



Grain 2.1 : Systèmes électriques : rappels fondamentaux

BRUNO GAZENGEL ET STÉPHANE DURAND

Table des matières



I - Introduction	5
II - Testez vos prérequis	7
III - Définitions et conventions	11
A. Dipôles.....	11
1. Notion de dipôle.....	11
2. Conventions d'orientation courant-tension.....	11
B. Quadripôles.....	12
1. Notion de quadripôle.....	12
2. Conventions d'orientation.....	13
3. Relations entre conventions.....	14
4. Intérêt des conventions.....	14

C. Notation complexe en régime sinusoïdal.....	15
IV - Loi d'Ohm	17
V - Circuit RLC	19
A. Composition d'un circuit RLC.....	19
B. Réponse d'un circuit RLC, régime temporel.....	20
C. Réponse d'un circuit RLC, régime sinusoïdal.....	21
VI - Notion d'impédance	23
A. Notion d'impédance : définition.....	23
B. Admittance versus Impédance.....	24
C. Définitions.....	24
D. Couplage générateur - récepteur.....	25
VII - Quadripôles usuels	27
A. Equations de couplage.....	27
B. Le gyrateur.....	28
C. En savoir +.....	29
VIII - Analyse de circuits électriques	31
A. Lois de Kirchoff.....	31
B. Diviseur de tension.....	31
C. Diviseur de courant.....	32
D. Générateurs de Thévenin.....	33
E. Générateurs de Norton.....	33
IX - Conclusion	35
A. Synthèse des acquis.....	35
B. Testez vos connaissances.....	35
C. Exercice 1 : circuit RLC série.....	38
D. Exercice 2 : circuit RLC parallèle.....	38
X - Bibliographie	39

Introduction



Objectif

L'objectif de ce grain est de rappeler les lois traduisant le comportement des circuits électriques.

Prérequis

Connaître les notions de tension et de courant électriques et les composants électriques standards (résistance, inductance, capacitance).

Connaître les notations complexes en régime sinusoïdal (cf. *grain 1.2*¹).

Testez vos prérequis



Nous vous conseillons de tester vos prérequis. En cas d'échec au test, revoyez les notions de base (*grain 1.2²*) ou les prérequis.

Exercice 1 : Testez vos prérequis

Question 1

Quelle est l'unité pour la tension électrique u ?

Volt

Ampère

Coulomb

Watt

Faraday

Ohm

Joule

Question 2

Quelle est l'unité pour le courant i ?

Testez vos prérequis

Volt

Ampère

Coulomb

Watt

Faraday

Ohm

Joule

Question 3

Quelle est l'unité pour la charge électrique q ?

Volt

Ampère

Coulomb

Watt

Faraday

Ohm

Joule

Question 4

Lorsqu'un courant circule entre 2 points d'un conducteur :

- Il ne doit pas exister de différence de potentiel entre ces deux points
- Il doit exister de différence de potentiel entre ces deux points
- Il existe une circulation de charges électriques

Question 5

Quelle est la relation entre la charge électrique $q(t)$ et le courant $i(t)$?

- $i(t) = q(t)$
- $i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$
- $q(t) = \frac{di(t)}{dt}$
- $i(t) = \frac{d^2q(t)}{dt^2}$
- $q(t) = \frac{d^2i(t)}{dt^2}$
- $i(t) = \int q(t)dt$
- $q(t) = \int i(t)dt$

Définitions et conventions



Dipôles	11
Quadripôles	12
Notation complexe en régime sinusoïdal	15

A. Dipôles

1. Notion de dipôle

Le dipôle électrique est un composant électrique possédant deux bornes. Par exemple, les lampes, les interrupteurs, les générateurs, les piles, les résistances et les moteurs sont des dipôles. On distingue en général deux sortes de dipôles :

- Les générateurs qui peuvent produire du courant électrique : dipôles actifs,
- Les récepteurs qui reçoivent le courant électrique : dipôles passifs.



Dipole generateur ou actif



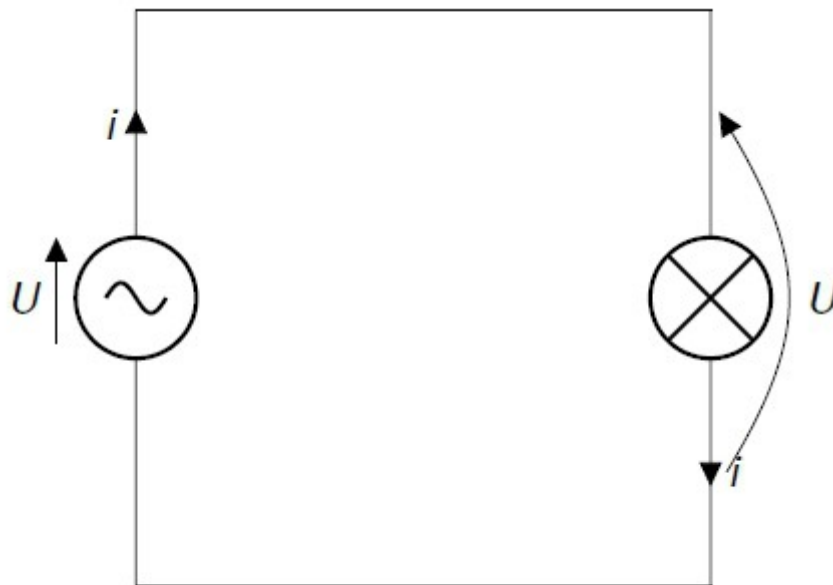
Dipôle récepteur ou passif

2. Conventions d'orientation courant-tension

Par convention, l'orientation de la tension et du courant est réalisée comme suit (cf. schéma ci-dessous) :

- pour les générateurs : la tension et le courant sont orientés dans le même sens (partie gauche du schéma),
- pour les récepteurs : la tension et le courant sont orientés en sens inverses

(partie droite du schéma).



