

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
D'ORAN MOHAMED BOUDIAF

FACULTÉ DE GÉNIE ELECTRIQUE

DÉPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة العلوم والتكنولوجيا بهران محمد بوضياف

كلية الهندسة الكهربائية

قسم الإلكترونيك

Cours

Electronique Fondamentale 1

2^{ème} année ELECTRONIQUE Licence

Cours préparé par :

Mme LEKHAL-MAZOUZ.N

Semestre : S3

UEF 2.1.2

Matière 1 : Electronique fondamentale 1 (VHS: 45h00, Cours : 1h30, TD : 1h30)

Objectif de l'enseignement :

Expliquer le calcul, l'analyse et l'interprétation des circuits électroniques. Connaitre les propriétés, les modèles électriques et les caractéristiques des composants électroniques : diodes, transistors bipolaires et amplificateurs opérationnels.

Connaissances préalables recommandées

Notions de physique des matériaux et d'électricité fondamentale.

Contenu de la matière :

Chapitre 1 – Régime continu et Théorèmes fondamentaux : 3 semaines

Définitions (dipôle, branche, nœud, maille), générateurs de tension et de courant (idéal, réel), relations tension-courant (R, L, C), diviseur de tension, diviseur de courant.

Théorèmes fondamentaux : superposition, Thévenin, Norton, Millmann, Kennelly, Equivalence entre Thévenin et Norton, Théorème du transfert maximal de puissance.

Chapitre 2 - Quadripôles passifs : 3 semaines

Représentation d'un réseau passif par un quadripôle. Matrices d'un quadripôle, associations de quadripôles. Grandeurs caractérisant le comportement d'un quadripôle dans un montage (impédance d'entrée et de sortie, gain en tension et en courant), application à l'adaptation. Filtres passifs (passe-bas, passe-haut, ...), Diagramme de

Bode, Courbe de gain, Courbe de phase, Fréquence de coupure, Bande passante.

Chapitre 3 - Diodes : 3 semaines

3.1 Rappels élémentaires sur la physique des semi-conducteurs : Définition et structure atomique d'un semi-conducteur. Si cristallin, Si polycristallin, Notion de dopage, Semi-conducteurs N et P, Bandes d'énergie, Jonction PN, Barrière de potentiel.

3.2 Théorie de la diode : Constitution et fonctionnement d'une diode, polarisations directe et inverse, caractéristique courant-tension, régime statique et variable.

Résistance différentielle (ou dynamique), Schéma équivalent.

3.3 Les applications des diodes : Redressement simple et double alternance. Stabilisation de la tension par la diode Zener. Ecrêtage. Multiplicateur de tension. Autres types de diodes : Varicap, DEL, Photodiode.

Chapitre 4 - Transistors bipolaires : 3 semaines

4.1 Transistors bipolaires : Effet transistor, modes de fonctionnement (blocage, saturation, ...), réseau de caractéristiques statiques, polarisations, droite de charge, point de repos, ...

4.2 Etude des trois montages fondamentaux : EC, BC, CC, schéma équivalent, gain en tension, gain en décibels, bande passante, gain en courant, impédances d'entrée et de sortie, ...

4.3 Etude d'amplificateurs à plusieurs étages BF en régime statique et en régime dynamique, condensateurs de liaisons, condensateurs de découplage.

4.4 Autres utilisations du transistor : Montage Darlington, transistor en commutation, ...

Chapitre 5 - Les amplificateurs opérationnels : 3 semaines

Principe, Schéma équivalent, Ampli-op idéal, contre-réaction, caractéristiques de l'ampliop, Montages de base de l'amplificateur opérationnel : inverseur, non inverseur,

sommeur, soustracteur, comparateur, suiveur, dérivateur, intégrateur, logarithmique, exponentiel, ...

Mode d'évaluation : Contrôle continu : 40 % ; Examen final : 60 %.

Références bibliographiques:

(Selon la disponibilité de la documentation au niveau de l'établissement, Sites internet...etc.)

1. A. Malvino, Principe d'Electronique, 6ème Edition Dunod, 2002.

2. T. Floyd, Electronique Composants et Systèmes d'Application, 5ème Edition, Dunod, 2000.

3. F. Milsant, Cours d'électronique (et problèmes), Tomes 1 à 5, Eyrolles.
4. M. Kaufman, Electronique : Les composants, Tome 1, McGraw-Hill, 1982.
5. P. Horowitz, Traité de l'électronique Analogique et Numérique, Tomes 1 et 2, Publitronic-Elektor, 1996.
6. M. Ouhruche, Circuits électriques, Presses internationale Polytechnique, 2009.
7. Neffati, Electricité générale, Dunod, 2004
8. D. Dixneuf, Principes des circuits électriques, Dunod, 2007
9. Y. Hamada, Circuits électroniques, OPU, 1993.
10. I. Jelinski, Toute l'Electronique en Exercices, Vuibert, 2000.

Chapitre 1 : Régime continu et Théorèmes fondamentaux

Chapitre 1 – Régime continu et Théorèmes fondamentaux

- 1.1 Définitions
- 1.2 Les générateurs de tension et de courants idéals et réels
- 1.3 Les relations tension-courant (R, L, C)
- 1.4 Le diviseur de tension
- 1.5 Le diviseur de courant
- 1.6 Les Théorèmes fondamentaux
- 1.7 Théorème du transfert maximal de puissance

1.1 Définitions

Dans la version la plus simple, un circuit électrique est une organisation de composants physiques qui exploitent une tension, un courant et une résistance pour produire une fonction utile. Un circuit électrique comprend une source de tension, une charge, et un chemin qu'emporte le courant pour aller de la source à la charge :

Une batterie raccordée à une ampoule par deux conducteurs (fils), la batterie est la source de tension et l'ampoule est la charge de la batterie parce qu'elle absorbe du courant de cette batterie.

L'électricité est une forme d'énergie produite par la circulation de charges électriques dans un corps conducteur ou semi-conducteur. Certains corps, en particulier les métaux (aluminium, cuivre...) sont de très bons conducteurs parce qu'ils possèdent des électrons qui peuvent se libérer de l'attraction du noyau de l'atome pour participer à la conduction électrique. Dans d'autres matériaux appelés isolants, les charges électriques ne peuvent pas circuler. [1]

A présent, si une tension est appliquée à travers le matériau conducteur ou semi-conducteur (SC), une extrémité devient positive et l'autre devient négative, la force de répulsion due à la tension négative à gauche pousse les électrons vers la droite. La force d'attraction de la tension positive à droite attire les électrons libres vers la droite. Le mouvement résultant net est un flot d'électrons libres allant de l'extrémité négative à l'extrémité positive. Le déplacement des électrons libres de l'extrémité négative du matériau à l'extrémité positive s'appelle le courant électrique. [2]

Le courant continu (CC) par opposition au courant alternatif est un courant électrique unidirectionnel : le courant circule à chaque instant dans le même sens, le déplacement des électrons se fait toujours dans le même sens. [2]

Le terme de courant continu recouvre plusieurs sens :

- Le courant constant : le courant est totalement constant en direction et en intensité au cours du temps. Les courants de ce type sont parfois appelés courant parfaitement continue.
- Le courant continu lissé : c'est un courant qui s'approche du courant constant mais qui conserve une ondulation résiduelle négligeable.
- Le courant variable unidirectionnel : c'est un courant qui ne change pas de sens mais dont l'intensité varie au cours du temps.

1.1.1 Un dipôle [2]

On appelle un dipôle tout système relié à l'extérieur par deux conducteurs uniquement. Le comportement d'un dipôle est caractérisé par deux grandeurs électriques duales : la tension et le courant.

La tension aux bornes d'un dipôle représente la différence de potentiel U_{AB} entre les deux bornes du dipôle.

L'intensité I de ce courant mesure le débit des charges électriques qui traversent une section de conducteur. Le courant électrique est une grandeur orientée conventionnellement le sens positif correspond au sens de déplacement des charges positives.

Il existe deux possibilités pour le choix des sens conventionnels de la tension et du courant. Selon que la tension et le courant sont de même sens ou non. Figure 1.1

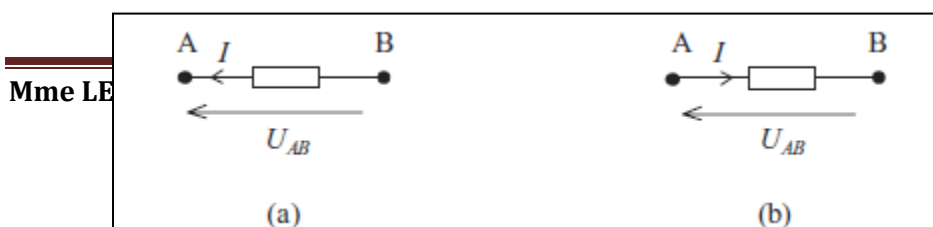


Figure 1.1 : a) Convention générateur. b) convention récepteur. [1]

Un dipôle est positif si son intensité de court-circuit (I_{CC}) et sa tension en circuit ouvert (V_{CO}) sont nulles : ces caractéristiques statiques passent par l'origine. Il est dit actif dans le cas contraire.

1.1.2 Une branche [1]

Une branche est une portion d'un réseau limitée par deux nœuds qui en sont les extrémités. Il s'agit donc d'un sous-ensemble d'éléments mis en série, (c'est-à-dire parcourus au même instant par le même courant) et joignant deux nœuds (figure 1.2). C'est le cas par exemple de AB, BM, BN ou PO...

