

Cours 2. Formalismes de l'électronique. Circuits de courant continu.

Par Dimitri GALAYKO
Unité d'enseignement Élec-info
pour master ACSI à l'UPMC

Octobre-décembre 2005

1 Éléments idéaux de l'électronique.

Après avoir survolé les propriétés du champ électrique, nous pouvons enfin aborder le cœur du sujet de ce module : l'électronique.

L'électronique est une discipline appliquée, à la différence de l'électricité qui est une branche de la physique fondamentale et qui répond surtout à la question « pourquoi » et « de quelle manière ». L'électronique s'intéresse avant tout à la question « comment faire » ; elle utilise les phénomènes électriques pour créer des systèmes artificiels (technogènes). Cependant, il existe d'autres disciplines techniques liées à l'électricité, par exemple l'électrotechnique dont l'objet est différent de celui de l'électronique.

De notre point de vue, la distinction caractéristique de l'électronique peut se résumer en phrase suivante :

L'électronique s'intéresse aux systèmes qui utilisent les phénomènes électriques pour le traitement de l'information au sens le plus large.

Cette vision de la discipline est développée sur la page *Électronique* de Wikipedia francophone (Encyclopédie libre en ligne, www.wikipedia.fr).

De même que les théories physiques s'appuient sur les *modèles*, l'électronique traite des *éléments idéalisés*. Pour l'illustrer, prenons l'exemple du résistor. Pour l'électricité fondamentale, un résistor est un conducteur, un corps physique réagissant à toutes les sollicitations de l'environnement (la température, l'humidité, la pression...) et manifestant sa nature physique d'une manière intégrale. Il possède, évidemment, une résistance électrique, mais aussi une

capacité (par rapport à l'infini et par rapport aux conducteurs environnants), une inductance (que nous étudierons plus tard) etc...

Cependant, pour l'électronique, seul compte le fait qu'il puisse laisser passer un courant. Du moins au premier abord, l'électronique ne s'intéresse pas aux autres phénomènes associés. C'est légitime, car un résistor en électronique n'est pas un conducteur abstrait, mais un composant artificiel conçu et fabriqué pour être utilisé dans un contexte où la conductance électrique domine ses autres propriétés.

Ainsi, en électronique, un résistor réel est interprété comme un conducteur manifestant seulement une résistance électrique de valeur donnée. On parle ainsi d'un *résistor parfait*.

Comme toute science, l'électronique a ses définitions et ses axiomes que nous présentons dans ce paragraphe.

1.1 Conducteurs électriques

L'électronique énonce l'existence de conducteurs parfaits. La physique d'un conducteur parfait a été décrite dans le cours précédent. Cependant, l'électronique se situe à un niveau hiérarchique plus élevé et s'intéresse peu à la physique des phénomènes. Elle considère tout simplement qu'*un conducteur parfait est un conducteur ayant une résistance électrique nulle*.

De cette définition il suit qu'aucune différence de potentiel (tension électrique) ne peut exister entre deux points d'un conducteur parfait — sinon l'intensité du courant deviendrait infinie.

L'électronique ne s'intéresse pas non plus au caractère et au type des charges libres qui se trouvent à l'intérieur d'un conducteur. Implicitement, elle considère qu'*un conducteur parfait possède aussi bien des charges positives que négatives pouvant se déplacer librement*. En effet, bien que dans les métaux seules les charges négatives soient responsables de la conductivité, cette vision est justifiée : on peut toujours représenter un déplacement de charges négatives par un déplacement opposé des charges positives de la même valeur absolue.

Le courant électrique est un mouvement ordonné des charges au sein d'un conducteur.

Les conducteurs relient les éléments idéaux afin d'autoriser le passage d'un courant et afin de « copier » le potentiel produit par un élément sur un autre. Notez que la forme géométrique d'un conducteur n'a pas d'importance, le principal est d'avoir un conducteur solide sans ruptures. Ainsi, les conducteurs sont toujours représentés par des fils.

Deux notions sous-jacentes sont relatives aux conducteurs : celle du circuit ouvert et celle du court-circuit.

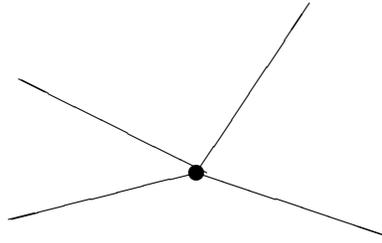


FIG. 1 – Plusieurs conducteurs formant un nœud électrique.



FIG. 2 – Court-circuit (a) et circuit ouvert (b).

On dit qu'entre deux nœuds il y a un court-circuit lorsque ces nœuds sont reliés par un conducteur parfait.

Un élément présentant un court-circuit se comporte comme un fil (figure 2a). Sa résistance est alors nulle.

On dit qu'il y a un circuit ouvert entre deux nœuds s'il n'existe pas de chemin pour un passage de courant.

Un élément présentant un circuit ouvert possède juste deux bornes isolées l'une de l'autre (figure 2b). Sa résistance est alors infinie.

Ces éléments peuvent paraître inutiles ; cependant, beaucoup de composants électriques fonctionnent dans des régimes où ils sont équivalents soit à l'un, soit à l'autre. Ainsi, ces notions sont très pratiques pour la description et pour l'analyse. Par exemple, un switch est un court-circuit en état fermé (*on*) et un circuit ouvert en état ouvert (*off*) - *cf.* figure 3. Nous utiliserons ces notions lors de l'analyse des transistors, des diodes, etc.



FIG. 3 – Switch à l'état ouvert (circuit ouvert) et fermé (court-circuit).