Conventions d'orientation courant-tension

B. Quadripôles

1. Notion de quadripôle

Un quadripôle est un dispositif à deux accès (dits aussi ports), chaque accès (ou port) comportant deux pôles. Un quadripôle permet le transfert d'énergie entre deux dipôles connectés aux deux ports.

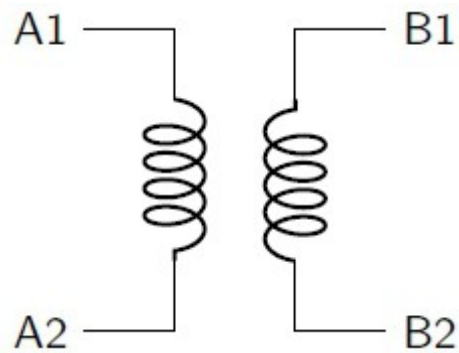
La description du comportement d'un quadripôle nécessite d'utiliser quatre grandeurs physiques :

- les tensions aux bornes des deux ports,
- les courants traversant à chaque port.



Exemple

Le transformateur électrique monophasé est un quadripôle.

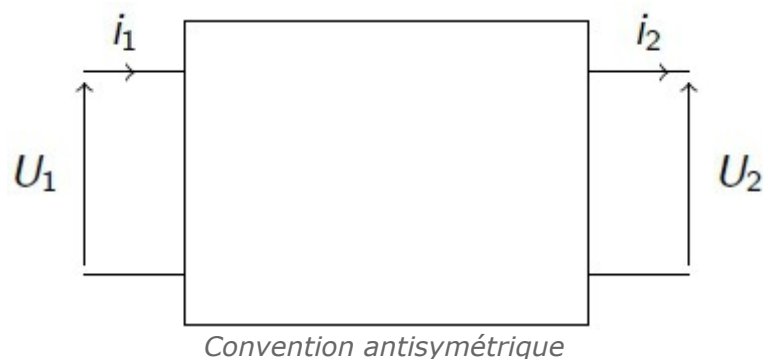
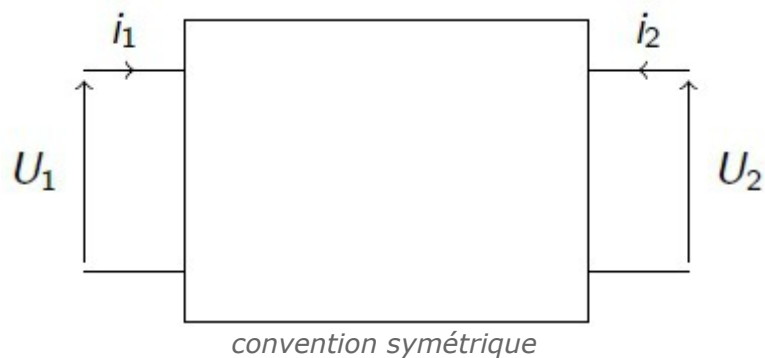


Transformateur électrique monophasé

2. Conventions d'orientation

Les conventions de représentation graphique d'un quadripôle sont au nombre de deux :

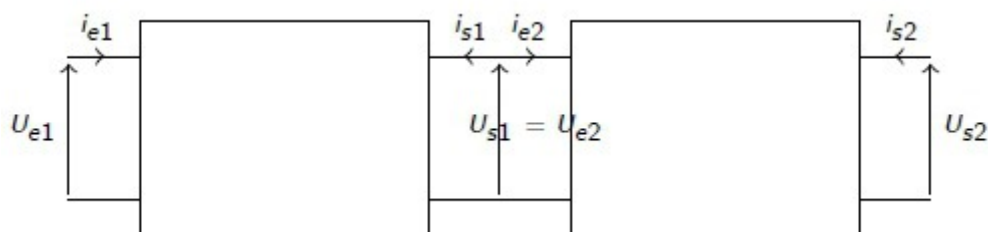
- convention symétrique : tous les courants sont entrants. La convention récepteur est utilisée à l'entrée et à la sortie du quadripôle (vu comme un récepteur en entrée et sortie) (cf. référence 6).
- convention antisymétrique : le quadripôle est vu comme un système avec une entrée et une sortie. Le courant à gauche entre dans le quadripôle et celui de droite sort du quadripôle. La convention récepteur est utilisée à l'entrée et la convention générateur à la sortie du quadripôle (vu comme un récepteur en entrée et comme un générateur en sortie) (cf. référence 6).



3. Relations entre conventions

Les deux conventions présentées ci-dessus affectent les lois de connexion entre quadripôles.