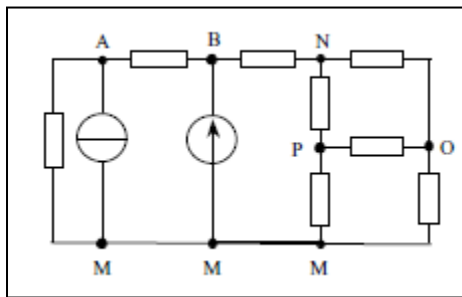


Figure 1.2 : Exemple de réseau électrique

1.1.3 Un nœud [1]

Un nœud est un point de connexion (raccordement) entre plusieurs dipôles (éléments). Le nœud est souvent matérialisé sur un schéma par un point lors du croisement de deux conducteurs. Ceci revient à trouver au moins trois fils électriques qui viennent se raccorder au même endroit. Par exemple sur la figure 1.2, les points A, B et M sont des nœuds. Entre deux nœuds d'un circuit, le potentiel est a priori différent.

1.1.4 Une maille [1]

Une maille est un contour fermé constitué par une succession de branches, mais ne comportant jamais deux fois la même branche (ne passant jamais deux fois sur le même nœud). Dans le schéma de la figure 1.2, l'exemple de maille noté BNPMB contient quatre branches ayant chacune un élément. ABMA est un autre exemple de maille constituée de trois branches. La branche AM est soit la branche constituée par la résistance, soit la branche constituée par la source de courant.

1.2 Les générateurs de tension et de courants idéals et réels

1.2.1 Les générateurs de tension idéale et réelle [2]

Un générateur (source) de tension continue supposé idéal est un générateur qui fournit, entre ses bornes, une différence de potentiel constante, quelle que soit l'intensité du courant qui le traverse, ou en d'autres termes quelle que soit la charge à ses bornes, à condition que cette charge ne soit pas nulle. Nous trouvons souvent dans les documents produits en français trois types de notation indiquées à la figure 1.3. [1]

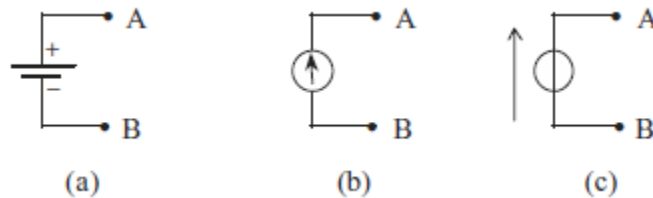


Figure 1.3 : Différents symboles pour une source de tension. [1]

Un générateur de tension idéal délivre une tension indépendante du courant I débité (figure 1.4):

$$U_A - U_B = U_{AB} = E = \text{Constante} \quad \forall I \quad (1.1)$$

Cette tension est la force électromotrice (f.é.m) du générateur. [2]

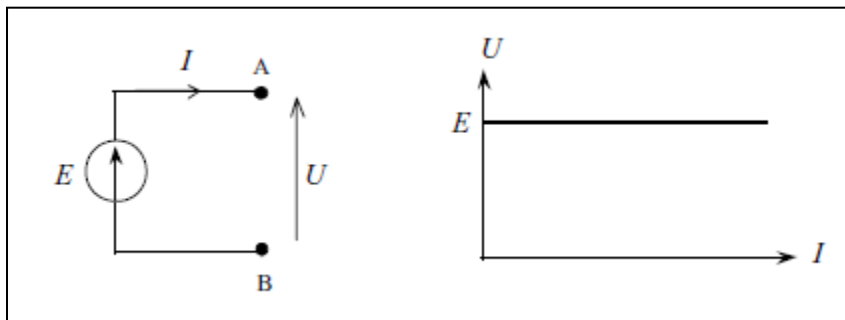


Figure 1.4 : Source de tension idéale et courbe $U = f(I)$ [1]

La résistance interne du générateur de tension idéal est nulle, ce qui n'est généralement le cas pour un générateur réel. Un générateur réel est modélisé par un générateur idéal en série avec sa résistance interne. En convention générateur, la caractéristique statique $U-I$ du générateur de tension réel (équation 1.2), la résistance interne R_g induit une chute de tension. Figure 1.5 [2]

$$U_A - U_B = U_{AB} = E_g - R_g \cdot I \quad (1.2)$$

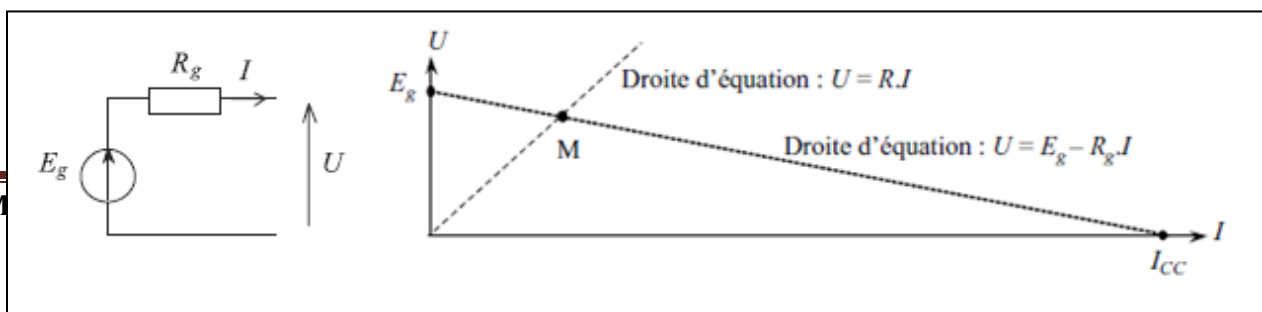


Figure 1.5 : Source de tension réelle et courbe $U = f(I)$ [1]

1.2.2 Les générateurs de courants idéale et réelle

Un générateur (source) de courant continu supposé idéal est un générateur fixant l'intensité du courant électrique I_g qui le traverse quelle que soit la différence de potentiel U à ses bornes, autrement dit quelle que soit la charge à ses bornes, à condition que cette charge ne soit pas infinie. Le courant ainsi débité est aussi appelé courant de court-circuit (figure 1.6). [1]

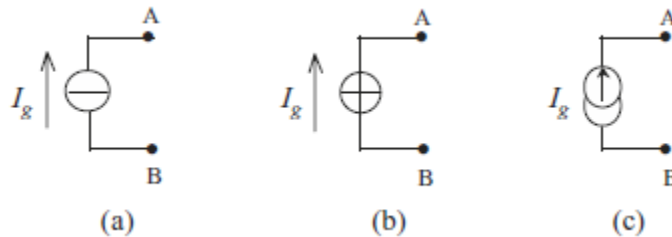


Figure 1.6 : Différents symboles pour une source de courant. [1]

Un générateur de courant idéal débite un courant dont l'intensité est indépendante de la tension aux bornes du générateur :

$$I = I_g = \text{Constante} \quad \forall U \quad (1.3)$$

La figure suivante montre le symbole d'une source de courant idéale et sa caractéristique courant tension I-U. [2]

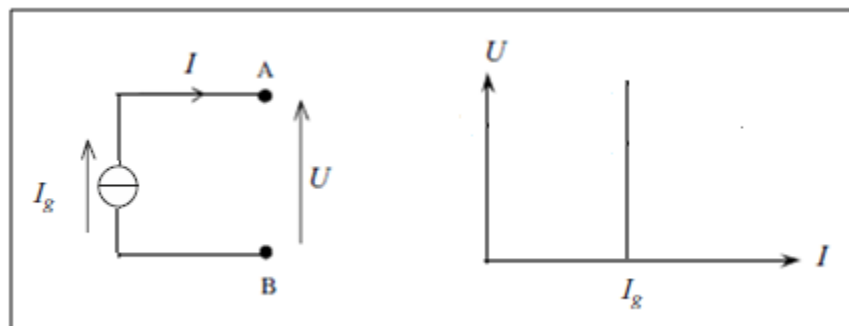


Figure 1.7 : Source de courant idéale et courbe $U = f(I)$

La résistance interne d'un générateur de courant idéal est infinie. Pour un générateur réel, on tient compte de sa résistance interne, en le modélisant par une source idéale de courant en parallèle avec

sa résistance interne R_g . En convention générateur, la caractéristique statique I-V du générateur du courant réel est donc :

$$I = I_g - \frac{U}{R_g} \quad (1.4)$$

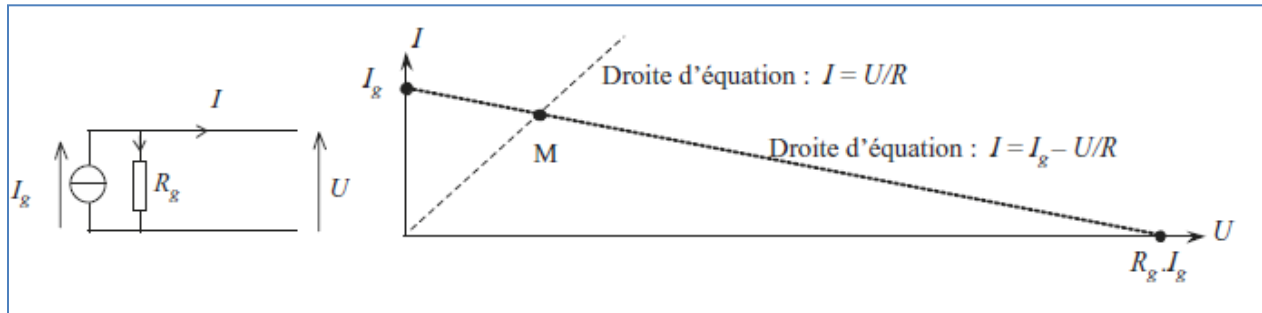


Figure 1.8 : Source de courant réelle et courbe $U = f(I)$ [1]

Comme pour les sources de tensions, on distingue les sources de courant indépendantes et les sources de courants commandées qui dépendent d'une grandeur électrique du circuit.