1.2 Résistor

Un résistor électrique parfait a été défini plus haut : c'est un élément électrique dipôle¹ qui manifeste une relation linéaire entre le courant et la tension à ses bornes :

$$U = RI \quad (1)$$

On l'appelle couramment « résistance », même si cela prête à confusion, car désigne également la propriété incarnée par cet élément.

Nous profitons de cette présentation du résistor pour montrer comment on désigne les tensions et les courants sur un schéma électrique. La tension entre deux points (nœuds) est représentée par une flèche dirigée vers le point à potentiel le plus élevé. Le courant est représenté par une flèche dessinée sur le conducteur par lequel il passe. Cette flèche indique le sens de mouvement des charges positives. Ainsi, dans le cas de la résistance, les charges positives se dirigent du potentiel élevé vers le potentiel plus bas (fig. 4). Plus d'information sur les sens positifs conventionnels des courants et des tensions sera donné au sous-paragraphe 2.3.

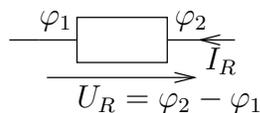


FIG. 4 – Symbole du résistor et convention sur le sens du courant et de la tension.

1.3 Condensateur idéal

Un condensateur idéal est un dipôle qui incarne la capacité électrique entre deux conducteurs. Le symbole du condensateur est donné figure 5. Sa

¹En électronique, un dipôle est un élément électrique qui possède deux bornes de connexion. Par analogie, on parle d'un quadripôle et plus rarement d'un tripôle.

tension est proportionnelle à la charge non-compensée sur chacune de ses électrodes :

$$Q = CU \quad (2)$$

Chaque électrode possède une charge de valeur absolue identique mais de signes opposés. La charge peut également être nulle, le condensateur est alors dit « déchargé ».

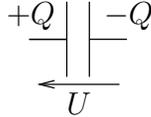


FIG. 5 – Symbole du condensateur.

La tension aux bornes d'un condensateur est désignée par une flèche. De même que pour un résistor, cette flèche indique le sens d'accroissement du potentiel : de l'électrode chargée négativement vers celle chargée positivement.

1.4 Source de tension

Une source de tension est un élément dipôle qui fixe une tension entre ses bornes. Cette tension ne dépend pas du courant qui traverse la source.

$$E = \text{const} \forall I \quad (3)$$

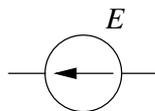


FIG. 6 – Symbole de source de tension

Notons qu'une tension générée par une source de tension est souvent désignée par la lettre e , alors qu'en général une tension est appelée u ou v . Ceci vient de la distinction que font les physiciens entre la tension générée par une source et sa *force électromotrice* [1]. La lettre e vient alors de l'expression anglaise *electromotric force*. En électronique on préfère utiliser la tension, cependant, en conservant par tradition l'appellation e .

Le sens positif de la tension générée par une source est indiqué par la flèche à l'intérieur de son symbole (figure 6). *Le courant dans la source est défini par les éléments extérieurs.*

Un dipôle court-circuit (sous-paragraphe 1.1) est une source de tension le plus élémentaire : quelque soit son courant, sa tension est toujours nulle.

1.5 Source de courant

Une source de courant est un élément dipôle qui impose un courant au circuit connecté à ses deux bornes. Ce courant ne dépend pas de la tension sur la source.

$$I = \text{const} \forall U \quad (4)$$

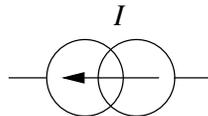


FIG. 7 – Symbole de la source de courant.

Le sens du courant généré est indiqué par la flèche du symbole. *La tension aux bornes de la source est définie par les circuits extérieurs.*

Un dipôle circuit ouvert (sous-paragraphe 1.1) est une source de courant d'intensité nulle.

2 Analyse des circuits électriques de courant continu

Après avoir défini les éléments idéaux, nous pouvons les réunir en *circuits électriques*. Dans les deux prochains cours nous allons nous intéresser aux circuits dont les sources d'énergie fournissent des courants et des tensions constants dans le temps. De tels circuits s'appellent *circuits de courant continu*.

Le problème essentiel de l'électronique consiste à trouver tous les courants et les tensions d'un circuit. Avant de présenter des exemples de circuits, nous proposons d'introduire deux lois fondamentales auxquelles obéit le fonctionnement de tous les circuits électriques.

2.1 Loi des nœuds

Un nœud de circuit est un point auquel se connectent plusieurs éléments et éventuellement, vers lequel arrivent plusieurs courants.

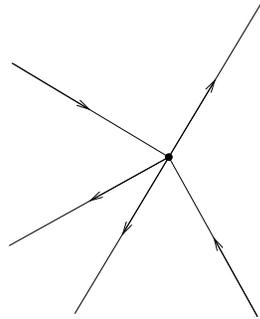


FIG. 8 – Nœud de circuit.

La loi des nœuds est formulée de la façon suivante :

La somme des courants entrant dans un nœud est égale à la somme des courants sortant du nœud.

Ainsi, le bilan des courants entrant dans un nœud (ou sortant d'un nœud) est toujours nul. Voici l'expression mathématique de cette règle :

La somme de tous les courants associés à un nœud est nulle si l'on prend positifs les courants entrants et négatifs les courants sortants^a :

$$\sum_i I_i = 0. \quad (5)$$

^aC'est une convention communément adoptée ; évidemment, elle peut être inversée sans préjudice, à condition, toutefois, d'être clairement énoncée.

