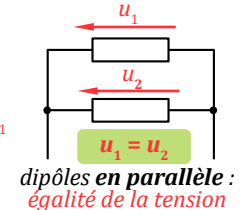
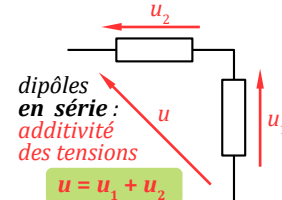


■ La **loi des mailles** exploite l'**unicité du potentiel en un point** : la somme algébrique des tensions aux bornes des dipôles qui composent une maille dans un sens de parcours donné est forcément nulle puisque la maille est fermée (on revient donc au même point de potentiel). En notation mathématique abrégée, pour des tensions circulaires<sup>22</sup>, elle s'écrit  $\sum u_{\text{maille}} = 0$ .

Dans l'exemple ci-contre d'une maille à trois dipôles, on a  $u_{AB} + u_{BC} + u_{CA} = u_{AA} = 0 \text{ V}$ .



Comme la loi des nœuds, la loi des mailles s'applique plus facilement en repérant les associations en série et en parallèles de dipôles (cf. les deux cas ci-contre). La propriété d'additivité des tensions aux bornes des dipôles successifs d'une même branche est aussi connue sous le nom de **loi des branches**.



## II.5 Notions de masse et de terre

La **masse métallique** (symbole  $\downarrow$  ou  $\nearrow$ )<sup>23</sup> d'un système est l'ensemble des **parties conductrices** (métalliques) de sa **structure** (bâti, carters, etc.). Normalement **hors tension**, elle peut ne plus l'être suite à un défaut d'isolement (e.g. un câble usé dont une partie nue la touche) et présenter alors un danger en cas de contact par une personne. Mais sur certains appareils embarqués (e.g. automobiles, vélos...), la masse peut être employée comme **conducteur commun** (relié le plus souvent à la borne « - » de l'alimentation) pour diminuer les faisceaux de câbles. Enfin, pour des boîtiers électroniques, elle peut servir de **blindage électromagnétique**.

La **terre électrique** est le **sol tellurique conducteur** de la croûte terrestre, immense **réservoir de charges** dont le **potentiel** est considéré comme **nul** (mais qui varier localement lors des **impacts de foudre** et des **courants vagabonds**). Le symbole  $\perp$  représente une **prise de terre**, (conducteur métallique enterré nu), auquel il est obligatoire de **relier les masses** des appareils raccordés pour évacuer les éventuels **courants de fuite**.

En fonction du **type de système** (embarqué ou raccordé), de son **degré d'isolement**, du **niveau de tension** et du **régime** (continu, alternatif) qu'il met en œuvre, et aussi des exigences de **continuité de service**, il existe différents **schémas de liaison à la terre** et de **mise à la masse**, couplés à l'emploi de divers **appareils de protection**<sup>24</sup>.

19. Hypothèse d'« approximation des régimes quasi-permanents » ou « quasi stationnaires » (ARQP ou ARQS) qui, en régime périodique, est valable pour des dimensions usuelles de circuit (1 m), tant la fréquence de  $u$  et  $i$  reste inférieures à 100 kHz (kilo hertz).

20. Du nom du grand physicien allemand du XIX<sup>e</sup> siècle, Gustav Robert KIRCHHOFF, qui a notamment établi ces lois.

21. Le respect de cette loi dépend de l'absence d'erreur dans la détermination du sens des courants dans le circuit.

22. Si une tension ne respecte pas le sens de circulation des autres, il suffit de la sommer avec un signe négatif pour que la loi reste valide.

23. Ce symbole figure des *hachures obliques* comme sur les parties des pièces métalliques vues en coupe dans les dessins techniques.

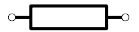
24. Pour approfondir ces aspects, visionner notamment la vidéo [https://www.youtube.com/watch?v=V\\_LVEZ-fYrQ](https://www.youtube.com/watch?v=V_LVEZ-fYrQ)



### III. Dipôles élémentaires non inductifs

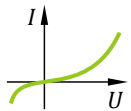
#### III.1 Généralités

■ Un **dipôle** est un composant n'ayant que **deux bornes** (ou *broches*) de connexion (cf. symbole général ci-contre). Si elles sont **différentiées** et que le fonctionnement du dipôle n'est pas indépendant du **sens de connexion**, le dipôle est dit **polarisé** (e.g. comme les accumulateurs, les diodes, certains condensateurs...). Sinon, le dipôle est dit **non polarisé**.



N'ayant que deux bornes, un dipôle est un composant pour lequel on ne peut définir qu'**une seule tension  $U$** , celle entre ses deux bornes. De plus, en raison du principe de non accumulation des porteurs de charge dans les conducteurs, on ne peut définir qu'**un seul courant  $I$** , le même en entrée et en sortie du dipôle<sup>25</sup>.