1.2 Les relations tension-courant (R, L, C)

1.2.1 La résistance

Une résistance est un dipôle (composant à deux bornes) tel que la tension U à ses bornes est proportionnelle au courant I qui le traverse (loi d'Ohm) : [6]

$$U = R \cdot I \quad (1.5)$$

Le coefficient de proportionnalité R est appelé résistance du dipôle.

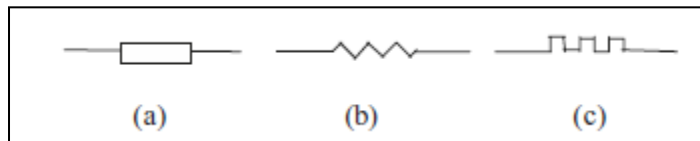


Figure 1.8 : Symboles d'une résistance.

Les résistances sont des composants fabriqués en utilisant du carbone graphité, mélangé avec l'argile soit à l'aide d'un alliage possédant un fort coefficient de résistivité (constantan, manganin...) ou par dépôt sur un film métallique de couche d'oxydes.

Dans tous les cas, trois critères sont à considérer dans le choix d'une résistance :

- SA valeur ohmique exprimée en ohm et noté « V »;

- SA puissance à dissiper de l'énergie. Nous trouvons des résistances simples 0,25 ou 0,5 watt et des résistances de puissance capables de dissiper au moins 1 watt ou davantage. Dans ce dernier cas, les résistances sont souvent à couches métalliques, bobinées ou vitrifiées. La valeur de la résistance est indiquée sur le composant.

- SA précision ou tolérance. Il existe plusieurs séries de résistances caractérisées par l'échelonnement des valeurs par décade. Par exemple la série E12, qui concerne des résistances de faible puissance comporte, 12 valeurs par décade, à savoir : 10 ; 12 ; 15 ; 18 ; 22 ; 27 ; 33 ; 39 ; 47 ; 56 ; 68 ; 82 (ainsi que les multiples et les sous multiples).

La valeur d'une résistance est indiquée selon le code des couleurs, à l'aide de quatre anneaux (les trois premiers pour la valeur ohmique et le quatrième pour la tolérance). [1]

Un phénomène important dans une résistance est l'effet Joule (du nom d'un physicien anglais qui a étudié les lois de la chaleur). Une résistance parcourue par un courant consomme une énergie électrique et la transforme en chaleur. La puissance correspondante (qui correspond à un débit d'énergie) s'exprime par l'une des trois formules, équivalentes grâce à la loi d'Ohm : [6]

$$P = U.I = R.I^2 = \frac{U^2}{R} \quad (1.6)$$

Associations de résistances [6]

Association en série

On peut brancher deux résistances R_1 et R_2 en série (figure 1.9).

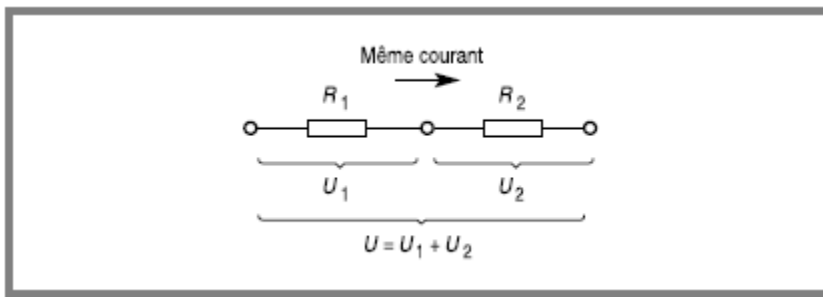


Figure 1.9 : Association de deux résistances en série.

Le courant est le même dans les deux éléments, mais les tensions à leurs bornes s'ajoutent. Une double application de la loi d'Ohm montre que le dipôle résultant se comporte comme une résistance dont la valeur est :

$$R = R_1 + R_2 \quad (1.7)$$

Cette loi peut se généraliser à plusieurs conducteurs en série :

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (1.8)$$

Association en parallèle

Le deuxième mode d'association de résistances est le branchement en parallèle (figure 1.10).

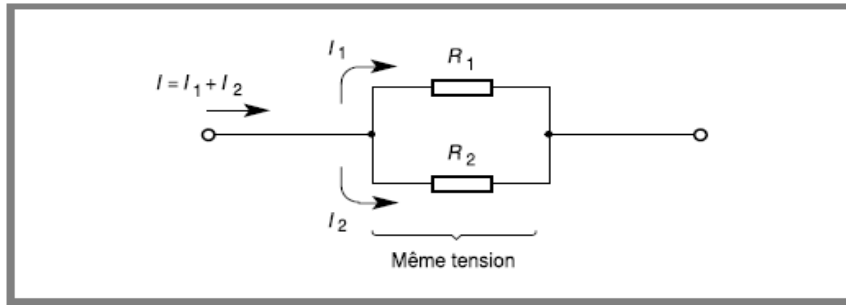


Figure 1.10 : Association de deux résistances en parallèle.

La tension est la même pour les deux éléments, mais les courants qui les traversent s'ajoutent. On a ici, grâce à la loi d'Ohm :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1.9)$$

Pour plusieurs résistances, on a de même :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2} + \dots \quad (1.10)$$

Dans le cas de deux résistances, on peut facilement obtenir R par la formule :

$$R = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.11)$$

Cas des résistances de même valeur

Un cas particulier intéressant est celui où les résistances sont identiques : deux résistances en série donnent une résistance de valeur double et deux résistances en parallèle équivalent à une résistance de valeur moitié.

1.2.2 Le condensateur

Un condensateur est un composant passif constitué de deux conducteurs appelés souvent armatures, séparés par un diélectrique ou isolant (papier, mica ou air). Il s'agit d'un réservoir d'énergie électrostatique capable d'emmagasiner l'énergie dans un champ électrique. Lorsque la tension est variable sur un cycle, l'énergie sera stockée durant une partie du cycle puis restituée durant l'autre partie du cycle. (1)

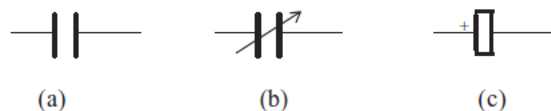


Figure 1.11 : Symboles d'un condensateur : a) normal, b) variable, c) chimique.

En plus, le condensateur est capable de garder sa charge une fois débranché du circuit. Il reste chargé jusqu'à ce qu'une liaison permette la décharge.(1)

La quantité de charge Q emmagasinée sous une tension U donnée dépend du condensateur employé. Pour un composant choisi, la quantité de charge est proportionnelle à la tension appliquée à ses bornes. On écrit :

$$Q = C \cdot U \quad (1.12)$$

La constante C est caractéristique du condensateur. On l'appelle capacité et on l'exprime en farads (symbole F).

Les relations suivantes relient les différentes grandeurs :

$$U(t) = C \cdot \frac{dU(t)}{dt} \quad (1.13)$$

$$p(t) = U(t) \cdot I(t) = C \cdot U(t) \cdot \frac{dU(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} C \cdot U^2 \right] \quad (1.14)$$

$$W_c = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (1.15)$$

W_c est l'énergie accumulée par le condensateur au bout d'un temps t . (1)

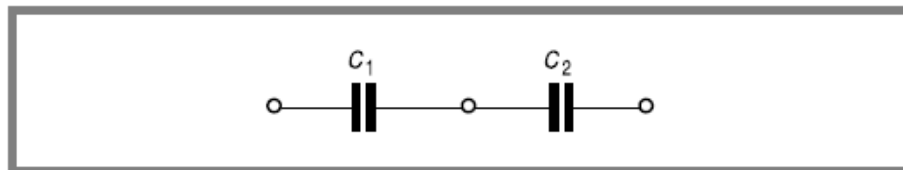
Associations de condensateurs (6)

On peut grouper les condensateurs en série ou en parallèle. L'association se comporte comme un nouveau condensateur. Pour deux éléments en série (figure 1.12), de capacités C_1 et C_2 , on obtient un condensateur équivalent dont la capacité C est telle que :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (1.16)$$

On en déduit :

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$



(1.17)

Figure 1.12 : Condensateurs en série.

Deux condensateurs de capacités C_1 et C_2 branchés en parallèle (figure 1.13) donnent un condensateur équivalent de capacité :

$$C = C_1 + C_2 \quad (1.18)$$

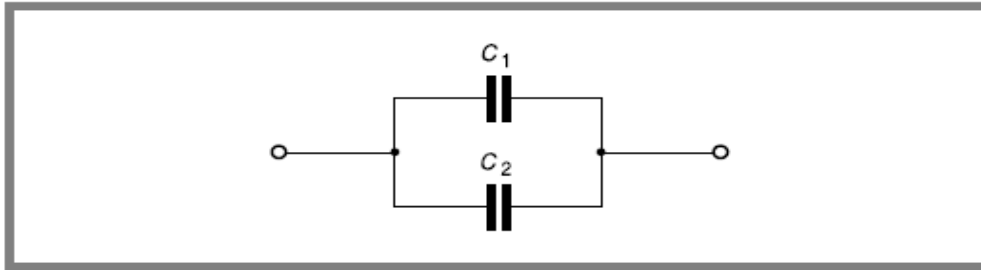


Figure 1.13 : Condensateurs en parallèle.

Les formules se généralisent facilement pour des groupements de plus de deux condensateurs.

Courbes de charge et de décharge (6)

La charge la plus simple est obtenue quand le courant est constant. En effet, dans ce cas la tension U aux bornes du condensateur croît linéairement avec le temps t :

$$Q = \frac{I}{C} \cdot t \quad (1.19)$$

Il faut cependant prendre garde au fait que cette formule ne s'applique que si le condensateur est totalement déchargé au départ (la tension est nulle à $t=0$). On peut tracer la courbe représentant la tension U en fonction du temps t : on obtient une portion de droite (figure 1.14).