La loi des nœuds est tout simplement une conséquence de la loi de conservation des charges : s'il n'y avait pas d'équilibre entre les courants entrants et sortants, un nœud accumulerait une charge non-compensée dont la quantité ne cesserait de croître. Ceci contredirait l'hypothèse sur l'équilibre du circuit.

La loi des nœuds impose également la continuité d'un courant. Si l'on imagine une surface fermée, le bilan des courants entrants et sortants est toujours nul, sauf s'il y a une accumulation des charges à l'intérieur de la surface. Un courant ne peut donc pas s'interrompre.

2.2 Loi des mailles

Une maille de circuit est un chemin fermé entre plusieurs points (nœuds) du circuit (figure 9).

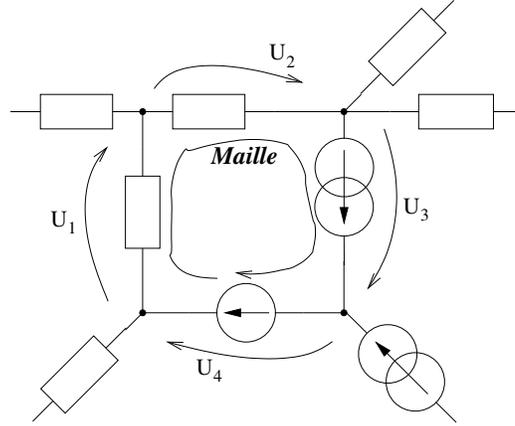


FIG. 9 – Maille d'un circuit.

La loi des mailles s'exprime ainsi :

la somme des tensions mesurées le long d'un chemin fermé (maille) est nulle.

Cette loi suppose que toutes les tensions sont *mesurées* de la même façon, par exemple, de l'aval vers l'amont du chemin de parcours ou dans le sens inverse. Ainsi, pour la figure 9, nous avons :

$$U_1 + U_2 + U_3 + U_4 = 0. \quad (6)$$

Remarquez, que peu importe comment sont orientées les flèches désignant les tensions d'une maille (i.e. le signe des tensions) : si elles n'indiquent pas toutes vers la même direction par rapport au parcours, on prend certaines tensions négatives. Ainsi, pour le circuit de la figure 10,

$$-U_1 - U_2 + U_3 + U_4 - U_5 + U_6 = 0. \quad (7)$$

2.3 Sens positif conventionnel des courants et des tensions

Implicitement, la notion du sens conventionnel positif a déjà été utilisée. L'idée est de définir, avant l'analyse, la façon de « mesurer » le signe des

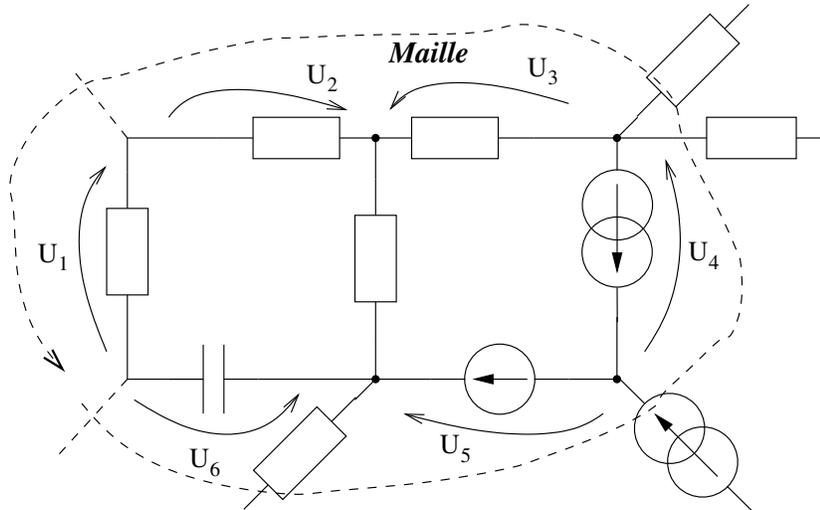


FIG. 10 – Maille plus complexe d'un circuit. Toutes les tensions ne sont pas définies dans le même sens par rapport au sens du parcours.

tensions et des courants. En soi un courant n'a pas de signe, il a juste le sens d'écoulement, c'est l'observateur qui définit quelle direction correspond à quel signe. Il en est de même pour une tension : c'est l'observateur qui choisit comment il mesure la tension entre, par exemple, les nœuds 1 et 2 : $\varphi_2 - \varphi_1$ ou $\varphi_1 - \varphi_2$.

Noter que cette définition n'est rien d'autre qu'une règle de mesure, elle ne renseigne aucunement sur le sens *réel* des grandeurs. En effet, mesurés ainsi, les tensions et les courants peuvent être positifs ou négatifs.

On appelle ces définitions *sens conventionnels positifs*. Sur les schéma elles sont indiquées par des flèches. *Ces flèches indiquent le sens réel au cas où la valeur réelle de la grandeur est positive.*

Donc,

les sens conventionnels positifs des courants et des tensions sont choisis arbitrairement.

Cependant, certains éléments utilisent leur propre convention sur les sens relatifs des courant et des tensions. Elle doit alors être utilisée. Ainsi, par exemple, nous avons postulé que le courant d'une résistance coule dans le sens de décroissement du potentiel (figure 4)². Nous devons donc appliquer cette convention à tous les résistors du circuit. Néanmoins, le choix du sens positif d'une des deux grandeurs associées à un résistor reste arbitraire.

²Remarquez que cette convention est basée sur la physique d'un résistor. Or formellement elle est toute aussi arbitraire et aurait pu être inversée, cependant, au prix d'une perte du « lien » avec la réalité physique.