Convention symétrique

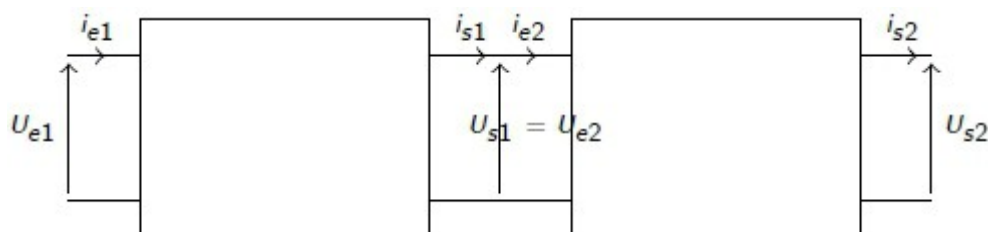


Convention symétrique

Dans cette convention, la somme des courants au noeud entre les deux quadripôles est nulle ($i_{s1} + i_{s2} = 0$) et les tensions sont égales ($U_{s1} = U_{e2}$). La matrice de

raccordement entre quadripôles s'écrit donc
$$\begin{pmatrix} U_{s1} \\ i_{s1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{e2} \\ i_{e2} \end{pmatrix}$$
.

Convention anti-symétrique



Convention anti-symétrique

Dans cette convention, la différence des courants au noeud entre les deux quadripôles est nulle ($i_{s1} - i_{s2} = 0$) et les tensions sont égales ($U_{s1} = U_{e2}$). La

matrice de raccordement entre quadripôle s'écrit donc
$$\begin{pmatrix} U_{s1} \\ i_{s1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{e2} \\ i_{e2} \end{pmatrix}$$
.

4. Intérêt des conventions

Convention symétrique

Elle est utilisée pour l'analyse des conversions d'énergie entre différents domaines (conversion électrique \Leftrightarrow mécanique et conversion mécanique \Leftrightarrow acoustique).

Cette convention montre que la somme des puissances injectées dans le quadripôle est nulle.

Convention antisymétrique

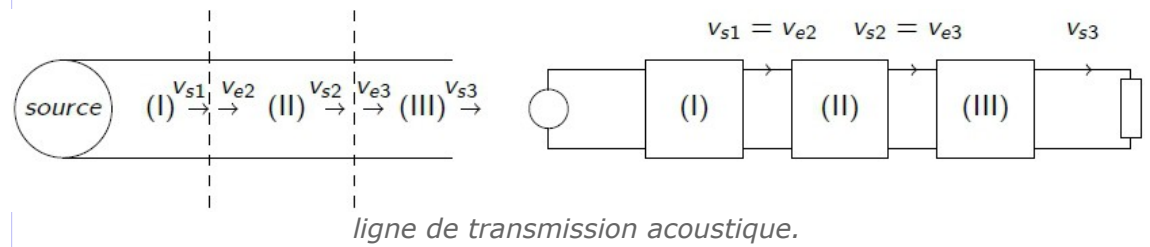
Pour les systèmes mécaniques ou acoustiques, pour lesquels on utilise une source en amont et un récepteur en aval, on préfère utiliser la convention anti-symétrique montrant une continuité dans le sens des vitesses.



Exemple : Ligne de transmission acoustique.

Le schéma de gauche montre le système acoustique réel et le schéma de droite montre le circuit électrique équivalent qui utilise trois quadripôles en convention

anti-symétrique.



C. Notation complexe en régime sinusoïdal

Rappels

Dans l'hypothèse où le courant et la tension dépendent du temps suivant une loi sinusoïdale, les variables s'écrivent

- pour la tension : $u(t) = u_m \cos(\omega t + \phi_u)$,
- pour le courant : $i(t) = i_m \cos(\omega t + \phi_i)$.

En notation complexe (cf. Grain 2.1, Rappels : notions de base), il vient

- pour la tension : $u(t) = u_m e^{j(\omega t + \phi_u)}$,
- pour le courant : $i(t) = i_m e^{j(\omega t + \phi_i)}$.

Les dérivées de la tension et du courant s'écrivent ainsi en notation complexe (cf. Grain 2.1, Rappels : notions de base)

- pour la tension : $\frac{du(t)}{dt} = j\omega u(t)$,
- pour le courant : $\frac{di(t)}{dt} = j\omega i(t)$.

Les intégrales de la tension et du courant s'écrivent ainsi en notation complexe (cf. Grain 2.1, Rappels : notions de base)

- pour la tension : $\int u(t) dt = \frac{u(t)}{j\omega}$,
- pour le courant : $\int i(t) dt = \frac{i(t)}{j\omega}$.

Loi d'Ohm

IV

Dans le cas d'une résistance électrique, la relation macroscopique entre la tension $u(t)$ et le courant $i(t)$ est la loi d'Ohm, donnée par

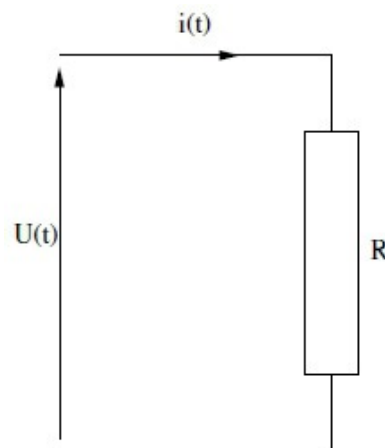
$$u(t) = Ri(t),$$

où R est la résistance exprimée en Ω (Ohms).