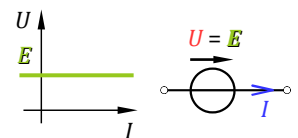
■ On appelle **courbe caractéristique statique** – ou plus simplement *caractéristique* – **courant-tension** d'un dipôle le graphe, théorique ou empirique, constitué de l'ensemble des points de fonctionnement de coordonnées **( $U$ ,  $I$ )**. Les valeurs  **$U$**  et  **$I$**  sont prises en **régime continu permanent**, i.e. jusqu'à stabilisation (fin du régime transitoire) de  **$I$**  pour chaque changement de la valeur (constante) de  **$U$** ; c'est pourquoi on qualifie la courbe de « statique ». Elle est pertinente pour de nombreux composants (résistors, diodes, générateurs de courants), mais on lui préfère la caractéristique **tension-courant** donnant la tension  **$U$**  en fonction du courant  **$I$**  pour les générateurs de tension.



Néanmoins, les courbes statiques ne peuvent décrire le fonctionnement des dipôles dont le régime transitoire est déterminant (condensateurs, bobines...). On emploie alors des courbes **courant-temps** ou **tension-temps**.

#### III.2 Générateurs de tension continue

■ Un **générateur idéal de tension continue** est un dipôle théorique **actif polarisé** délivrant une **tension  $U = E$**  constante, appelée **force électromotrice** (en abrégé **FEM**)<sup>26</sup>, quel que soit le courant  **$I$**  qu'il débite, lequel dépend du récepteur qu'il alimente. Sa caractéristique tension-courant est donc une droite horizontale, d'où son symbole général (un cercle barré par une ligne horizontale), la flèche indiquant la polarité.



**Attention**, relier les bornes d'un générateur de tension par un simple conducteur s'appelle réaliser un **court-circuit** : en théorie, le générateur débite un **courant infini** ! En pratique, effectuer une telle manœuvre produit un **arc électrique** aux points de connexion juste avant la liaison et provoque très vite, en l'absence de protection intégrée (fusible, disjoncteur) soit la **fusion du conducteur**, soit la **destruction du générateur**, soit les deux.

En conséquence, on ne doit jamais associer **en parallèle** deux générateurs de tension qui n'ont pas la même FEM. En effet, cela reviendrait à mettre en court-circuit un générateur de FEM égale à la différence de celles de chaque générateur. En théorie, mettre en parallèle deux générateurs de tension idéaux de même FEM n'a aucun intérêt puisque l'on obtient un générateur de même FEM ; mais en pratique, cela peut être utile (e.g. pour les batteries).

En revanche, si l'on associe **en série** dans le même sens deux générateurs de tension de FEM respectives  $E_1$  et  $E_2$ , alors conformément à la loi des branches, on obtient un générateur de tension de FEM égale à la **somme  $E_1 + E_2$** .

■ Dans les limites d'utilisation normale, certains systèmes ou composants réels peuvent être vus comme des générateurs idéaux de tension continue, notamment les alimentations stabilisées.

Une **alimentation stabilisée**<sup>27</sup> est un appareil conçu pour délivrer une **tension fixe** (e.g. 12 V) ou **réglable** dans une **plage de courant limitée** (e.g. de 0 à 5 A). La technologie dite à **découpage** et **régulation** est aujourd'hui presque universellement employée pour les ordinateurs fixes ou portables, les chargeurs de batterie, les équipements de laboratoire, et de très nombreux autres systèmes fonctionnant en très basse tension continue. Souvent, la fiche de connexion est coaxiale, la borne « + » étant en général interne et la borne « - » externe<sup>28</sup>.



Il existe aussi des **modèles industriels** de toute taille, comme le boîtier en photo ci-contre, à monter sur rails DIN, pour disposer dans une armoire électrique d'une alimentation en tension continue (indispensable pour les automates programmables et les cartes électroniques).



25. Même si, pour un condensateur (cf. section III.4), ce courant ne traverse pas physiquement le dipôle.

26. **Rappel** : l'emploi du mot « force » est un abus de langage au regard de la notion de tension (qui est, en fait, le *travail* d'une force).

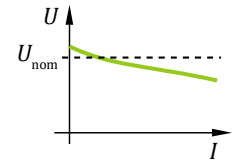
27. Il s'agit en fait d'un système quadripôles (2 pôles d'entrées en tension alternative secteur, 2 pôles de sortie en tension continue).

28. En fait, la borne « - » est en général de potentiel 0 V, appelé *commun*, sauf pour les alimentations dites « doubles » à borne négative.