2.4 Question de la topologie...

Dans ce sous-paragraphe nous évoquons quelques topologies tellement fréquentes dans le monde des circuits que l'on leur a attribué des noms à part.

2.4.1 Connexion série

Les éléments dipôles (i.e. à deux terminaisons) parcourus par un même courant sont dits connectés en série (figure 11).

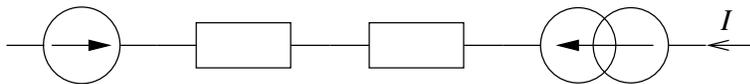


FIG. 11 – Éléments connectés en série.

Il existe une interdiction associée aux sources de courant :

On n'a pas le droit de connecter en série les sources de courant, sauf s'elles génèrent des courants de même intensité.

En effet, par définition, une branche en série est traversée par un seul courant, or, chaque source essaye d'imposer le sien.

Physiquement on comprend la contradiction en faisant le bilan des charges du nœud auquel sont reliées deux sources de courant (figure 12) : en supposant que $I_1 < I_2$, le bilan est positif à chaque instant, la charge du nœud ne cesse de croître en tendant vers l'infini. Vu que la quantité totale des charges dans le circuit est constante, quelque part ailleurs se produit une accumulation illimitée des charges négatives. Ainsi, cette « megapolarisation » finit par créer une tension infinie aux bornes des sources...

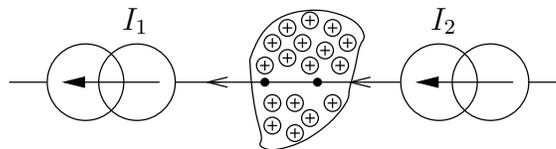


FIG. 12 – Deux sources de courant raccordées en série

Ajoutons, que le circuit de la figure 12 ne vérifie pas la loi des nœuds.

D'où une conséquence pratique importante : *il est interdit de raccorder une source de courant à un circuit ouvert, i.e., laisser ses bornes « en l'air ».*

2.4.2 Connexion parallèle

Les éléments partageant les mêmes potentiels à ses bornes sont dits connectés en parallèle (figure 13a).

Notez qu'une connexion parallèle est possible pas seulement avec les dipôles (figure 13b).

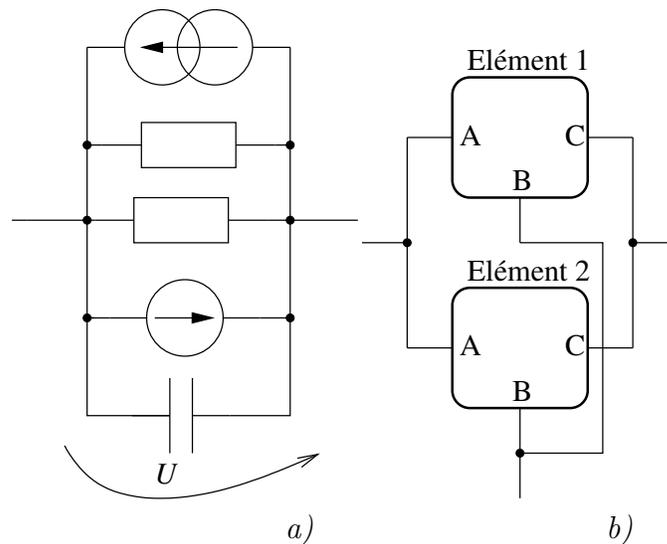


FIG. 13 – Éléments connectés en parallèle : a) des dipôles, b) des éléments à trois terminaisons.

Il existe une interdiction associée aux sources de tension :

on n'a pas le droit de mettre deux sources de tension en parallèle, sauf si elles génèrent les mêmes tensions.

Pourquoi cette interdiction ? En fait, les dipôles connectés en parallèle sont sous la même tension, or les sources imposent, par définition, des tensions différentes. On arrive à une contradiction.

Noter qu'un court-circuit d'une source de tension est un cas particulier d'une association parallèle de deux sources de tension.

Le court-circuit d'une source de tension est une situation *accidentelle* qui peut se produire dans un système réel. Que se passe-t-il alors ? Le conducteur qui court-circuite la source se voit appliquer la tension de la source. Vu que sa résistance est nulle (en pratique, très faible), l'intensité du courant qui en résulte est infinie (en pratique, très grande). Ce courant traverse *et* le conducteur, *et* la source. Cela conduit à un échauffement et/ou à une destruction de tout le circuit ou de sa partie la plus « faible ». Donc, en

concevant les systèmes réels, on prévoit des dispositifs qui protègent contre les court-circuits et qui permettent de limiter les dégats au cas où un court-circuit se produirait (fusibles, disjoncteurs...).

2.4.3 Connexion en étoile

On parle un peu plus rarement de la connexion « étoile » (figure 14).

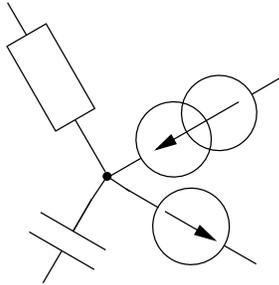


FIG. 14 – Éléments connectés en étoile.

3 Circuits résistifs

Il s'agit des circuits composés de résistors et de sources de tension ou de courant. Un résistor étant un élément linéaire, les circuits résistifs sont des circuits linéaires. De tels circuits se prêtent particulièrement bien à l'analyse³ ; on a même tendance à vouloir représenter tout circuit par son modèle linéaire, *i.e. linéariser un circuit*. Les circuits linéaires obéissent au très important *principe de superposition* que nous allons étudier ultérieurement. Dans ce paragraphe nous présentons plusieurs circuits résistifs rangés dans l'ordre de difficulté croissante.