Complément

En réalité le passage du courant dans la résistance crée un échauffement par effet Joule qui entraîne une modification de la valeur de R . De fait, la résistance dépend du temps et devrait s'écrire en toute rigueur $R(t)$.



La puissance dissipée en chaleur par la résistance est donnée par

$$P_e(t) = u(t).i(t) = Ri(t)^2 = \frac{u(t)^2}{R} .$$

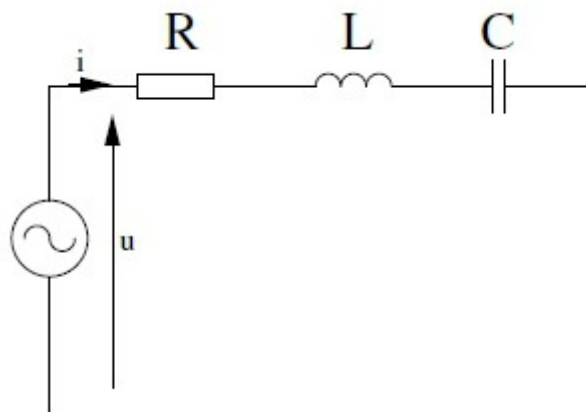
Circuit RLC

V

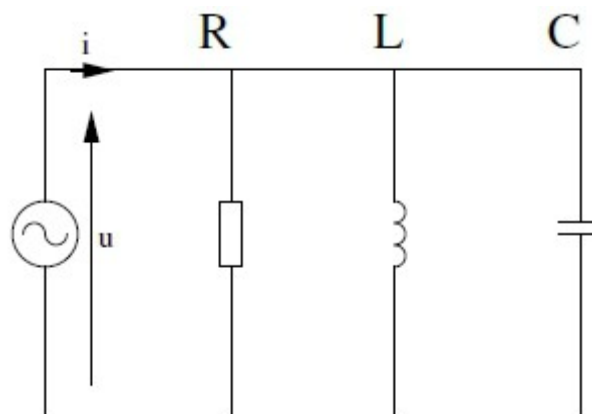
Composition d'un circuit RLC	19
Réponse d'un circuit RLC, régime temporel	20
Réponse d'un circuit RLC, régime sinusoïdal	21

A. Composition d'un circuit RLC

Le circuit RLC est composé d'une résistance R , d'une bobine (inductance) L et d'une capacité (capacitance) C . Ces composants peuvent être par exemple connectés en série ou en parallèle (cf figures ci-dessous).



Circuit RLC connecté en série

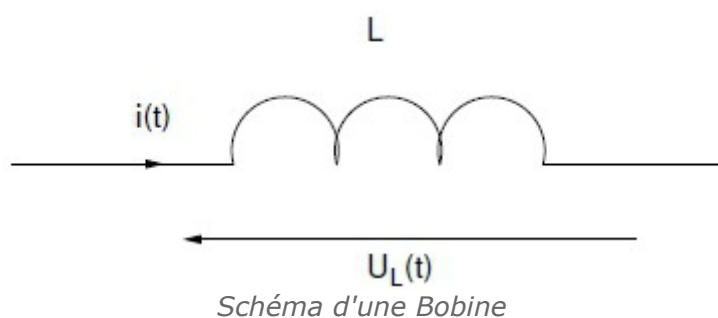


Circuit RLC connecté en parallèle

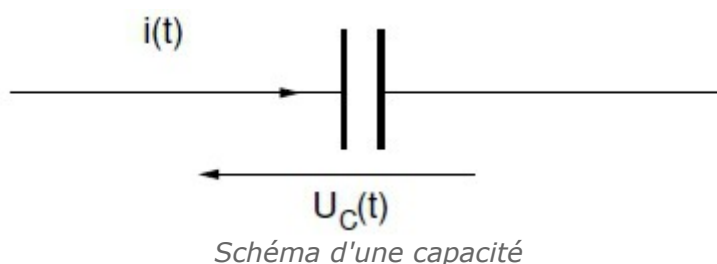
B. Réponse d'un circuit RLC, régime temporel

Les relations entre tension u et courant i pour les dipôles classiques (résistance, inductance, capacitance) s'écrivent dans le domaine temporel :

- $U_R(t) = Ri(t)$, où $i(t)$ est le courant traversant la résistance et $U_R(t)$ la tension bornes de la résistance.
- $u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$, où $i(t)$ est le courant traversant l'inductance et $u_L(t)$ la tension aux bornes de l'inductance,



- $i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}$, où $i(t)$ est le courant traversant la capacitance et $u^C(t)$ la tension aux bornes de la capacitance.



C. Réponse d'un circuit RLC, régime sinusoïdal

Dans l'hypothèse où le courant et la tension dépendent du temps suivant une loi sinusoïdale, la notation complexe permet d'écrire les relations suivantes

- Pour la résistance $u_R = Ri$, où u_R est la tension aux bornes de la résistance et i le courant traversant la résistance,
- Pour l'inductance $u_L = j\omega Li$, où u_L est la tension aux bornes de l'inductance et i le courant traversant l'inductance,
- Pour la capacitance $i = j\omega C u_C$, soit $u_C = \frac{i}{j\omega C}$, où u_C est la tension aux bornes de la capacitance et i le courant traversant la capacitance.