Le tracé a été fait pour un condensateur de capacité $1\mu\text{F}$ chargé avec un courant constant de 1 mA . On utilise ce dispositif dans les générateurs de rampes et les générateurs de signaux triangulaires (la décharge étant alors aussi à courant constant).

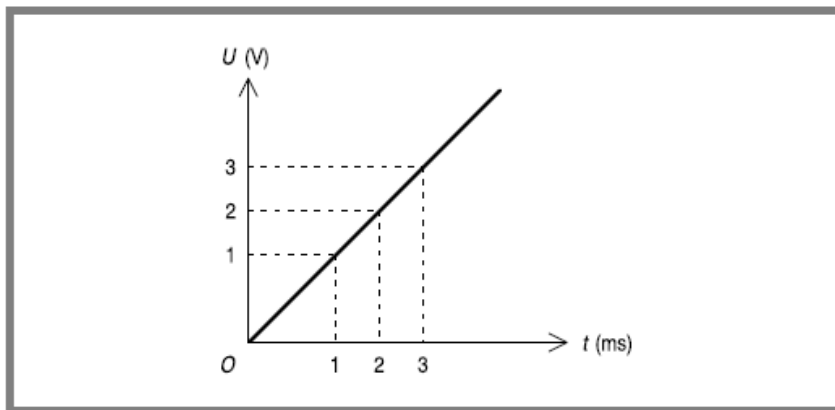


Figure 1.14 : Charge d'un condensateur à courant constant.

Dans la plupart des applications, les condensateurs ne sont pas chargés à courant constant. Un générateur de tension continue E est branché en série avec une résistance R et le condensateur C (figure 1.15).

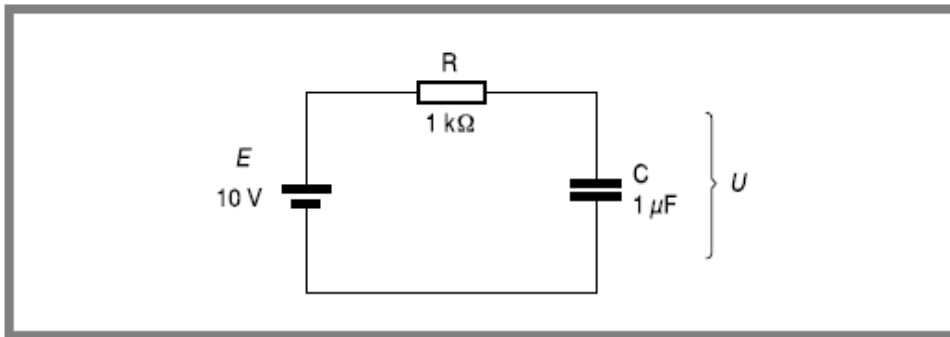


Figure 1.15 : Circuit de charge d'un condensateur par un générateur de tension et une résistance.

Si le circuit est fermé à $t = 0$, le condensateur étant complètement déchargé, l'évolution de la tension U se fait suivant une courbe (figure 1.16).

La charge commence assez rapidement puis se ralentit de plus en plus. Pour chiffrer la durée de la charge, on définit la constante de temps du circuit par :

$$\tau = R \cdot C \quad (1.20)$$

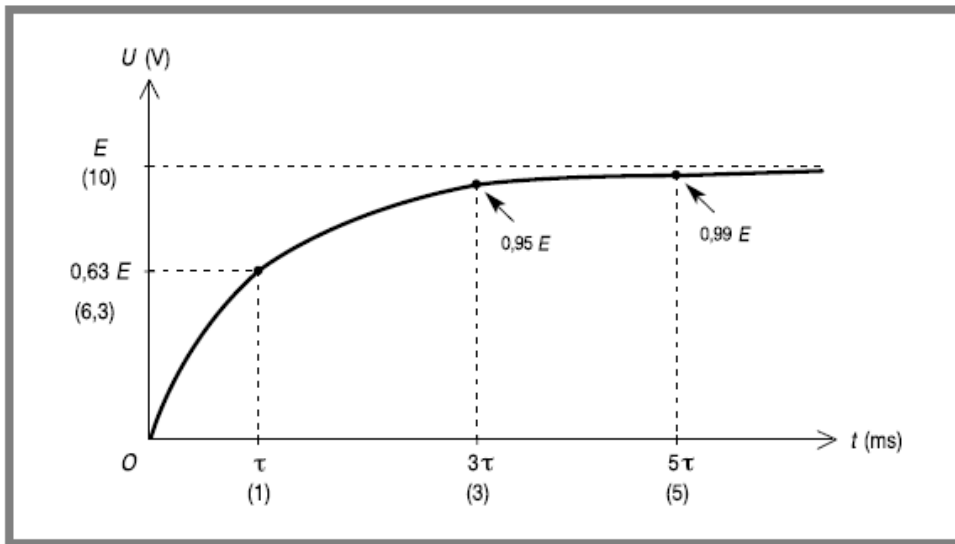


Figure 1.16 : Évolution de la tension aux bornes d'un condensateur chargé par un générateur de tension et une résistance.

Cette courbe est en fait une « exponentielle » dont l'équation mathématique est :

$$U = E \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (1.21)$$

La décharge du condensateur est obtenue en remplaçant le générateur E par un court-circuit.

On peut remarquer qu'une charge ou une décharge est pratiquement terminée au bout de quelques constantes de temps : au bout de 5τ , on atteint la valeur finale à 1 % près.

Les charges et décharges exponentielles sont utilisées dans de nombreux montages : astables, monostables...

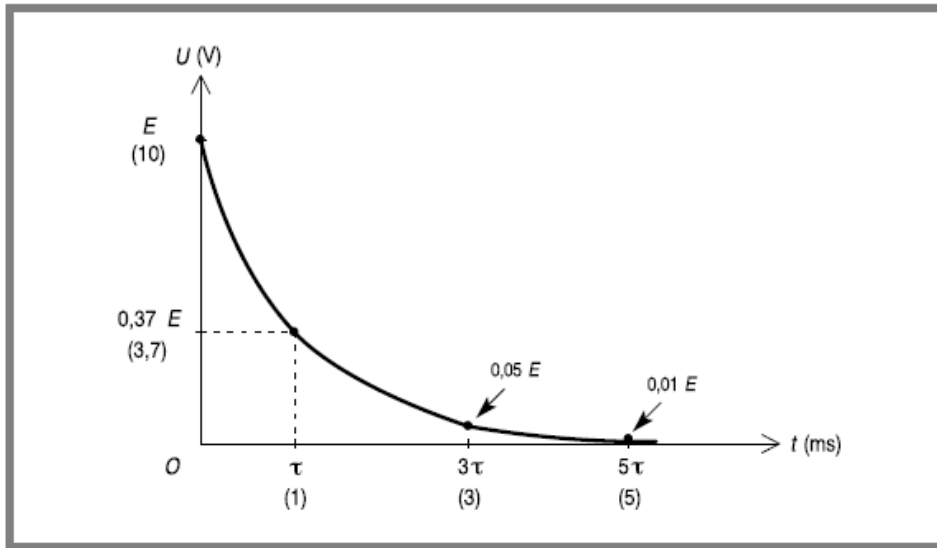


Figure 1.17 : Évolution de la tension aux bornes du condensateur lors de sa décharge.

1.2.3 La bobine

Une bobine est formée d'un fil enroulé soit dans l'air, soit sur un noyau magnétique.

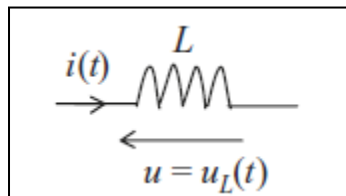


Figure 1.18 : Symbole d'une inductance.

Si nous faisons circuler un courant électrique I dans une bobine à n spires, il y a création d'une induction magnétique B dont la valeur est proportionnelle à l'intensité du courant I . Le champ magnétique H qui en résulte est égal au produit $n.I$.

L'ensemble des spires canalise les lignes d'induction, ce qui donne un flux d'induction Φ :

$$\Phi = B \cdot S \quad (1.22)$$

Où S est la section droite de la bobine (1)

Le flux Φ s'exprime en webers (symbole Wb). Si le champ magnétique a été créé par l'enroulement lui-même, on parle de flux propre. Tant que le courant I n'est pas trop élevé, le flux Φ est proportionnel au courant qui l'a engendré : (6)

$$\Phi = L \cdot I \quad (1.23)$$

Le coefficient L est l'inductance (ou auto-inductance) de la bobine.

La traduction anglaise est *self-inductance*, ce qui explique que l'on parle souvent dans le langage courant de *self* pour désigner une bobine. L'unité d'inductance est le henry (symbole H), du nom du physicien américain J. Henry.

L'inductance (appelée également *self*) est l'élément de circuit capable de stocker l'énergie dans un champ magnétique pendant un certain temps $T1$ avant d'être restituée durant $T2$ au reste du circuit.(1)

$$U(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (1.24)$$

$$p(t) = U(t) \cdot I(t) = L \cdot i(t) \cdot \frac{di(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} L \cdot i^2 \right] \quad (1.25)$$

$$W_L = \frac{1}{2} L \cdot i^2 \quad (1.26)$$

W_L est l'énergie accumulée par l'inductance. Cette énergie ne pouvant varier instantanément.

Associations

On peut associer les bobines en série ou en parallèle, mais ces groupements sont très peu utilisés. Les lois d'association pour les inductances sont les mêmes que celles qui ont été citées pour les résistances.