3.1 Circuits résistifs élémentaires

Considérons tout d'abord un circuit élémentaire composé d'un seul résistor et d'une seule source de tension (figure 15). Comment calculer les courants et les tensions relatifs à ces deux éléments ?

Tout d'abord nous choisissons, d'une manière arbitraire, les sens positifs conventionnels des courants dans les deux branches (figure 15).

³Car les équations décrivant leur comportement sont linéaires et donc simples à résoudre.

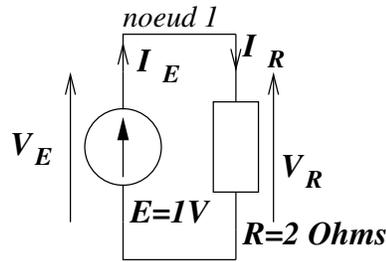


FIG. 15 – Circuit élémentaire contenant une source de courant et un résistor.

On sait que la source de tension génère une tension de 1 V : cette tension se trouve donc aux bornes du résistor. Nous pouvons calculer l'intensité du courant circulant dans le résistor :

$$I_R = \frac{E}{R} = \frac{1V}{2\Omega} = 0.5A. \quad (8)$$

Comment connaître l'intensité de courant dans la source de tension ? Pour cela, considérons un des nœuds du circuit, par exemple, le nœud 1. En y appliquant la loi des nœuds, nous avons :

$$I_E - I_R = 0, \quad (9)$$

d'où

$$I_R = I_E. \quad (10)$$

Ainsi, on peut dire que dans ce circuit *un seul courant circule*. Ceci est très cohérent avec sa topologie : le circuit est une simple boucle donc un seul flux de charges peut exister.

Notez que dans ce circuit élémentaire, les deux éléments sont connectés à la fois en parallèle et en série. Ceci implique une identité des courants et des tensions sur les éléments.

Nous proposons au lecteur de trouver les tensions et les courants dans un circuit analogue utilisant une source de courant au lieu d'une source de tension (figure 16).

3.2 Résistance équivalente.

Soit une source de tension ou de courant connectée aux nœuds A et B d'un circuit composé uniquement des résistances (figure 17a).

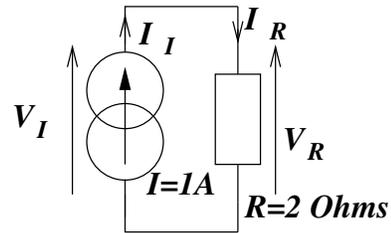


FIG. 16 – Circuit élémentaire contenant une source de courant et un résistor.

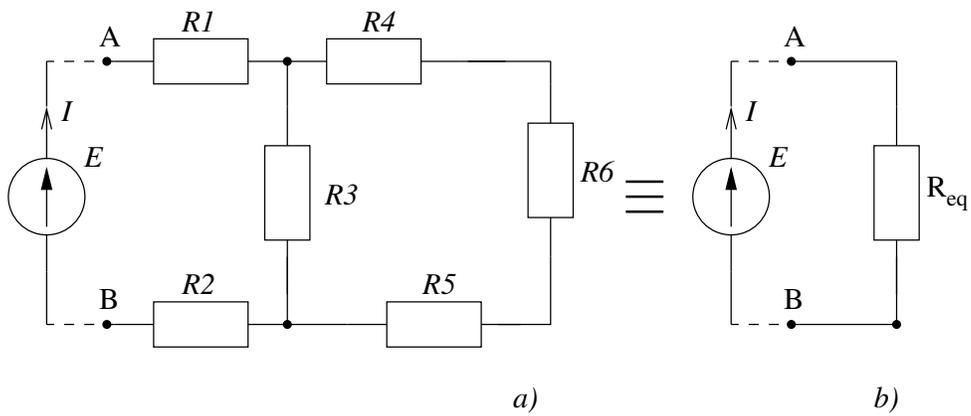


FIG. 17 – Circuit résistif complexe.

Il est possible de démontrer, que la relation entre le courant et la tension associés à cette source est linéaire quelque soit la complexité du circuit résistif :

$$E = \alpha I. \quad (11)$$

Ainsi, la source perçoit le circuit comme un seul résistor avec résistance α . On dit alors, qu'entre les nœuds A et B , le circuit présente une résistance équivalente $R_{eq} = \alpha$ (figure 17b). Si l'on ne s'intéresse qu'au régime de la source, nous pouvons négliger la structure du circuit en la modélisant par un seul résistor. Cette manipulation est très fréquente en électronique : on incorpore (ou « encapsule », comme en programmation) un module complexe dans une boîte noire qui, vue de l'extérieur, présente les mêmes propriétés que le circuit original. Nous aborderons cette approche plus en détail lors de l'étude des circuits actifs complexes.

Nous proposons de calculer la résistance équivalente de deux résistors connectés en série.

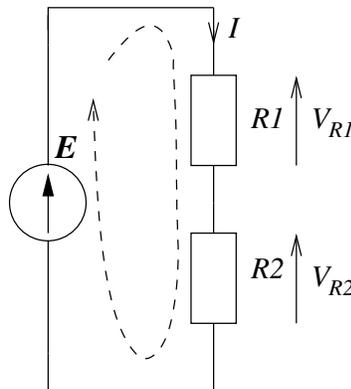


FIG. 18 – Deux résistors connectés en série.