Autre générateur réel, un **accumulateur électrique** (batterie ou pile, rechargeable ou non) délivre une **tension presque constante** dont la valeur nominale (e.g. 1,2 V) est la principale caractéristique. De plus, il ne peut débiter qu'un **courant limité**, dont la valeur est rarement indiquée. En revanche, un accumulateur rechargeable indique en Ah (ampère-heure) ou mAh, sa **capacité** – terme impropre désignant la **quantité d'électricité** (ou charge) totale  $Q = I.t$  qu'il peut débiter après une phase de recharge complète : ainsi, un accumulateur de capacité  $Q = 800$  mAh complètement chargé peut théoriquement débiter 800 mA durant 1 heure, ou bien 400 mA durant 2 heures, 200 mA durant 4 heures, etc.

En réalité, la courbe caractéristique tension-courant d'un accumulateur n'est ni tout à fait droite, ni horizontale. Globalement, on observe globalement une pente négative, qui traduit une **chute de tension** quasi proportionnelle au courant débité ; ce défaut peut être modélisé par une **résistance interne** (cf. section suivante, p. 9).

Les accumulateurs peuvent être associés en parallèle pour augmenter le courant maximal, mais en veillant à ce qu'ils aient tous la même tension, donc approximativement le même degré d'usure ou niveau de charge.



### III.3 Résistors – loi d'Ohm – effet Joule

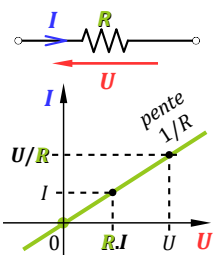
■ Un **résistor idéal** (ou une **résistance « pure »**) est un dipôle théorique **passif non polarisé** qui, tant en régime continu que variable, vérifie la **loi d'Ohm**<sup>29</sup>  $U = R.I$ . Le coefficient  $R$  est sa **résistance**, ou **valeur ohmique**, son unité est l'**ohm** (symbole  $\Omega$ ).

Autrement dit, un résistor idéal est un **récepteur** qui, traversé par un courant  $I$ , est le siège d'une tension  $U$  proportionnelle à  $I$  et  $R$ . On peut aussi dire que, soumis à une tension  $U$ , il laisse passer un courant proportionnel à  $U$  et inversement proportionnel à  $R$  ; sa caractéristique courant-tension est donc une **droite passant par l'origine** de pente  $1/R$ .

Le phénomène de résistance électrique dans un conducteur est d'autant plus important que la surface de sa section transversale est faible, ce qui engendre d'autant plus de « frottement » des porteurs de charge. En termes énergétiques, un résistor parfait **dissipe de l'énergie sous forme de chaleur** : c'est l'**effet Joule**<sup>30</sup>. En régime continu ou périodique, cette énergie se dissipe à une puissance  $P = U.I$  or  $U = R.I$  donc  $P = R.I^2 = U^2/R$ .

L'effet Joule est exploité dans certains composants comme les résistors de chauffage, (cf. photo ci-dessus) ou d'éclairage, mais pour d'autres, il est néfaste et doit être modéré par l'emploi de dispositifs de refroidissement (radiateurs de dissipation, ventilateurs...).

De plus, s'il est possible de modéliser de nombreux composants par un résistor parfait, il n'est pas toujours simple de leur attribuer valeur de résistance constante. En effet, **la résistance électrique dans un milieu varie avec la température qui y règne** : souvent l'agitation locale des particules perturbe et freine le mouvement global des porteurs de charges (cf. ci-contre le cas d'une ampoule à incandescence 230 V/100 W).



$T \approx 20^\circ\text{C}$ $R \approx 40 \Omega$	$T > 2000^\circ\text{C}$ $R \approx 530 \Omega$

■ Un **résistor réel** est un composant dont le comportement est proche de celui d'un résistor idéal. La principale différence avec un résistor idéal réside surtout dans la **limite de puissance**  $P_{\max}$  qu'il peut supporter : sa courbe caractéristique s'apparente donc à une **droite tronquée**. La donnée de  $P_{\max}$  permet, via la loi d'Ohm, de déterminer la tension et le courant maximal admissible :  $U_{\max} = \sqrt{P_{\max} \cdot R}$  et  $I_{\max} = \sqrt{P_{\max}/R}$ .

Hormis pour des fonctions de chauffage et d'éclairage, un résistor est surtout employé pour **limiter le courant** dans une branche (led, condensateur monté en série) ou **diminuer la tension** dans une partie circuit (pont diviseur de tension). Il existe une vaste gamme de résistors sur un large intervalle de valeurs ohmiques pour couvrir toutes les applications :

- petits résistors en graphite/céramique de puissance 0,1 à 2 W ;
- résistors moyens à fil nickel-chrome sur corps céramique, de puissance jusqu'à 30 W ;
- résistors de dissipation de puissances supérieures au kW pour systèmes industriels.

Il existe aussi des résistors à **résistance ajustable** (à vis de réglage), et des **potentiomètres** ou **rhéostats** (à bouton tournant ou curseur) dont la résistance est modifiable en fonctionnement.