Notion d'impédance

VI

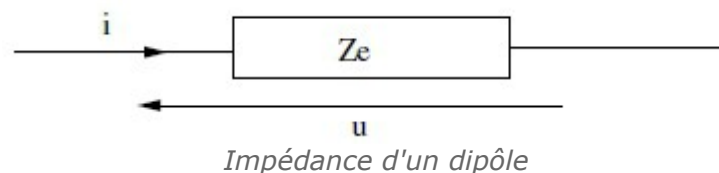
Notion d'impédance : définition	23
Admittance versus Impédance	24
Définitions	24
Couplage générateur - récepteur	25

A. Notion d'impédance : définition

En régime sinusoïdal le comportement des dipôles dépend de la fréquence. On définit l'impédance d'un dipôle électrique **en régime sinusoïdal** par :

$$Z_e = \frac{u}{i},$$

où i est le courant qui traverse le dipôle et u est la tension aux bornes du dipôle. L'impédance traduit la "réaction" du dipôle au passage du courant i .



L'impédance est un nombre complexe :

- L'amplitude de l'impédance traduit le rapport des amplitudes de la tension et du courant.
- La phase de l'impédance traduit le retard que possède la tension par rapport au courant.



Complément

http://ww2.ac-poitiers.fr/math_sp/img/pdf/impedance.pdf³

http://fr.wikipedia.org/wiki/Imp%C3%A9dance_%28%C3%A9lectricit%C3%A9%29⁴

http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M14_G01/co/Module_NLP_C_M14_G01_16.html⁵

<http://subaru.univ->

3 - http://ww2.ac-poitiers.fr/math_sp/img/pdf/impedance.pdf

4 - http://fr.wikipedia.org/wiki/Imp%C3%A9dance_%28%C3%A9lectricit%C3%A9%29

5 - http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M14_G01/co/Module_NLP_C_M14_G01_16.html

B. Admittance versus Impédance

L'admittance est définie comme l'inverse de l'impédance. L'admittance électrique Y_e s'écrit

$$Y_e = \frac{1}{Z_e}$$



Méthode : Cas d'utilisation de l'admittance

Dans le cas de deux dipôles connectés en parallèle, l'admittance équivalente aux deux dipôles Y_{eq} est la somme des admittances Y_1 et Y_2 de chacun des dipôles :

$$Y_{eq} = Y_1 + Y_2.$$



Méthode : Cas d'utilisation de l'impédance

Dans le cas de deux dipôles connectés en série, l'impédance équivalente aux deux dipôles Z_{eq} est la somme des impédances Z_1 et Z_2 de chacun des dipôles :

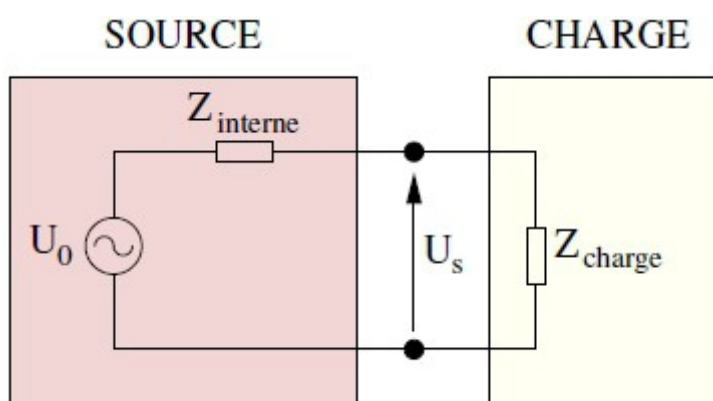
$$Z_{eq} = Z_1 + Z_2.$$

C. Définitions

Considérant la figure ci-dessous, on appelle :

- impédance de source l'impédance interne au générateur considérant que la source (de tension ou de courant) est idéale,
- impédance de charge l'impédance du récepteur.

L'impédance interne au générateur est l'impédance vue aux bornes du générateur lorsque la source est éteinte.



D. Couplage générateur - récepteur

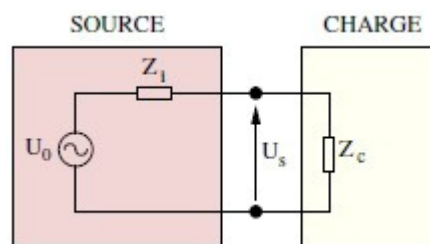
Dans le cas où un générateur (source) est connecté à une charge (récepteur), deux cas usuels existent.

Optimisation du rendement

On souhaite ici maximiser le rapport $\frac{U_s}{U_0}$ qui s'écrit $\frac{U_s}{U_0} = \frac{Z_c}{Z_c + Z_i}$. Dans ce cas, il faut que $Z_c \gg Z_i$ pour que $U_s \simeq U_0$.

Optimisation de la puissance transmise

On souhaite ici maximiser la puissance transmise du générateur au récepteur. Dans ce cas, on montre (ici⁷) qu'il faut respecter $Z_i = Z_c^*$, où Z_c^* est le complexe conjugué de Z_c .



Complément

On peut utiliser un transformateur pour modifier l'impédance apparente d'une charge et l'adapter à celle de la source pour maximiser le transfert de puissance.