Pour cela, supposons que ce circuit est raccordé à une source de tension, et trouvons la relation U/I pour cette source (figure 18). La tension E est générée par la source, c'est alors le courant I qu'il faut calculer. Le circuit est composé d'une seule maille, ce qui suggère une application de la loi des mailles. Après avoir fixé le sens du parcours, nous obtenons :

$$E - V_{R1} - V_{R2} = 0. \quad (12)$$

Tous les éléments sont connectés en série, donc un seul courant d'intensité I circule dans le circuit :

$$E - IR_1 - IR_2 = 0. \quad (13)$$

Ainsi, on en déduit :

$$R_{eq} = \frac{E}{I} = R_1 + R_2, \quad (14)$$

i.e. en associant les résistors en série, leurs résistances s'additionnent.

Calculons maintenant la résistance équivalente de deux résistors connectés en parallèle (figure 19).

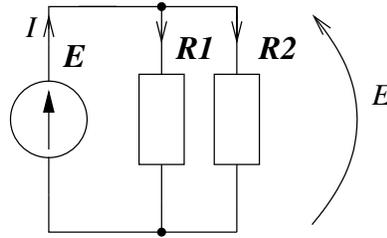


FIG. 19 – Résistors parallèles.

Trouvons le courant dans la source de tension connectée à ce circuit. Pour cela, appliquons la loi des nœuds à un des nœuds du circuit :

$$I = I_{R1} + I_{R2} = \frac{E}{R_1} + \frac{E}{R_2}. \quad (15)$$

Nous arrivons à :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{I}{E} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (16)$$

Ainsi, pour des résistors connectés en parallèle, l'inverse de la résistance équivalente est égale à la somme des valeurs inverses des résistances individuelles.

Pour deux résistors en parallèle, la résistance équivalente s'exprime comme

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (17)$$

Pour trois résistors et plus l'expression devient complexe. Afin de simplifier l'écriture, les électroniciens ont introduit une opération mathématique

« résistance parallèle équivalente » qui s'écrit '||'. Ainsi, $R_1||R_2||R_3\dots$ exprime la résistance équivalente de l'association parallèle de tous ces résistors.

Notez, que pour calculer la conductance équivalente (*cf.* le cours 1), il suffit d'additionner les conductances des résistors parallèles :

$$Y_{eq} = Y_1 + Y_2 \quad (18)$$

Nous laissons le lecteur trouver la démonstration de ce théorème.

3.3 Diviseur de tension

Considérons le circuit de la figure 18. Calculons la tension sur chacun des résistors R_1 et R_2 . Ils sont parcourus par le même courant que l'on peut calculer sachant que R_1 et R_2 sont connectés en série :

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2}. \quad (19)$$

Ainsi, les tensions sur les résistors valent :

$$U_{R1} = IR_1 = E \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad (20)$$

$$U_{R2} = IR_2 = E \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (21)$$

Sur chacun des résistors nous obtenons *une tension de la tension E , la somme des fractions étant égale à E* . Pour cette raison, ce circuit s'appelle *diviseur de tension*. La branche de division peut contenir plusieurs résistors (*cf.* figure 20).

3.4 Circuit résistif complexe : étude de cas

Nous proposons maintenant d'analyser un circuit résistif complexe, composé de plusieurs résistors et sources d'énergie comme, par exemple, celui présenté figure 21.

Sur cet exemple nous introduisons toutes les étapes de l'analyse d'un circuit.

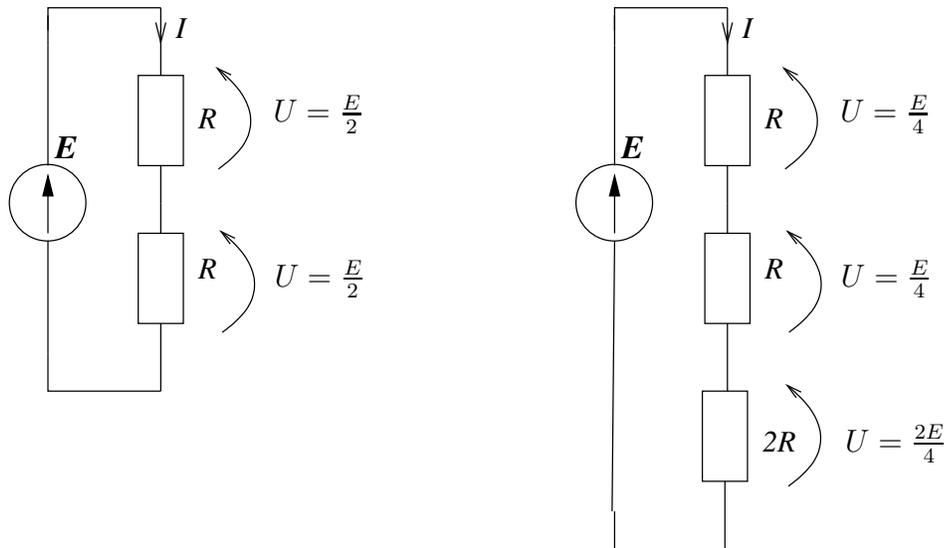


FIG. 20 – Exemples de diviseur de tension : à deux résistors identiques, à trois résistors.

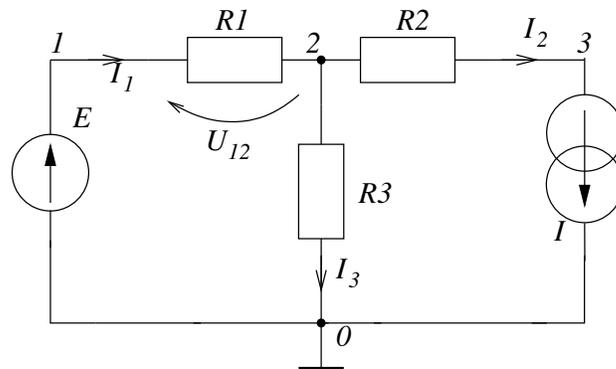


FIG. 21 – Circuit résistif complexe.