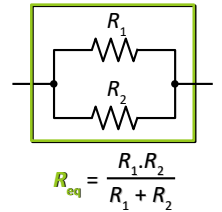
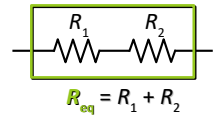
29. Du nom du physicien allemand (fin XVII<sup>e</sup>, milieu du XIX<sup>e</sup> siècle), Georg Simon OHM, découvreur de cette loi, publiée en 1827.

30. Effet étudié et décrit par le physicien anglais du XIX<sup>e</sup> siècle, James Prescott JOULE.



■ Avec une association de deux résistors parfaits, respectivement de résistance  $R_1$  et  $R_2$ , on introduit la notion de **résistance équivalente**, qui est la valeur ohmique  $R_{eq}$  du résistor parfait global équivalent à celui de l'association. Par itérations, les formules se généralisent à une association de  $n$  résistors.

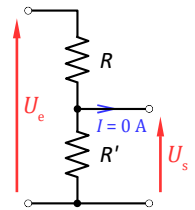
- **en série**, on a  $R_{eq} = R_1 + R_2$  ; avec  $n$  résistors en série, on a  $R_{eq} = R_1 + \dots + R_n$  ;  
si les  $n$  résistors ont la même résistance  $R = R_1 = R_2 = \dots = R_n$  alors on a  $R_{eq} = n.R$  ;
- **en parallèle**, on a  $1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2$  , formule qui s'écrit aussi  $R_{eq} = R_1.R_2/(R_1 + R_2)$  ;  
avec  $n$  résistors en parallèle, on a  $1/R_{eq} = 1/R_1 + \dots + 1/R_n$  , la seconde écriture n'ayant pas de généralisation simple – e.g. pour 3 résistors,  $R_{eq} = R_1.R_2.R_3/(R_1.R_2 + R_2.R_3 + R_1.R_3)$  ;  
si les  $n$  résistors ont la même résistance  $R = R_1 = R_2 = \dots = R_n$  alors on a  $R_{eq} = R/n$  .



Ces propriétés se démontrent sans difficulté par applications des lois de Kirchhoff et de la loi d'Ohm.

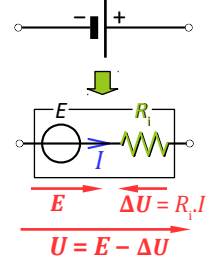
La notion de résistance équivalente est très utile, elle facilite les calculs des tensions et des courants dans un circuit dont les récepteurs sont des résistors. En particulier, elle trouve une application dans le circuit quadripolaire appelé **pont diviseur de tension** :

Si deux résistors  $R$  et  $R'$  formant une branche soumise à une tension  $U_e$  d'entrée, et si courant ne circule dans la branche formant le pôle de sortie, alors la tension  $U_s$  de sortie aux bornes du résistor  $R'$  vaut  $U_s = U_e.R'/(R + R')$  . Cette formule se généralise pour une branche de  $n$  résistors  $R_1, \dots, R_n$  : la tension  $U_k$  aux bornes du résistor  $R_k$  vaut  $U_k = U_e.R_k/(R_1 + \dots + R_n)$  – i.e.  $U_k$  égale  $U_e$  multipliée la résistance *locale* divisée par la résistance *globale*.



■ La notion de résistor parfait permet aussi d'affiner la modélisation de **dipôles non parfaits** présentant une **résistance interne** indésirable. Ainsi, une pile électrique neuve 1,5 V (tension nominale) peut être vue comme un générateur idéal de tension de FEM  $E \approx 1,6$  V associé en série à un résistor parfait de résistance  $R_i \approx 0,3 \Omega$  :

- lorsqu'on mesure la **tension à vide**  $U_0$  de la pile, i.e. lorsqu'elle n'est reliée à aucun récepteur, la résistance interne est « invisible » car  $I = 0$  A ; on a  $U_0 = E$  ;
- mais lorsqu'on branche la pile sur un récepteur qui appelle un courant  $I$ , alors on mesure aux bornes de la pile une tension  $U < U_0$  ; la différence  $\Delta U = U_0 - U$  est appelée **chute de tension** ; due à la résistance interne de la pile, elle vaut  $\Delta U = R_i.I$  soit, pour  $I = 1$  A,  $\Delta U = 0,3$  V ; par application de la loi des branches, aux bornes de la piles, on ne mesure donc plus que  $U = 1,6 - 0,3 = 1,3$  V.