Établissement du courant dans une bobine (6)

Si l'on applique une tension constante à une bobine, le courant augmente linéairement :

$$I = \frac{U}{L} \cdot t \quad (1.27)$$

Cette loi de variation n'est toutefois valable que tant que la bobine n'est pas saturée. Les variations du courant I en fonction du temps t sont représentées par un segment de droite (figure 1.19).

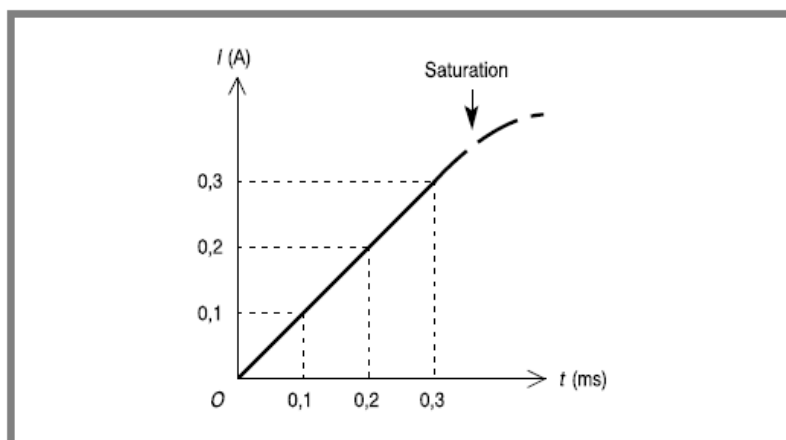


Figure 1.19 : Établissement du courant dans une bobine soumise à une tension constante.

On a choisi pour le tracé une inductance de 10 mH soumise à une tension de 10 V.
Si le courant s'établit à travers une résistance R (figure 1.20), la courbe devient une exponentielle (figure 1.21) identique à celle qui représente la tension lors de la charge d'un condensateur).
La constante de temps est dans ce cas :

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (1.28)$$

Au bout de quelques constantes de temps, le courant est stabilisé à sa valeur de repos :

$$I_0 = \frac{E}{R} \quad (1.29)$$

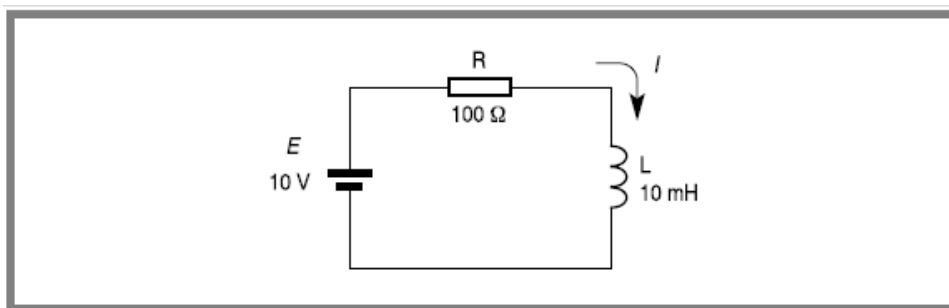


Figure 1.20 : Établissement du courant dans une bobine à travers une résistance.

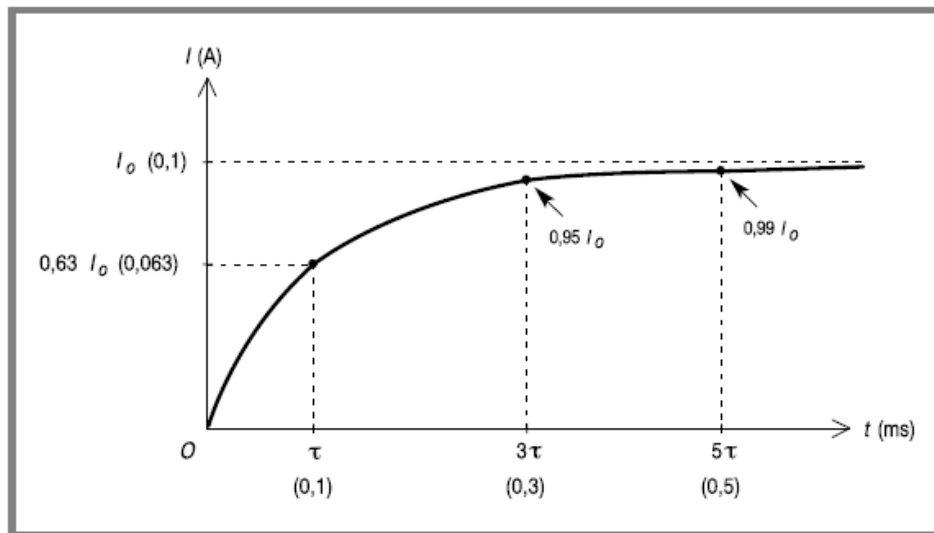


Figure 1.21 : Évolution du courant dans la bobine.

Les phénomènes sont similaires lors de l'extinction du courant (figure 1.22).
Il ne faut pas ouvrir le circuit contenant la bobine : le courant ne pouvant s'annuler brusquement à cause de l'énergie emmagasinée dans la bobine, il se produirait un arc électrique entre les contacts ouverts.

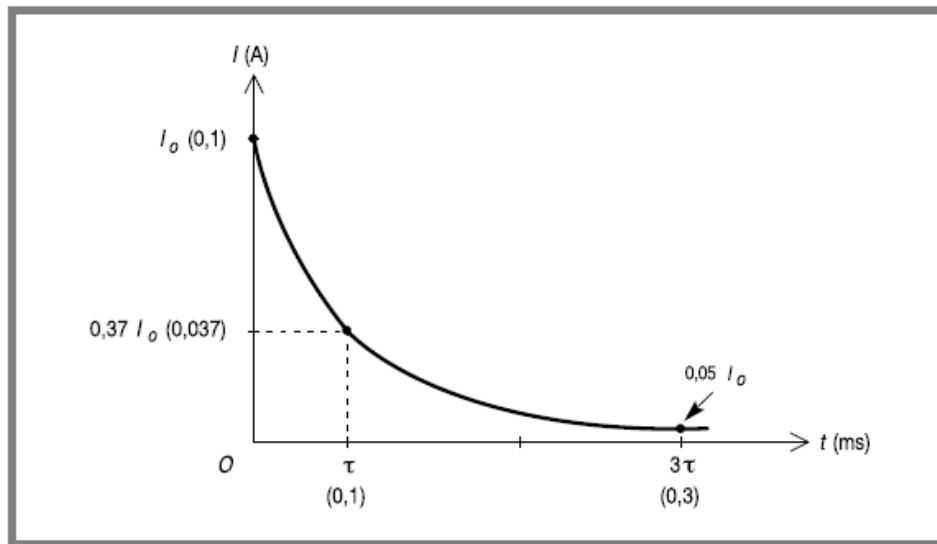


Figure 1.22 : Évolution du courant lors de son extinction.

1.2.4 Associations de dipôles (1)(2)

Deux dipôles sont en *série* s'ils sont parcourus par le même courant électrique (même intensité). Ils sont en *parallèle* s'ils ont une même différence de potentiel à leurs bornes. Ces définitions simples s'étendent à n dipôles ou éléments.

Association de deux générateurs de tension en série

Considérons les deux dipôles de la figure 1.23 (a), constitués par la mise en série de deux générateurs de tension. Calculons maintenant le dipôle équivalent de la figure 1.23: (E_{eq} , R_{eq}). En appliquant la deuxième loi de Kirchhof (des tensions), la tension développée entre A et B est égale à la somme algébrique des tensions produites par chacune des sources. La résistance équivalente est égale à la somme des résistances internes des générateurs de tension. Ainsi la puissance totale série est égale à la somme des puissances de chaque résistance en série.

$$E_{eq} = \sum_{k=1}^n E_k \quad \text{et} \quad R_{eq} = \sum_{k=1}^n R_k \quad \text{et} \quad P_T = \sum_{k=1}^n P_k \quad (1.30)$$

E_k est considérée comme positive si elle a le même sens que la tension U .

L'association en série de n générateurs de tension de résistance interne R_k et de force électromotrice E_k est équivalente à un générateur de tension unique dont la résistance équivalente est la somme des n résistances, et la force électromotrice équivalente est la somme algébrique des tensions produites par chaque source.

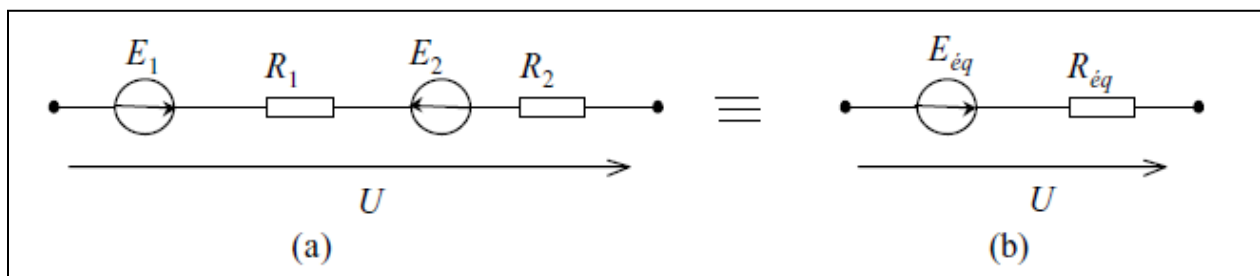


Figure 1.23 : Association en série de deux sources de tensions.