7 - http://uel.unisciel.fr/physique/sinusoi/sinusoi_ch04/co/apprendre_ch4_06.html

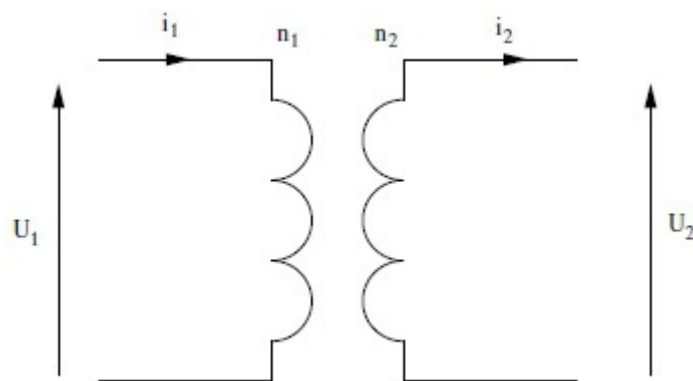
Quadripôles usuels

VII

Equations de couplage	27
Le gyrateur	28
En savoir +	29

A. Equations de couplage

Le schéma ci-dessous représente un transformateur virtuel sans aucune perte. Il est utilisé pour modéliser les transformateurs électriques réels ou d'autres effets de couplage en électroacoustique.



Transformateur virtuel

Les équations de comportement du transformateur idéal sont

$$n_1 i_1 = n_2 i_2,$$

$$\frac{u_1}{n_1} = \frac{u_2}{n_2},$$

où n_1 et n_2 représentent le nombre d'enroulements des circuits primaire (indice 1 sur la figure) et secondaires (indice 2 sur la figure).



Attention

L'impédance électrique

$$Z_1 = \frac{u_1}{i_1}$$

à l'entrée du transformateur s'écrit en fonction de l'impédance à la sortie $Z_2 = \frac{u_2}{i_2}$:

$$Z_1 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 Z_2$$



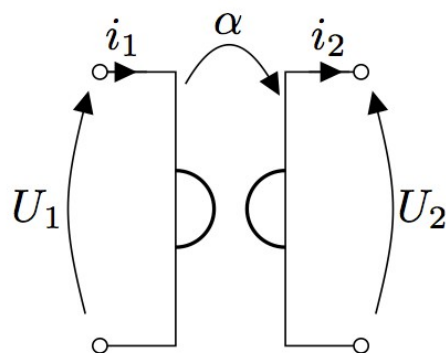
Complément

Une illustration du transformateur idéal est donnée sur *ce cours*⁸

B. Le gyrateur

Un gyrateur idéal est un quadripôle dont la tension d'entrée (respectivement de sortie) est directement proportionnelle au courant de sortie (respectivement d'entrée). Le coefficient de proportionnalité α est généralement appelé la "résistance de gyration". Dans le cadre de ce cours, nous parlerons de "facteur de couplage" (pour des raisons qui apparaîtront par la suite, cf. *grain 3.2*⁹).

Dans le cas d'une orientation anti-symétrique, un gyrateur est représenté sous la forme suivante :



le gyrateur

Les relations entre courants et tensions s'écrivent alors :

$$u_1 = \alpha i_2$$

$$u_2 = \alpha i_1$$

où n_1 et n_2 représentent le nombre d'enroulements des circuits primaire (indice 1 sur la figure) et secondaires (indice 2 sur la figure).



Attention

L'impédance électrique $Z_1 = \frac{u_1}{i_1}$ à l'entrée du gyrateur s'écrit en fonction de l'admittance à la sortie $Y_2 = \frac{i_2}{u_2}$: $Z_1 = \alpha^2 Y_2$.

8 - http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M14_G02/co/Contenu_13.html

9 - [../Grain3.2/index.html](http://res-nlp.univ-lemans.fr/Grain3.2/index.html)

C. En savoir +

Des cours détaillés sur les quadripôles sont donnés à ces adresses

- http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/cours_elec/quadripo.pdf¹⁰
- http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M14_G02/co/Module_NLP_C_M14_G02.html¹¹
- <http://www.clubeea.org/uploader/mediatheque/Cours-Eln-Muret-Chap6-p217-340.pdf>¹²

10 - http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/cours_elec/quadripo.pdf

11 - http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M14_G02/co/Module_NLP_C_M14_G02.html

12 - <http://www.clubeea.org/uploader/mediatheque/Cours-Eln-Muret-Chap6-p217-340.pdf>

Analyse de circuits électriques

VIII

Lois de Kirchoff	31
Diviseur de tension	31
Diviseur de courant	32
Générateurs de Thévenin	33
Générateurs de Norton	33

A. Lois de Kirchoff

Dans un circuit, il est possible de calculer les différences de potentiel aux bornes de chaque résistance et l'intensité du courant continu dans chaque branche de circuit en appliquant les deux lois de Kirchoff : la loi des noeuds et la loi des mailles.



Complément

*Plus d'information*¹³

Le théorème de Millman est une forme particulière de la loi des noeuds exprimée en termes de potentiel.