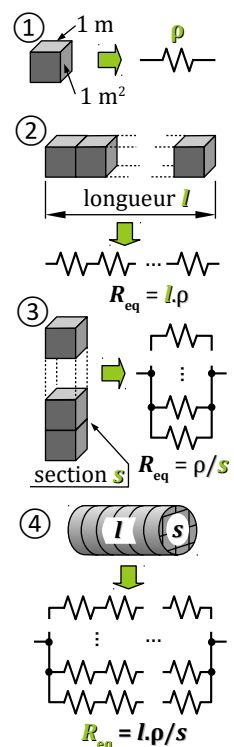


■ On peut également modéliser des **milieux matériels** comme des résistors parfaits pour prendre en compte leur aspect résistif. On définit la **résistivité** d'un milieu comme sa résistance par unité de longueur et de section (car les conducteurs sont en général linéiques) :

1. on considère une **unité de volume** de longueur 1 m et de section 1 m<sup>2</sup> comme un **résistor parfait unitaire** dont la résistance  $\rho$  est appelée, par définition, la **résistivité** du milieu ;
2. un tronçon de longueur quelconque  $l$  (en m) et de section 1 m<sup>2</sup> devient une **association en série** de  $l$  résistors unitaires identiques, de résistance équivalente  $R_{eq} = l.\rho$  ;
3. un tronçon de section quelconque  $s$  (en m<sup>2</sup>) et de longueur 1 m devient une **association en parallèle** de  $s$  résistors unitaires identiques, de résistance équivalente  $R_{eq} = \rho/s$  ;
4. en définitive, un tronçon de longueur  $l$  (en m) et de section  $s$  (en m<sup>2</sup>) est donc équivalent à un résistor de **résistance équivalente**  $R_{eq} = l.\rho/s$  .

Puisque la résistance d'un tronçon de matière est proportionnelle à sa longueur et inversement proportionnelle à sa section, sa résistivité s'exprime en  $\Omega.m^2.m^{-1}$ , i.e en  $\Omega.m$ . Le tableau ci-dessous donne la valeur de  $\rho$  à température ambiante pour quelques milieux :

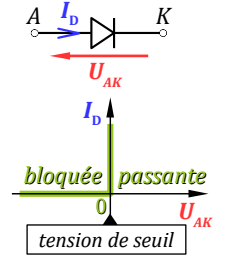
métaux	$\rho$	milieux divers	$\rho$	isolants	$\rho$
cuivre	$1,7 \times 10^{-8}$	terre	50 à 1000	bois sec	$10^{14}$
aluminium	$2,6 \times 10^{-8}$	eau de mer	0,3	céramique (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$10^{16}$
fer	$8,5 \times 10^{-8}$	eau pure	$1,8 \times 10^5$	PVC	$10^{17}$



### III.4 Diodes

■ Une **diode idéale** est un dipôle théorique **passif polarisé**, ses bornes sont respectivement appelées **anode** (A) et **cathode** (K). Sa caractéristique courant-tension n'est pas une fonction mais une correspondance (cf. cours, chap. 2.1) ayant **deux domaines**. Si la diode est soumise :

- à une tension  $U_{AK} < 0$  V, on a  $I_D = 0$  A – aucun courant ne la traverse, elle se comporte comme un **isolant parfait**, elle est **bloquée** – c'est le **domaine inverse** ;
- à un **courant direct**  $I_D \geq 0$  A, on a  $U_{AK} = 0$  V – elle n'est le siège d'aucune tension, elle se comporte comme un **conducteur parfait**, elle est **passante** – c'est le **domaine direct**.



N'ayant pas de résistance, une diode ne doit pas être directement reliée aux bornes d'un générateur de tension : un résistor en série est nécessaire pour limiter le courant, sinon on réalise un **court-circuit** (cf. section III.2) !

On appelle **commutation** le passage de la diode d'un état à un autre (i.e. bloqué vers passant ou l'inverse). Si la diode est idéale, la commutation est **instantanée**. De plus, la **tension de seuil** entre les deux domaines est nulle.

■ Dans la pratique, les diodes sont réalisées le plus souvent par une jonction PN, i.e. une juxtaposition de deux milieux **semi-conducteurs** (silicium, ou germanium, etc.), l'un dit « N », dopé en électrons libres, l'autre dit « P », dopé en trous d'électrons (équivalent à des porteurs de charge positifs).<sup>31</sup>

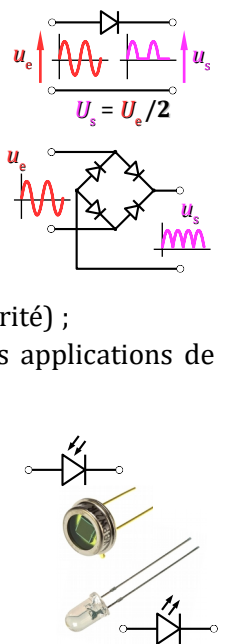
Les petites diodes employées usuellement en électronique sont cylindriques et marquées d'un anneau qui repère la cathode, correspondant à la barre du symbole – cf. photo ci-contre. Il existe aussi d'autres présentations (CMS, etc.). D'une façon générale, la caractéristique courant-tension d'une diode réelle est tronquée, non linéaire, et fait apparaître :