Association de deux générateurs de courant en parallèle

Considérons les deux dipôles de la figure 1.24 (a) constitués par la mise en parallèle de deux générateurs de courant (I_1, R_1) et (I_2, R_2). Calculons maintenant le dipôle équivalent (I_{eq}, R_{eq}) de la figure 1.24 (b). En appliquant la première loi de Kirchhoff (les courants), le courant de court-circuit est égal à la somme algébrique des courants produits par chacune des sources. La conductance équivalente est égale à la somme des conductances (G) internes des différents générateurs de courant. et la puissance totale s'obtient en additionnant la puissance de toutes les résistances individuelles, tout comme dans le cas du circuit série.

$$I_{eq} = \sum_{k=1}^n I_k \quad \text{et} \quad G_{eq} = \sum_{k=1}^n G_k \quad \text{et} \quad P_T = \sum_{k=1}^n P_k \quad (1.31)$$

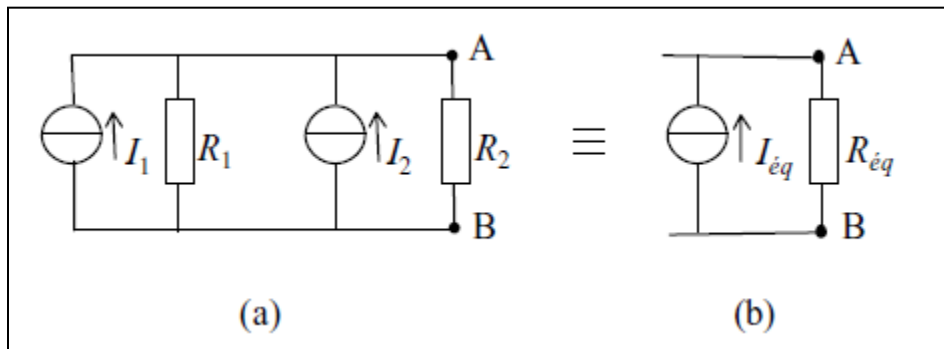


Figure 1.24 : Association en parallèle de deux sources de courants.

Association de deux générateurs de tension en parallèle (1)

Supposons les deux générateurs réels de tensions de la figure 1.25 (a) que nous branchons en parallèle. À vide, le courant total I débité par les deux sources dans la charge étant nul, I_1 et I_2 sont forcément égaux en amplitude mais de signes opposés.

Si l'amplitude de ces deux courants n'est pas nulle, nous pouvons nous retrouver avec une situation de perte d'énergie (échauffement dans les résistances), ce qui peut, dans certaines conditions, provoquer une destruction du circuit.

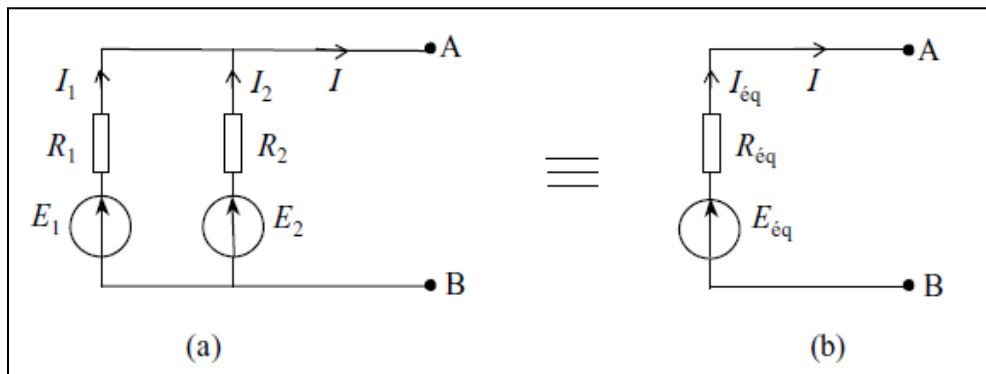


Figure 1.25 : Association en parallèle de deux sources de tensions.

Nous allons présenter quelques théorèmes généraux permettant de réduire ou de simplifier les calculs sur les circuits électriques en régime statique. Ces théorèmes et méthodes d'étude ne sont valables que pour des réseaux linéaires.

1.3 Le diviseur de tension

Un circuit série agit comme un diviseur de tension. Il est une application importante des circuits séries. (2)

Le schéma d'un pont diviseur de tension est donné à la figure 1.26. Il s'agit d'une application directe de la mise en série de deux résistances (1)

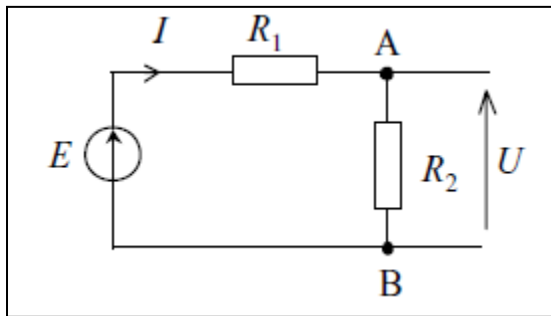


Figure 1.26 : Schéma du pont diviseur de tension.

Comme le courant est le même dans chaque résistance, les chutes de tensions sont proportionnelles aux valeurs des résistances. (2)

$$V_X = I \cdot R_X \quad (1.32)$$

$$I = \frac{E}{R_T} \quad (1.33)$$

Remplaçons l'équation 1.33 dans 1.32 :

$$V_X = \frac{E}{R_T} R_X \quad (1.34)$$

En réarrangeant les termes :

$$V_X = \left(\frac{R_X}{R_T} \right) E \quad (1.35)$$

La chute de tension aux bornes d'une résistance ou d'une combinaison de résistances dans un circuit série est égale au rapport de la valeur de cette résistance à la résistance totale, multiplié par la tension de la source.

1.4 Le diviseur de courant

Un circuit parallèle se comporte comme un diviseur de courant, puisque le courant qui entre dans un nœud se divise en plusieurs courants entre les branches qui quittent le nœud.(2)

Le schéma d'un pont diviseur de courant est donné à la figure 1.27.

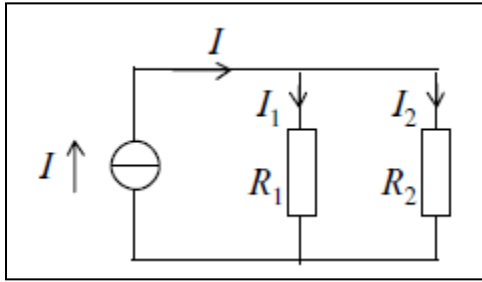


Figure 1.27 : Schéma du pont diviseur de courant.

Puisque la même tension se retrouve aux bornes de chaque résistance en parallèle, les courants de branche sont inversement proportionnels à la valeur des résistances.

Le courant total se divise entre les résistances parallèles en proportion inverse à la valeur des résistances. Les branches ayant les plus fortes résistances ont les plus faibles courants et l'inverse est vrai.

$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) I_T \quad (1.36)$$

$$I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) I_T \quad (1.37)$$

1.5 Les Théorèmes fondamentaux

Certains circuits nécessitent plus d'une source de tension, c'est le cas de certains types d'amplificateurs qui ont besoin, pour bien fonctionner, à la fois d'une source positive et d'une source négative.

1.5.1 La méthode de superposition [2]

C'est une technique qui permet de connaître les courants et les tensions dans un circuit à plusieurs sources, en procédant une source à la fois, les autres sources sont remplacées par leurs résistances internes. Dans cette section, toutes les sources seront traitées comme des éléments idéaux afin de simplifier la démonstration.

Le courant dans une branche quelconque d'un circuit à plusieurs sources peut être déterminé à partir du courant dû à chaque source agissant individuellement, quand les autres sources sont remplacées par leur résistance interne. Le courant total dans cette branche est alors la somme algébrique de courants individuels.

Les étapes de la démarche à suivre pour appliquer la méthode de superposition sont :

Etape 1 : Considérons une source à la fois et remplaçons les autres sources de tensions par un court-circuit (source idéale) et les sources de courant par un circuit-ouvert (source idéale).

Etape 2 : Déterminons le courant ou la tension recherchée comme nous le ferions dans un circuit à une seule source.

Etape 3 : Répétons les étapes 1 et 2 successivement pour chacune des autres sources.

Etape 4 : Pour trouver le courant ou la tension réelle, additionnons ou soustrayons les courants ou les tensions des sources individuelles. Si les courants sont dans le même sens ou que les tensions ont la même polarité, on effectue une addition. Si les courants sont de sens opposés ou que les tensions ont des polarités contraires, on effectue une soustraction en tenant compte du sens du courant ou de polarité de la tension.

Un exemple de la marche à suivre de la superposition est donné à la figure 1.28 pour un circuit à deux sources.