Complément

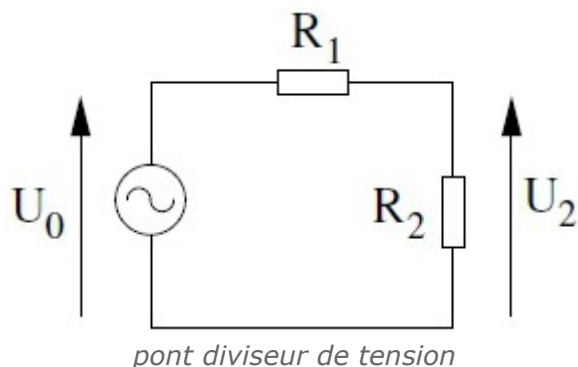
*Plus d'information*¹⁴

B. Diviseur de tension

Le diviseur de tension est un montage électronique simple qui permet de diviser une tension d'entrée par une valeur constante déterminée par les valeurs de résistances. Un circuit constitué de deux résistances connectées en série est par exemple un montage élémentaire qui peut réaliser cette opération.

13 - <http://subaru.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/electri/kirchhoff.html>

14 - http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/cours_elec/millman.html



$$U_2 = U_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

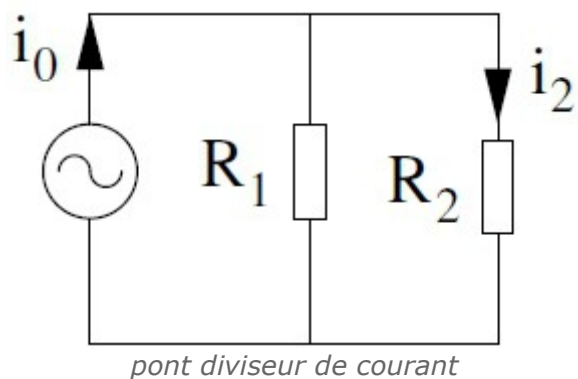


Complément

Plus d'information sur le diviseur de tension [ici](#)¹⁵

C. Diviseur de courant

Le diviseur de courant est un montage électronique simple qui permet de diviser un courant d'entrée par une valeur constante déterminée par les valeurs de résistances. Un circuit constitué de deux résistances connectées en parallèle est par exemple un montage élémentaire qui peut réaliser cette opération.



$$i_2 = i_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



Complément

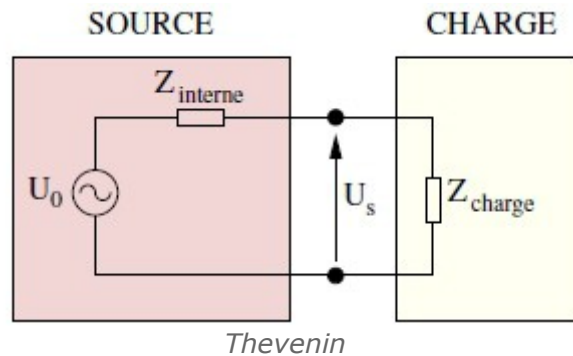
Plus d'information sur le diviseur de courant [ici](#)¹⁶

15 - <http://subaru.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/electro/potar.html>

16 - http://fr.wikipedia.org/wiki/Diviseur_de_courant

D. Générateurs de Thévenin

La notion de générateur de Thévenin équivalent permet de représenter une source électrique par une source idéale de tension U_0 connectée en série à une impédance $Z_{interne}$ interne traduisant la difficulté qu'à la source à conserver la tension de sortie U_s constante en présence d'une charge Z_{charge} .

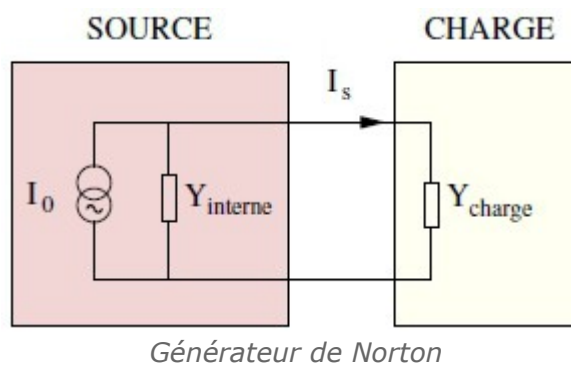


Complément

Plus d'information sur le générateur de Thévenin [ici](#)¹⁷

E. Générateurs de Norton

La notion de générateur de Norton équivalent permet de représenter une source électrique par une source idéale de courant I_0 connectée en parallèle à une admittance $Y_{interne}$ interne traduisant la difficulté qu'à la source à conserver le courant de sortie I_s constant en présence d'une charge Y_{charge} .



Complément

Plus d'information sur le générateur de Norton [ici](#)¹⁸

17 - <http://subaru.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/electri/thevenin.html>

18 - <http://subaru.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/electri/norton.html>

Conclusion



IX

Synthèse des acquis	35
Testez vos connaissances	35
Exercice 1 : circuit RLC série	38
Exercice 2 : circuit RLC parallèle	38

A. Synthèse des acquis

- Les grandeurs physiques mises en jeu sont la tension u et le courant i .
- Les relations entre éléments électriques de base sont les suivantes (en notations complexes) :
 - Aux bornes d'une résistance : la relation entre tension et courant est une relation de proportionnalité $u = Ri$.
 - Aux bornes d'une inductance : la relation entre tension et courant est une relation de dérivation $u = j\omega Li$.
 - Aux bornes d'une capacitance : la relation entre tension et courant est une relation d'intégration $u = \frac{i}{j\omega C}$.
- L'impédance d'un système électrique traduit la réaction du système (tension aux bornes du système) au passage d'un courant. L'impédance est un nombre complexe (amplitude, phase) dépendant de la fréquence.
- L'admittance est définie comme l'inverse de l'impédance.
- Les quadripôles usuels de l'électroacoustique sont le transformateur idéal et le gyrateur.