3.4.1 Choix de la référence (masse)

Tout d'abord, dans un circuit complexe, on définit le nœud de référence pour la mesure des potentiels (*cf.* le cours 1 et aussi le sous-paragraphe suivant). Rappelons, que *ce choix est arbitraire et n'a pas d'incidence sur le résultat*. Par contre, il peut exister des considérations pratiques faisant préférer certains nœuds. Par exemple, *on choisit pour la référence le nœud qui réunit le plus grand nombre de connexions*. Dans la plupart des cas pratiques c'est une des bornes des sources d'alimentation du système.

Le nœud de référence s'appelle « masse » ou « terre ». Le plus souvent il est désigné sur le schéma par le symbole « T » inversé (figure 22).



FIG. 22 – Différents symboles représentant le nœud de référence, autrement appelé « masse » ou (plus rarement) « terre ».

Rappelons que l'on peut attribuer au nœud de référence un potentiel fixe arbitraire. Pour les raisons pratiques évidentes, on pose le potentiel de référence nul.

Nous choisissons donc le nœud 0 pour être le nœud de référence de notre circuit.

3.4.2 Désignation des tensions

Nous distinguerons deux types de tensions : les tensions *nodales* et les tensions *flottantes*. Les tensions nodales sont les tensions entre un nœud du circuit et la masse, *i.e.* référencées par rapport à la masse. C'est donc le *potentiel* d'un nœud. L'indice indique le numéro du nœud (ex. U_1).

L'adjectif « flottant » spécifie une tension mesurée entre deux nœuds, *i.e.* référencées par rapport à un autre nœud que la masse. Dans ce cas l'indice inclut les numéros des deux nœuds (ex. U_{12}). Une tension U_{ij} est positive si le potentiel croît du second nœud (j) au premier (i), comme indiqué figure 21 :

$$U_{ij} = \varphi_i - \varphi_j. \quad (22)$$

3.4.3 Résolution du circuit

Tout d'abord, nous définissons les sens conventionnels positifs des courants dans toutes les branches du circuit. En tout, il y a trois courants différents. Notez, que l'on n'a pas besoin de préciser les sens conventionnels positifs des tensions sur les résistors, car ils découlent de ceux définis pour les courants (*cf.* le sous-paragraphe 1.2).

En appliquant la loi des nœuds au nœud 2, nous obtenons l'équation suivante :

$$I_1 = I_2 + I_3. \quad (23)$$

Cependant, nous connaissons déjà le courant I_2 : il est imposé par la source de courant I, son intensité est alors égale à I . Or nous avons une équation avec deux inconnues. Il nous faut donc une deuxième équation...

Pour cela appliquons la loi des mailles à la maille E-R1-R3. En la parcourant dans le sens des aiguilles de montre (par exemple), nous avons :

$$U_{10} + U_{21} + U_{02} = 0, \quad (24)$$

où

$$U_{10} = E, \quad U_{21} = -U_{R1}, \quad U_{02} = -U_{R3}. \quad (25)$$

On en obtient,

$$E - R_1 I_1 - R_3 I_3 = 0. \quad (26)$$

Les équations (23) et (26) forment un système de deux équations à deux inconnues permettant de déterminer les courants I_1 et I_2 . Connaissant les courants, il est possible de calculer les tensions sur les résistors. Pour les tensions nodales nous avons :

$$U_1 = E, \quad U_2 = U_{R3} = I_3 R_3. \quad (27)$$

La tension du nœud 3, *i.e.* la tension sur la source de courant, ne peut pas être déduite à partir des informations sur cette source. Ce sont les circuits environnants qui la fixent. Ainsi, on calcule

$$V_3 = V_{32} + V_{20} = -V_{R2} + V_{R3} = I_3 R_3 - I_2 R_2. \quad (28)$$

3.5 Principe de superposition

Les circuits résistifs étant linéaires, obéissent au théorème suivant que nous donnons sans démonstration :

Tous les courants et les tensions d'un circuit électrique linéaire appartiennent à l'espace défini par les sources d'énergie indépendantes, i.e. sources de courant et de tension :

$$\{I \text{ ou } U\} = \sum_{\substack{\text{toutes les ST} \\ \text{indépendantes}}} \alpha_i E_i + \sum_{\substack{\text{toutes les SC} \\ \text{indépendantes}}} \beta_j I_j. \quad (29)$$

Tous les courants et les tensions d'un circuit sont donc des *combinaisons linéaires* des tensions et des courants générés par les sources indépendantes⁴. Les coefficients α_i et β_j dépendent de la topologie du circuit et des valeurs des résistances le constituant.

Le principe de superposition, primordial pour l'analyse des circuits linéaires, découle directement de ce théorème :

pour les circuits linéaires, l'effet conjoint de plusieurs sources d'énergie (courants ou tensions) est égale à la somme algébrique des effets réalisés séparément par chaque source, les autres étant éteintes.

Ici, sous le terme « effet » nous entendons tout tension ou courant qui s'établit dans un circuit suite à l'application d'une source d'énergie.