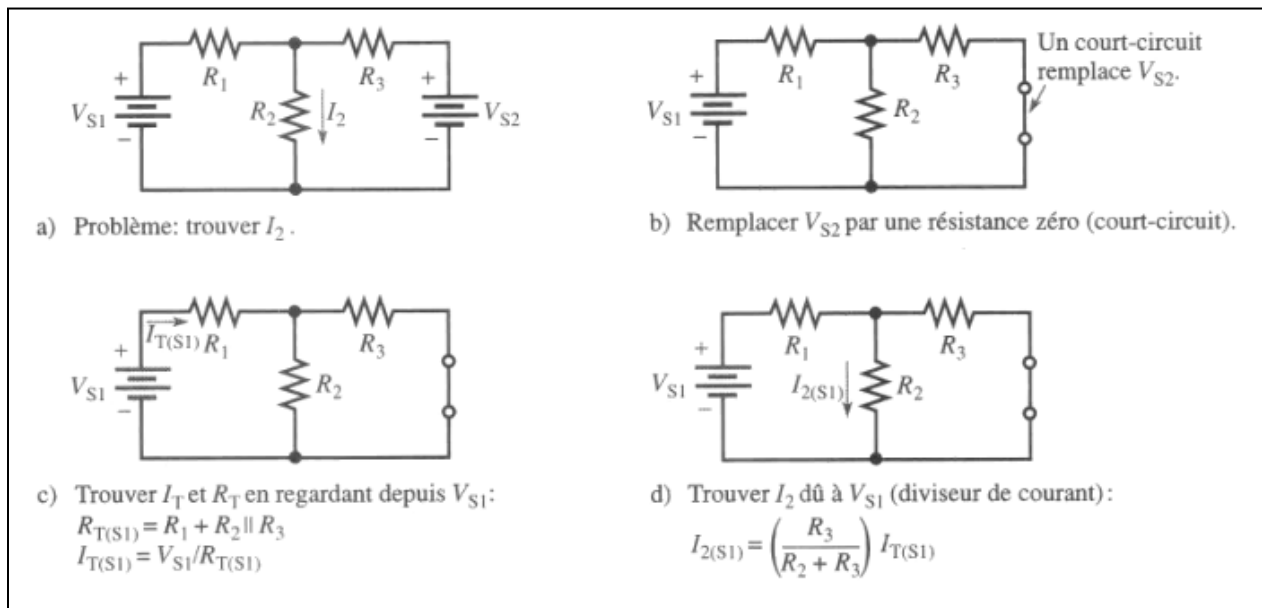


Figure 1.28 : Démonstration de la méthode de la superposition

Et finalement la 4^{ème} étape de l'exemple de démonstration est le calcul de I_2

$$I_2 = I_{2(S1)} + I_{2(S2)} \quad (1.38)$$

1.5.2 Théorème de Thévenin [2]

Le théorème de Thévenin se veut une méthode de réduction d'un circuit en une forme équivalente normalisée. Dans de nombreux cas, ce théorème peut aussi servir à simplifier l'analyse d'un circuit série-parallèle complexe.

La forme équivalente d'un circuit de Thévenin de tout circuit résistif est constituée d'une source de tension équivalente (V_{TH}) et d'une résistance équivalente (R_{TH}). Ces deux valeurs dépendent des valeurs originales. Tout circuit résistif peut être réduit ainsi quelle que soit sa complexité.

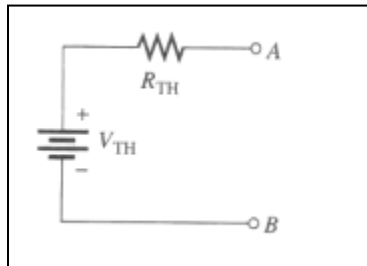


Figure 1.29 : Circuit équivalent de Thévenin

V_{TH} : la tension du circuit ouvert entre deux points spécifiés du circuit.

R_{TH} : la résistance totale quand toutes les sources ont été remplacées par leur résistance interne.

Les étapes de la démarche à suivre pour appliquer le théorème de Thévenin sont :

Etape 1 : Ouvrir la résistance de charge.

Etape 2 : Calculer ou mesurer la tension du circuit ouvert c'est la tension de Thévenin.

Etape 3 : Court-circuiter les sources de tensions et ouvrir les sources de courants.

Etape 4 : Calculer ou mesurer la résistance du circuit ouvert c'est la résistance de Thévenin.

Un exemple de la marche à suivre du théorème de Thévenin est donné à la figure 1.30.

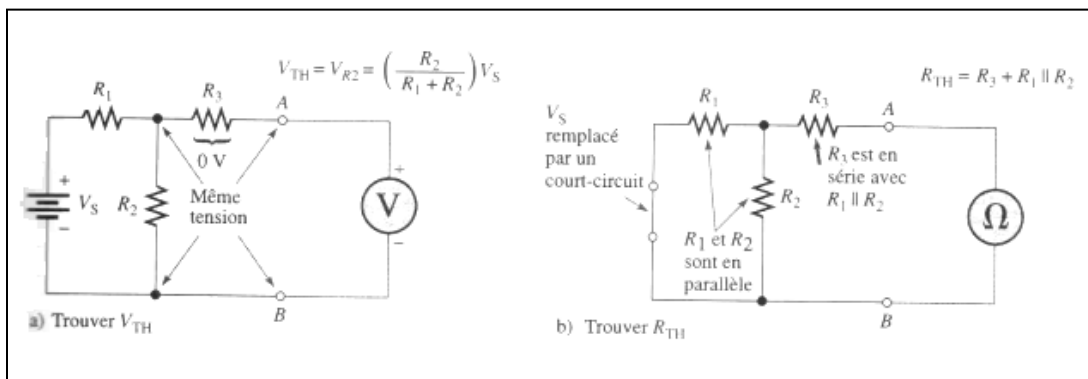


Figure 1.30 : Démonstration du théorème de Thévenin

Equivalent de Thévenin d'une partie de circuit

Grace à cette approche, nous pouvons trouver sans difficulté, au moyen de la loi d'Ohm, la tension et le courant de la résistance spécifiée, quelque soit sa valeur ohmique. Cette démarche nous évite la tâche de réanalyser le circuit original pour différentes valeurs de cette résistance. Dans cet exemple, on détermine l'équivalent de Thévenin en regardant le circuit à la place de R_3 .

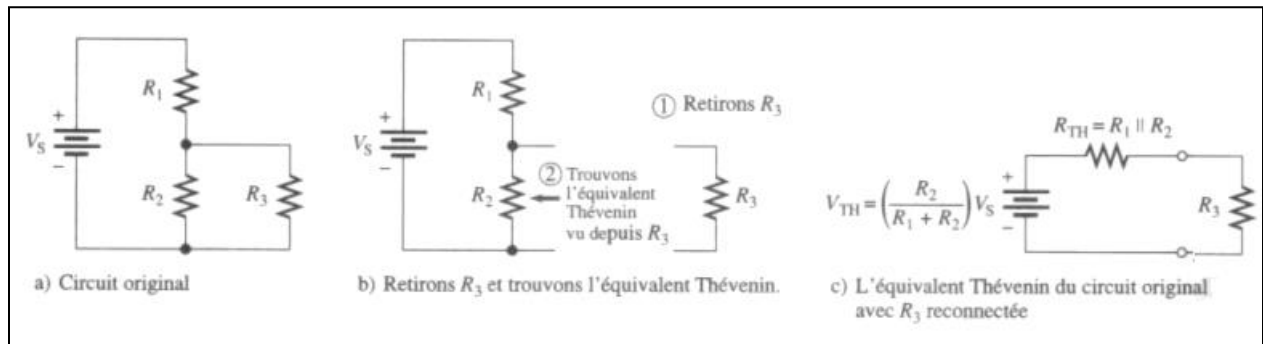


Figure 1.31 : Equivalent de Thévenin d'une partie de circuit

1.5.3 Théorème de Norton

Tout circuit résistif peut être remplacé par une source de courant en parallèle avec une résistance. L'intensité du courant I_N est le courant de court-circuit et la résistance est celle du circuit vu de ces deux bornes lorsque toutes les sources sont éteintes.

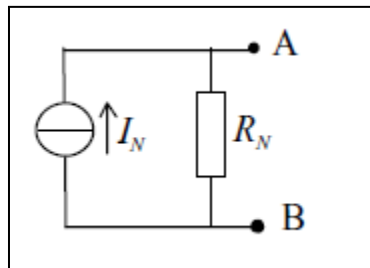


Figure 1.32 : Circuit équivalent de Norton

Les étapes de la démarche à suivre pour appliquer le théorème de Norton sont :

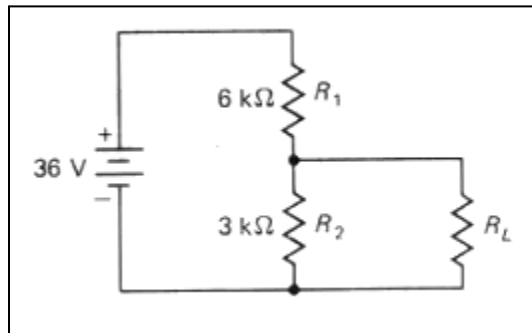
Etape 1 : Court-circuiter la résistance de charge.

Etape 2 : Calculer ou mesurer la tension du court-circuit c'est le courant de Norton.

Etape 3 : Court-circuiter les sources de tensions, ouvrir les sources de courants et ouvrir la résistance de charge.

Etape 4 : Calculer ou mesurer la résistance du circuit ouvert c'est la résistance de Norton.

Un exemple de la marche à suivre du théorème de Norton est donné à la figure 1.33.



$$R_1 = 6\text{k}\Omega, R_2 = 3\text{k}\Omega \text{ et } E = 36\text{ V}$$

Figure 1.33 : Exemple du théorème de Norton

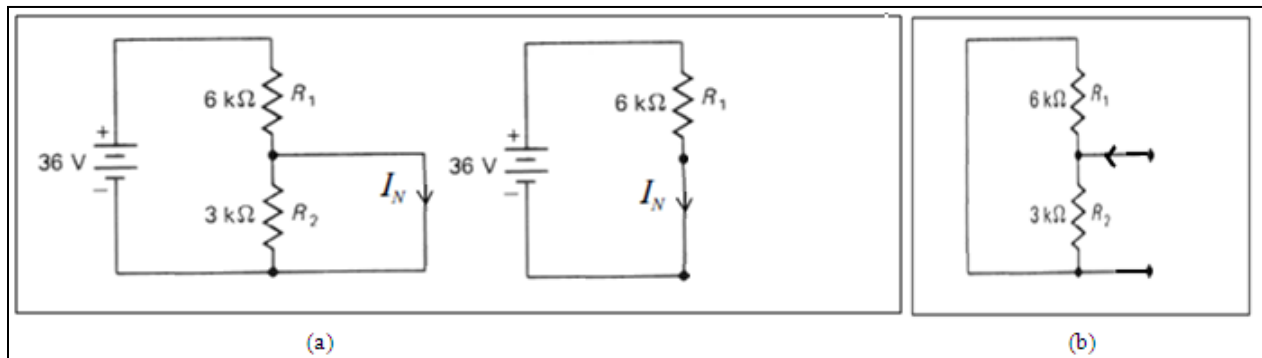


Figure 1.34 : Démonstration du théorème de Norton. a) calcul du I_N . b) calcul de R_N .