- dans le **domaine direct**, une tension de seuil<sup>32</sup>  $U_F > 0$  V, qui dépend du milieu semi-conducteur (0,7 à 1 V pour le silicium, 0,3 à 0,5 V pour le germanium..., valeurs non négligeables dans des circuits en très basse tension) et un courant maximal  $I_{F\max}$  qui dépend des dimensions de la diode (vaste gamme de valeurs de l'ordre de  $10^{-1}$  A à  $10^2$  A) ;
- dans le **domaine inverse**, un faible courant de fuite (quelques  $\mu$ A) et une tension de claquage<sup>33</sup>  $U_R$  (de l'ordre de  $-10$  à  $-10^3$  V) dont le dépassement négatif rend la diode conductrice ; ce phénomène n'est pas forcément irréversible et peut être exploité fonctionnellement avec un type spécial de diode, dit **Zener**<sup>34</sup>, si le dépassement reste limité.



■ Dans les systèmes techniques, les diodes ont de très nombreuses **applications**, comme :

- **diviser par deux la valeur efficace d'une tension**, en coupant ses valeurs négatives ; cette technique de redressement mono-alternance très simple permet de réaliser deux niveaux de puissance sur un appareil (e.g. sèche-cheveux) ;
- **redresser une tension**, afin d'engendrer une tension unidirectionnelle (e.g. chargeur de batterie) ou continue (e.g. alimentation stabilisée) ; on utilise des circuits à 2 ou 4 diodes (dites de **redressement**), dont le plus connu est le **pont de Graetz**<sup>35</sup>, représenté ci-contre ;
- **isoler unilatéralement une branche** de circuit, lui permettant :
  - de recevoir un courant unidirectionnel (préservant ainsi la branche des inversions de polarité) ;
  - d'émettre du courant sans retour possible (décharge d'un condensateur, etc.) ; pour les applications de régulation, une diode à commutation rapide, dite **diode Schottky**<sup>36</sup>, est requise ;
- **réaliser un effet avec l'énergie lumineuse** :
  - avec une **photodiode** (cf. photo et symbole ci-contre<sup>37</sup>), pour convertir un signal lumineux en un signal électrique à des fins de détection (photodétecteurs) ; avec une **cellule photovoltaïque**, pour produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire ;
  - avec une **diode électroluminescente** (del – en anglais led), convertir une énergie électrique en énergie lumineuse, pour des applications d'éclairage (lampes), de signalisation (voyants), de transmission de signaux (optocoupleurs)...



31. Pour plus d'explications, cf. la vidéo de la chaîne *Learn Engineering* : <https://www.youtube.com/watch?v=JNi6WY7WKAI>

32. En anglais, *forward voltage*, d'où la notation usuelle  $U_F$  employée à la place de  $U_D$  (notation également courante).

33. En anglais, *reverse voltage* ou *breakdown voltage*, d'où les notations usuelles  $U_R$  et  $U_{br}$ .

34. Du nom du physicien américain du XX<sup>e</sup> siècle, Clarence Melvin ZENER, découvreur du phénomène de claquage des isolants.

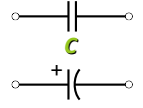
35. Du nom du physicien allemand (milieu XIX<sup>e</sup>, milieu XX<sup>e</sup> siècle), Leo GRAETZ, inventeur de ce circuit.

36. Du nom du physicien allemand (fin XIX<sup>e</sup>, fin XX<sup>e</sup> siècle), Walter Hans SCHOTTKY, inventeur de ce type de diode.

37. NB : L'anode d'une photodiode ou d'une led (à relier à la borne « + » du générateur) est sa broche la plus longue.

### III.5 Condensateurs

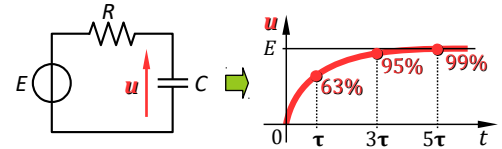
■ Un **condensateur** est un dipôle **passif**, parfois polarisé (cf. symboles ci-contre<sup>38</sup>), dont les bornes sont reliées à deux **armatures** métalliques en vis-à-vis, séparées par un **diélectrique**, i.e. une couche mince isolante mais perméable au champ électrique (cf. I.3). Si le condensateur est **parfait** :



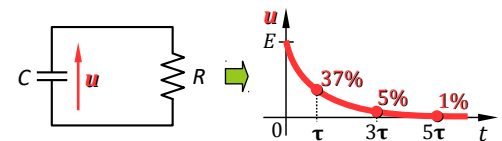
- soumis à une tension continue  $U$ , il peut accumuler une **charge** (négative sur une armature, positive sur l'autre – la somme des deux étant nulle) dont la valeur maximale vaut théoriquement  $Q = C.U$  ; la constante  $C$  est appelée la **capacité** du condensateur, son l'unité est le **farad**<sup>39</sup> (symbole **F**) – on a  $1\text{ F} = 1\text{ C/V}$  ;
- ayant accumulé la charge  $Q$ , il présente une tension  $U = Q/C$  à ses bornes qui se maintient tant qu'elles restent hors circuit ; pour que le condensateur se **décharge**, il faut le brancher à un récepteur.