Rappelons, qu'éteindre les sources n'est pas tout à fait la même chose que supprimer les sources. *Lorsque l'on éteint une source de tension, on la remplace par un fil (un court-circuit), tandis qu'éteindre une source de courant équivaut à la remplacer par un circuit ouvert, i.e., à la retirer du circuit.*

Montrons comment appliquer ce principe à l'analyse du circuit figure 21. Calculons d'abord les tensions et les courants du circuit produits par la source de courant I (on les désignera par un exposant ^I). Pour cela éteignons la source de tension E en la remplaçant par un court-circuit (figure 23a).

L'analyse de ce circuit est simple si l'on utilise les connaissances sur les circuits résistifs élémentaires. Les résistors R1 et R3 sont connectés en parallèle. En les remplaçant par leur résistance équivalente $R_1 || R_3$, nous obtenons un circuit équivalent simplifié (figure 23b). Remarquez, que nous avons orienté (toujours arbitrairement) le courant du résistor $R_1 || R_3$ vers le nœud de référence. Alors, son intensité est égale à $I_3^I - I_1^I$ (car le courant I_3^I est

⁴Ce sont les sources dont les tensions ou les courants sont indépendants de la réaction du circuit. Par opposition, une source contrôlée est celle dont la tension ou le courant sont contrôlés par une tension ou un courant mesurés dans le circuit.

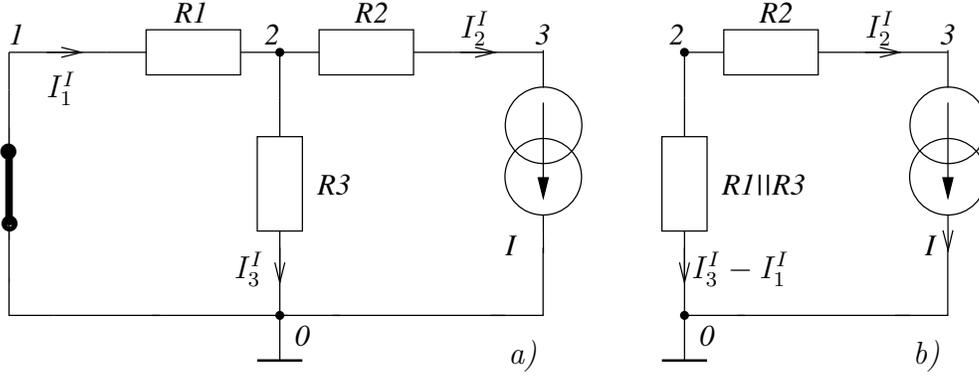


FIG. 23 – Méthode de superposition : circuit avec seulement la source de courant.

orienté dans le même sens, le courant I_1^I dans le sens opposé). Or, vu que les dipôles $R1||R3$, $R2$ et I sont connectés en série, ils sont parcourus par le même courant — celui généré par la source, d'intensité I :

$$I_3^I - I_1^I = -I_2^I = -I. \quad (30)$$

Sachant que la tension U_2 est égale à la tension sur le résistor $R1||R3$, nous avons :

$$U_2^I = U_{R1||R3} = -I \cdot R1||R3 \quad (31)$$

Puisque les circuits des figures 23a et 23b sont équivalents, les tensions U_2^I correspondantes sont identiques. Ainsi, connaissant U_2^I pour le circuit original, nous pouvons déduire les courants I_1^I et I_3^I des résistors $R1$ et $R3$.

$$I_1^I = \frac{-U_2^I}{R1}, I_3^I = \frac{U_2^I}{R3}. \quad (32)$$

Calculons maintenant l'apport de la source de tension E . Pour cela éteignons la source de courant I , *i.e.* remplaçons la par un circuit ouvert (figure 24).

Le circuit obtenu est très simple. Remarquez que le résistor $R2$ est connecté au circuit par une seule borne, l'autre étant « à l'air ». Cela veut dire que son courant est nul donc sa tension est nulle aussi. Puisque son courant est nul, la présence de ce résistor n'affecte pas les tensions et les courants du circuit auquel il est connecté. Nous pouvons donc analyser le circuit de la figure 24 comme si ce résistor était absent.

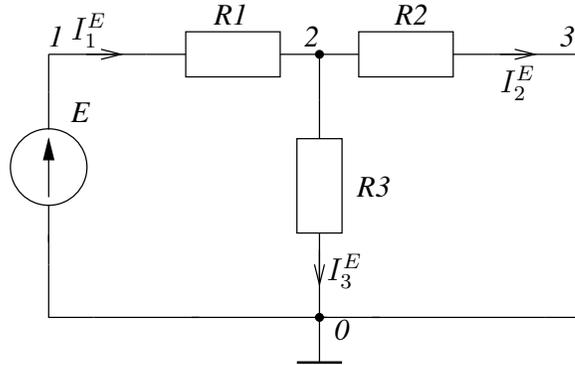


FIG. 24 – Méthode de superposition : circuit avec la seule source de tension.

Le circuit est alors trivial. Les deux résistors $R1$ et $R3$ sont connectés en série, nous obtenons alors pour les courants :

$$I_1^E = I_3^E = \frac{E}{R_1 + R_3}. \quad (33)$$

D'où pour la tension U_2^E :

$$U_2^E = V_{R3}^E = R_3 I_3^E. \quad (34)$$

La tension U_3^E est égale à U_2^E , vu que la tension sur $R2$ est nulle.

Pour connaître les tensions et les courants générés conjointement par les deux sources E et I , il faut additionner les grandeurs correspondantes, par exemple $U_2 = U_2^I + U_2^E$. Nous laissons au lecteur le souci de vérifier que les résultats sont conformes aux expressions obtenues par la méthode directe.