En appliquant les étapes du théorème de Norton sur l'exemple de la figure 1.33, nous trouvons :

$$I_N = \frac{E}{R_1} \quad (1.39)$$

$$R_N = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.40)$$

1.5.4 Théorème de Millmann [1]

Ce théorème donne une généralisation du théorème de superposition. Cette autre façon d'écrire la loi des nœuds permet de calculer la différence de potentiel entre un nœud N et le nœud de référence des potentiels.

Soit M un nœud du circuit choisi comme référence de potentiel $V_M = 0$. Supposons n branches connectées à un nœud N. Chaque branche constitue un dipôle vu entre le nœud N et celui de référence, ce qui permet de remplacer la branche réelle par son modèle équivalent de Thévenin.

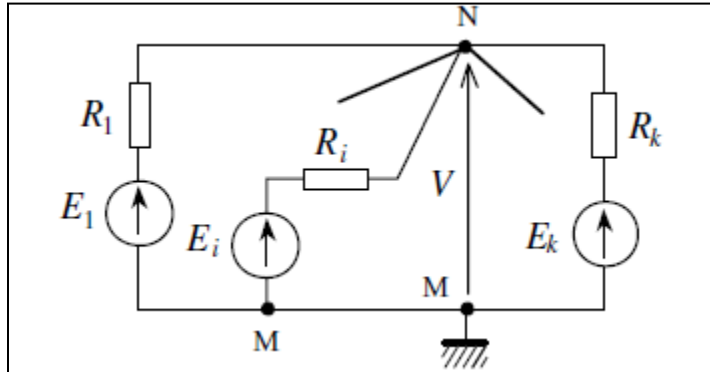


Figure 1.35 : Principe du théorème de Millman.

Si nous effectuons un court-circuit entre le nœud N et le nœud de référence, le courant de court-circuit (courant de Norton) est égal à la somme des courants fourni par chaque source.

$$I_N = I_{cc} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{R_i} \quad (1.41)$$

Lorsque nous passivons les sources de tension, toutes les résistances se trouvent en parallèle ; la conductance équivalente est égale à la somme des conductances de chaque source.

Le théorème de Millman stipule que la tension mesurée au nœud N est donc égale au produit de la résistance équivalente par la valeur de la source de courant, soit :

$$V_N = \frac{\sum_{i=1}^n E_i G_i}{\sum_{i=1}^n G_i} = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3} + \dots + \frac{E_n}{R_n}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (1.42)$$

1.5.5 Equivalence entre Thévenin et Norton [1]

Les schémas de Thévenin et de Norton sont des schémas équivalents, les deux dipôles présentent :

- La même tension à vide,
- Le même courant de court-circuit,
- La même résistance interne.

Le passage du modèle d'un générateur de Thévenin à celui d'un générateur de Norton conduit à trouver :

$$R_N = R_{TH} \quad \text{et} \quad E_{TH} = R_N \cdot I_N \quad \text{et} \quad I_N = \frac{V_{TH}}{R_{TH}} \quad (1.43)$$

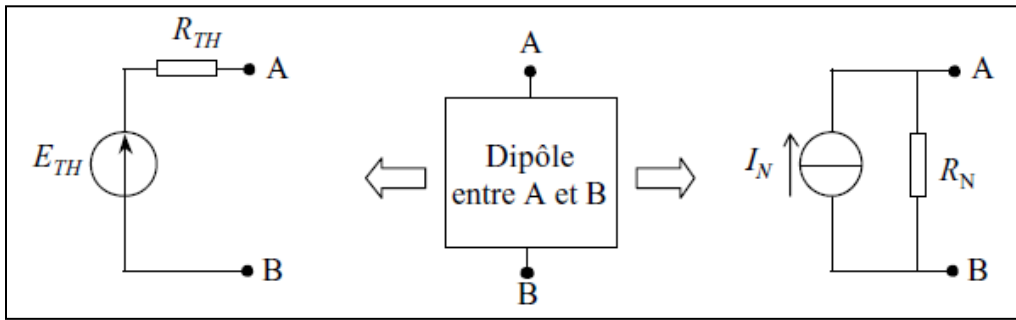


Figure 1.36 : Équivalence Thévenin et Norton d'un dipôle.

Les théorèmes de Thévenin et de Norton permettent de modéliser le comportement d'un dipôle. Ces théorèmes montrent qu'indépendamment de la charge, un réseau quelconque vu entre deux de ces points peut toujours être représenté par une source réelle de tension ou par une source réelle de courant.

1.6 Théorème du transfert maximal de puissance [8]

En génie électrique, le théorème de transfert de puissance maximum stipule que, pour obtenir une puissance externe maximale d'une source avec une résistance interne finie, la résistance de la charge doit être égale à la résistance de la source vue depuis ses bornes de sortie. Moritz von Jacobi a publié le théorème de puissance maximale (transfert) vers 1840; elle est également appelée « loi de Jacobi ».

Le théorème entraîne un transfert de puissance maximal à travers le circuit, et non une efficacité maximale. Si la résistance de la charge est rendue plus grande que la résistance de la source, le rendement est alors plus élevé, car un pourcentage plus élevé de la puissance de la source est transféré à la charge, mais l'amplitude de la puissance de charge est inférieure car la résistance totale du circuit augmente.

Si la résistance de charge est inférieure à la résistance de la source, alors la majeure partie de la puissance finit par être dissipée dans la source, et bien que la puissance totale dissipée soit plus élevée, en raison d'une résistance totale inférieure, il s'avère que la quantité dissipée dans la charge est réduite. Le théorème indique comment choisir (de manière à maximiser le transfert de puissance) la résistance de charge, une fois la résistance de la source donnée. C'est une idée fausse courante d'appliquer le théorème dans le scénario opposé. Il ne dit pas comment choisir la résistance de source pour une résistance de charge donnée. En fait, la résistance de source qui maximise le transfert de puissance d'une source de tension est toujours nulle, quelle que soit la valeur de la résistance de charge.

Le théorème peut être étendu aux circuits à courant alternatif qui incluent la réactance, et déclare que le transfert de puissance maximum se produit lorsque l'impédance de charge est égale au conjugué complexe de l'impédance de la source.

Dans un réseau électrique, le générateur est censé fournir l'énergie nécessaire à un récepteur qui l'accepte. Considérons le réseau élémentaire constitué d'un générateur réel de tension et d'une résistance de charge R_U .

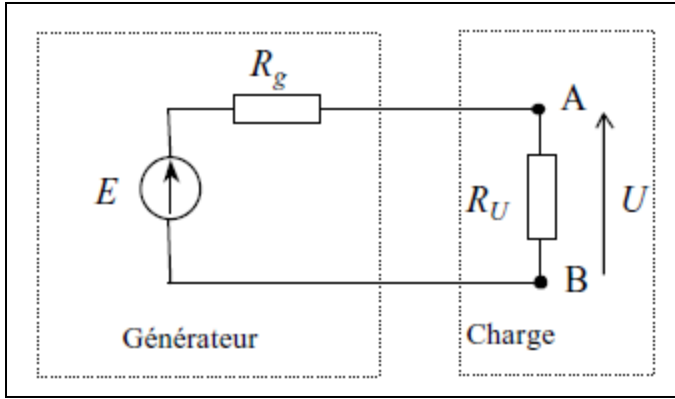


Figure 1.37 : Source de tension chargée par une résistance R_U .

En vertu du principe de la conservation de l'énergie, la puissance fournie par le générateur P_f est égale à la somme des puissances dissipées par toutes les résistances du circuit. Si nous appelons I l'intensité du courant électrique circulant dans cette maille, la puissance fournie par le générateur est égale à :

$$P = R \cdot U = R_g I^2 + R_U I^2 = (R_g + R_U) I^2 \quad (1.44)$$

Le dernier terme de l'expression précédente reflète la puissance utile P_U dissipée par la charge R_U , c'est donc la puissance que lui a transmise le générateur. Il va de soi que cette puissance est toujours inférieure à P_f . La différence entre la puissance transmise et la puissance fournie représente les pertes dans la résistance interne du générateur.

Comment faut-il choisir R_U vis-à-vis de R_g pour que la puissance transmise soit maximale ?

Nous cherchons la valeur optimale de la résistance d'utilisation $R_{U(opt)}$. Pour cela, calculons la puissance P_U en fonction de R_g :

$$\frac{dP_U}{dR_U} = \frac{E^2(R_g + R_U)^2 - E^2 R_U (2R_g + 2R_U)}{(R_g + R_U)^4} = \frac{E^2(R_g + R_U)(R_g + R_U - 2R_U)}{(R_g + R_U)^4} \quad (1.45)$$

Étudions la loi de variation de la puissance en calculant sa dérivée :

$$P_U = R_U \cdot I^2 = R_U \left(\frac{E}{R_g + R_U} \right)^2 \quad (1.46)$$

La puissance transmise est maximale (en mathématiques, nous disons que la courbe passe par un extremum) lorsque cette dérivée s'annule, c'est à dire pour $R_U = R_g$. Elle vaut alors :

$$P_{U(max)} = \frac{R_U.E^2}{(R_g+R_U)^2} = \frac{E^2}{4R_g^2} \quad (1.47)$$

L'énergie transmise pendant une durée de temps T est égale à : $W = P. T$.