Techniquement, la charge et la décharge d'un condensateur parfait peuvent être réalisées comme suit :

1. Le condensateur est relié à un générateur de tension de FEM  $E$  via une résistance  $R$  en série, pour limiter le courant ; la charge se déroule selon une fonction temporelle à croissance d'abord rapide puis asymptotique horizontale, dont les repères sont des multiples de la **constante de temps** du montage  $\tau = R.C$  (lettre grecque « tau »).

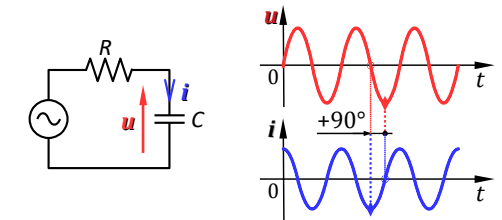


2. Ensuite, si l'on relie le condensateur chargé à la résistance  $R$ , il circule un courant de décharge qui abaisse sa tension  $U$  asymptotiquement jusqu'à  $0\text{ V}$  au rythme de la constante de temps.

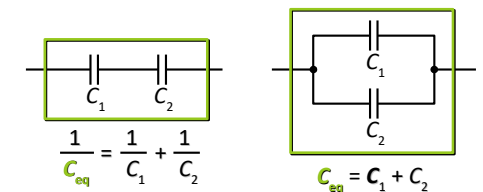


Les opérations de charge et de décharge relèvent l'une et comme l'autre d'un **régime continu transitoire**. Dans le régime permanent qui suit, aucun courant continu ne circule dans le condensateur, ce dernier se comportant comme une résistance infinie. La caractéristique statique d'un condensateur est donc sans intérêt ( $I = 0\text{ A}$ ).

En **régime alternatif**, les changements demi-périodiques de polarité d'une tension  $u$  engendrent dans le condensateur un courant  $i$  de charge-décharge alternatif (même si en réalité, aucun électron ne traverse le diélectrique). On observe que plus la période  $T$  de la tension  $u$  est grande devant la constante  $\tau$  du montage, plus l'amplitude du courant  $i$  est atténuée comparativement à celle de  $u$ . De plus, le courant  $i$  est en **avance de  $90^\circ$**  (i.e.  $T/4$ ) par rapport à la tension  $u$ .



■ Comme pour les résistors, on définit la notion de **capacité équivalente** pour l'association de condensateurs parfaits. Par application des lois de Kirchhoff, on montre que la capacité se cumule en parallèle et se divise en série, selon des formules exactement analogues à celles des résistors et généralisables à  $n$  composants.



■ Outre leur capacité, un **condensateur réel** est caractérisé par sa **tension de claquage**, i.e. la tension maximale qu'il peut supporter. Il en existe une grande variété, depuis les plus petits, aux formes diverses selon l'isolant qu'ils emploient (polyester, mylar, céramique...), aux plus gros, dits **électrolytiques** (ou **chimiques**), qui sont cylindriques.



**Attention** : un condensateur électrolytique ou au tantale est **polarisé**, l'une de ses bornes étant repérée « + » ou « - » (flèche) : toute tension de polarité inverse provoque sa destruction. Il est inapte au régime alternatif.

Les condensateurs trouvent de nombreuses applications dans les circuits comme :

- **lisser une tension redressée** dans le but de la rendre continue (cf. pont de Graetz, p. 10),
- **couper la composante continue** d'un signal (cf. cours, chap. 3.2, p. 4) ou en **filtrer certaines fréquences**,
- **rattraper le retard du courant** causé par des récepteurs inductifs (bobines),
- **stocker de l'énergie** (on parle alors de **super-condensateur**, car la technologie employée est différente).

38. Il existe d'autres variantes du symbole pour les condensateurs polarisés. Ce qui importe, c'est de bien distinguer les borne + et -.

39. Du nom du physicien et chimiste anglais du XIX<sup>e</sup>, Michael FARADAY. Les condensateurs usuels ont des capacités se chiffrant en  $\mu\text{F}$  et  $\text{nF}$ .



## IV. Mesures au multimètre

### IV.1 Présentation générale

Le **multimètre** est un instrument qui permet, selon le modèle, de mesurer **diverses valeurs** (moyenne, RMS, etc.)<sup>40</sup> d'un courant ou d'une tension selon le **régime** adopté ; en général, il peut aussi mesurer la **fréquence**. La plupart des modèles permettent aussi de mesurer la principale **caractéristique d'un composant** (résistance, capacité, etc.), à condition de mettre ce dernier « hors circuit ».