B. Testez vos connaissances

Exercice 1 : Testez vos connaissances

Question 1

Pour une inductance L , la relation entre tension u et courant i est

Conclusion

$u = j\omega Li$

$u = Li$

$u = \frac{i}{j\omega}$

Question 2

L'impédance d'un dipôle

est toujours un nombre réel

peut être un nombre imaginaire pur

est le rapport du courant et de la tension

est le rapport de la tension et du courant

ne dépend pas de la fréquence

Question 3

Soit l'association de deux résistances de même valeur R **en série**, indiquer la valeur de **l'impédance** totale

$R/2$

R

$2R$

Question 4

Soit l'association de deux résistances de même valeur R **en parallèle**, indiquer la valeur de **l'impédance** totale

$R/2$

R

$2R$

Question 5

Soit l'association de deux inductances de même valeur L **en série**, indiquer la

valeur de **l'impédance** totale

$L/2$

L

$2L$

Question 6

Soit l'association de deux inductances de même valeur L **en parallèle**, indiquer la valeur de **l'impédance** totale

$L/2$

L

$2L$

Question 7

Soit l'association de deux inductances de même valeur C **en série**, indiquer la valeur de **l'impédance** totale

$C/2$

C

$2C$

Question 8

Soit l'association de deux inductances de même valeur C **en parallèle**, indiquer la valeur de **l'impédance** totale

$C/2$

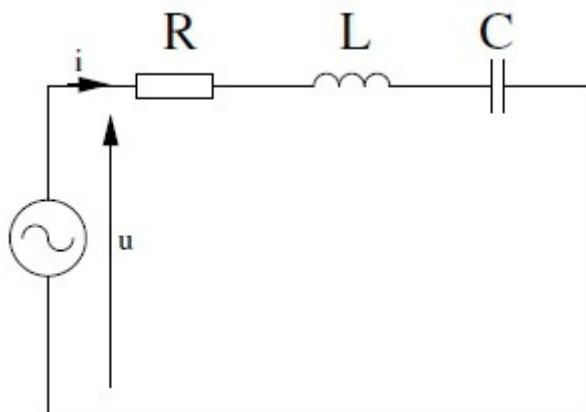
C

$2C$

C. Exercice 1 : circuit RLC série

Question

Considérant le circuit électrique de la figure ci-dessous, écrire l'expression analytique de l'impédance électrique $Z_e = \frac{u}{i}$ du dipôle constitué des trois éléments R , L et C connectés en série.

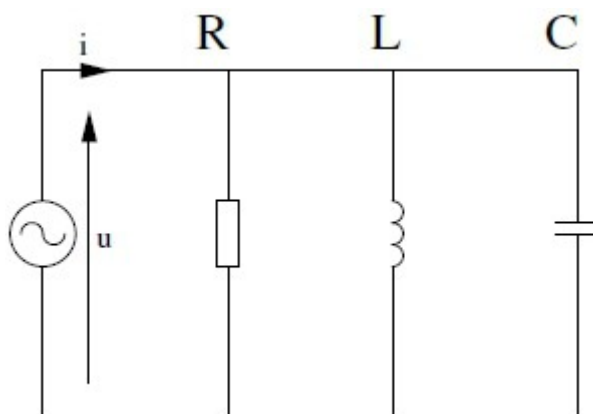


Circuit RLC connecté en série

D. Exercice 2 : circuit RLC parallèle

Question

Considérant le circuit électrique de la figure ci-dessous, écrire l'expression analytique de l'admittance électrique $Y_e = \frac{i}{u}$ du dipôle constitué des trois éléments R , L et C connectés en parallèle. En déduire l'expression de l'impédance



Circuit RLC connecté en parallèle

Bibliographie



X

- Jean Jacques Rousseau, Compléments d'électrocinétique, Université du Maine¹⁹
- M. Vindevoghel, M. Domon, *Electrocinétique 2 : Régime sinusoïdal permanent, cours en ligne Unisciel*²⁰
- J.J. Rousseau, *Physique et simulations numériques* ²¹
- J.J. Rousseau, quadripôles électriques²²
- Two port network, *Wikipedia*²³
- Pierre Muret, Systèmes linéaires à temps continu : quadripôles, filtrage et synthèse des filtres, Université Joseph Fourier, Grenoble²⁴

19 - http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M14_G02/co/NLP_C_M14_G02_web.html

20 - <http://uel.unisciel.fr/physique/sinusoi/sinusoi/co/sinusoi.html>

21 - <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/electri/rlcserie.html>

22 - http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/cours_elec/quadripo.pdf

23 - http://en.wikipedia.org/wiki/Two-port_network

24 - <http://www.clubeea.org/uploader/mediatheque/Cours-Eln-Muret-Chap6-p217-340.pdf>