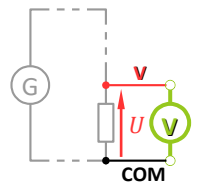
Portatifs (cf. photo ①) ou stationnaires ④, presque tous les multimètres sont aujourd'hui **numériques** et emploient un **capteur de tension**<sup>41</sup>. Mais il existe encore des modèles **analogiques** ③ basés sur le **galvanomètre**, un dispositif sensible au courant<sup>41</sup>. Moins commodes à l'usage (la lecture de la valeur doit tenir compte du calibre sélectionné), ils sont en revanche plus performants, à coût comparable, pour les hautes fréquences : alors qu'un multimètre numérique portatif usuel ne mesure des valeurs efficaces (RMS) qu'à des fréquences jusqu'à 1 ou 2 kHz, un modèle analogique peut monter à plus de 100 kHz.

La plupart des multimètres sont munis d'au moins **4 douilles de connexion sécurisée** : **COM** (commun), **V  $\Omega$  ...** pour les mesures de tension, de résistance..., **10 A** (parfois 20 A) et **mA** (200 ou 400 mA) pour les mesures d'intensité. Ces deux dernières entrées sont souvent (pas toujours) protégées par des fusibles. Les connexions se font avec des **cordons de mesure** ② rouges et noirs à très faible résistance, munis d'un côté d'une fiche de sécurité et de l'autre, d'une électrode spécifique : pointe de touche, pince crocodile, grip-fils, etc.

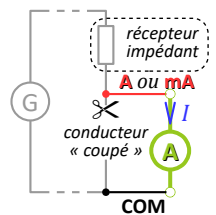


### IV.2 Mesures élémentaires

■ Une **tension** se mesure nécessairement **entre deux points de potentiels** d'un circuit. Réglé en position **voltmètre** (cf. symbole ci-contre) dans le régime ( $\sim$  ou  $\equiv$ )<sup>39</sup> et la gamme appropriée (**V** ou **mV**), le multimètre se branche **en dérivation** à ces deux points. Si la douille **COM** est sur le point de potentiel bas et la douille **V** sur le point de potentiel haut, la valeur est affichée positive. Les appareils numériques sont à calibration automatique (**auto-range**) dans la gamme sélectionnée, ce réglage pouvant être repris manuellement (touche **RANGE**).



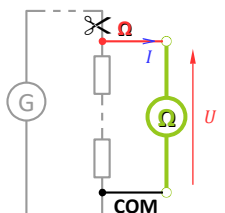
■ Avec les mêmes précautions de sélection (régime, gamme), un **courant** se mesure nécessairement **dans un conducteur** ; cela impose en principe de « **couper** » ce conducteur, i.e. en déconnecter une extrémité, pour y insérer **en série** le multimètre, en mode **ampèremètre**, à travers lequel le courant peut alors circuler pour être mesuré. Comme pour la mesure de tension, le régime et le calibre doivent être sélectionnés conformément aux attentes<sup>42</sup>. **Attention : l'ampèremètre ne doit jamais être en court-circuit avec le générateur, il faut un récepteur suffisamment impédant**<sup>43</sup> dans la branche de mesure.



Pour les courants supérieurs à 10 A ou pour éviter la « coupure » dans la branche à mesurer, on peut employer une **pince ampèremétrique** qui, placée autour d'un conducteur, mesure le courant qui le traverse (par induction en régime alternatif, par effet Hall en régime continu).



■ Une mesure de **résistance** ou de **continuité** s'effectue nécessairement **entre deux points d'un circuit** (en général, les extrémités d'une branche résistive) dont **au moins un est déconnecté** du circuit (sinon la mesure risque d'être faussée). Réglé en position **ohmmètre**, l'appareil fait circuler un faible courant dans la branche et simultanément, mesure sa tension. La résistance est calculée par le multimètre en appliquant la loi d'ohm. Une valeur infinie signifie que la branche présente une discontinuité électrique.



De façon similaire, certains multimètres permettent de mesurer d'autres caractéristiques de composants (capacité d'un condensateur, tension de seuil d'une diode).

40. Ces possibilités seront revues en détail dans le chapitre 3.2 du cours (signaux et flux électriques).

41. Les modèles numériques sont donc fondamentalement des voltmètres, alors que les appareils analogiques sont des ampèremètres.

42. Avant de sélectionner le calibre mA, il vaut mieux d'abord vérifier l'ordre de grandeur de la valeur du courant avec le calibre 10 A.

43. L'impédance (du latin *impedire*, i.e. « empêcher ») est la généralisation de la notion de résistance en régime sinusoïdal alternatif.