

Electricité générale

I - Lois générales

- 1- Introduction
- 2- Grandeurs fondamentales
- 3- loi d'ohm

II - Analyse des circuits en courant continu

- 1- Les lois de Kirchhoff
- 2- Théorèmes fondamentaux

III - Analyse des circuits en régime sinusoïdal.

- 1- Caractéristiques d'une grandeur sinusoïdale
- 2- La loi d'ohm généralisée
- 3- Etude de circuit
- 4- Puissance en régime sinusoïdal
- 5- Superposition de sources continues et alternatives

Chapitre 1: Lois générales

I - Introduction

II - Grandeurs électriques fondamentales

2.1) charge électrique

appelée $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

charge d'un proton : $+q$ / charge d'un électron : $-q$

types de matériaux électriques :

- conducteurs : nombreuses électrons libres (métaux)
- semi-conducteurs : cf cours "de l'atome à la puce"
- isolants : peu d'e libres (verre, plastique)

2.2) Courant électrique

Les électrons vont du $\ominus$ vers le $\oplus$.

Par convention le sens du courant est opposé à celui des électrons.

L'intensité $i = \frac{dq}{dt}$ (exprimé en ampères)

2.3) Tension

Une charge q placée en un point où le potentiel est v possède une énergie ~~potentielle~~ $w = qv$

v : volt

q : coulomb

|||||

La tension U entre 2 points A et B d'un circuit est la différence de potentiel entre ces 2 points

$$U = V_a - V_b$$



2.4) Energie puissance

$$dW = dq (V_A - V_B)$$

$$= dq U$$

$$= i \cdot u \, dt \quad (\text{en Joules})$$

si la charge gagne de l'énergie l'élément est dit générateur.
receveur si perd.

l'énergie échangée au cours d'un intervalle de temps T
est égale à $W = \int_0^T u \cdot i \cdot dt$

La puissance est un débit d'énergie
donc $p = \frac{dW}{dt} = U \cdot i$ (en Watts)

II - Lois d'ohm

3.1) Résistance

Dans tout matériau il existe une force qui s'oppose au déplacement des charges. Cette force résulte des choc entre les atomes. R est la résistance du matériau exprimée en ohms et $R = \rho \frac{l}{S}$
 ρ est la résistivité du matériau en $\Omega \cdot m$
 l est la longueur et S la surface de la section

3.2) Loi d'ohm

$$U_{AB} = R i_{AB} = V_A - V_B$$

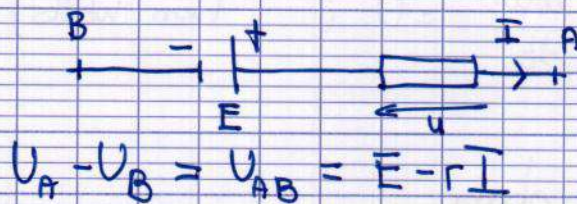
3.3) Effet Joule

La circulation d'énergie dans une résistance provoque un dégagement de chaleur. la puissance est dissipée par effet Joule sous forme d'énergie thermique et
 $P = R i^2$.

3.4) Générateurs

C'est une source d'énergie électrique qui délivre un courant I lié à sa force électromotrice E .

ex: générateur à courant continu



ex2: groupement de générateurs en série

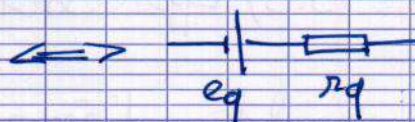
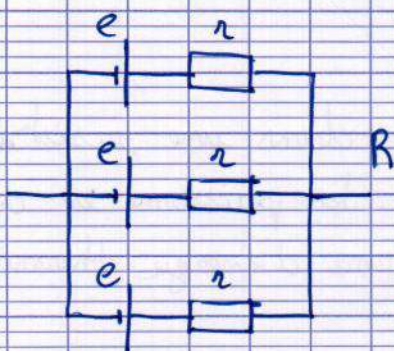


$$e_q = e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_m$$

$$r_q = r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_m$$



ex3: groupement parallèle



$$e_q = e$$

$$r_q = \frac{r}{m}$$

3.5) Récepteur

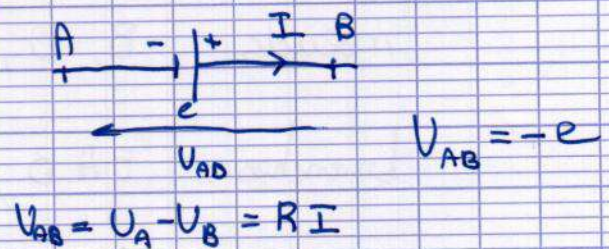
C'est un conducteur capable d'emmagasiner ou de transformer l'énergie électrique qu'il reçoit ou d'autres formes d'énergie (ex: moteur)

Convention courant-tension :

ex: une résistance



ex: générateur



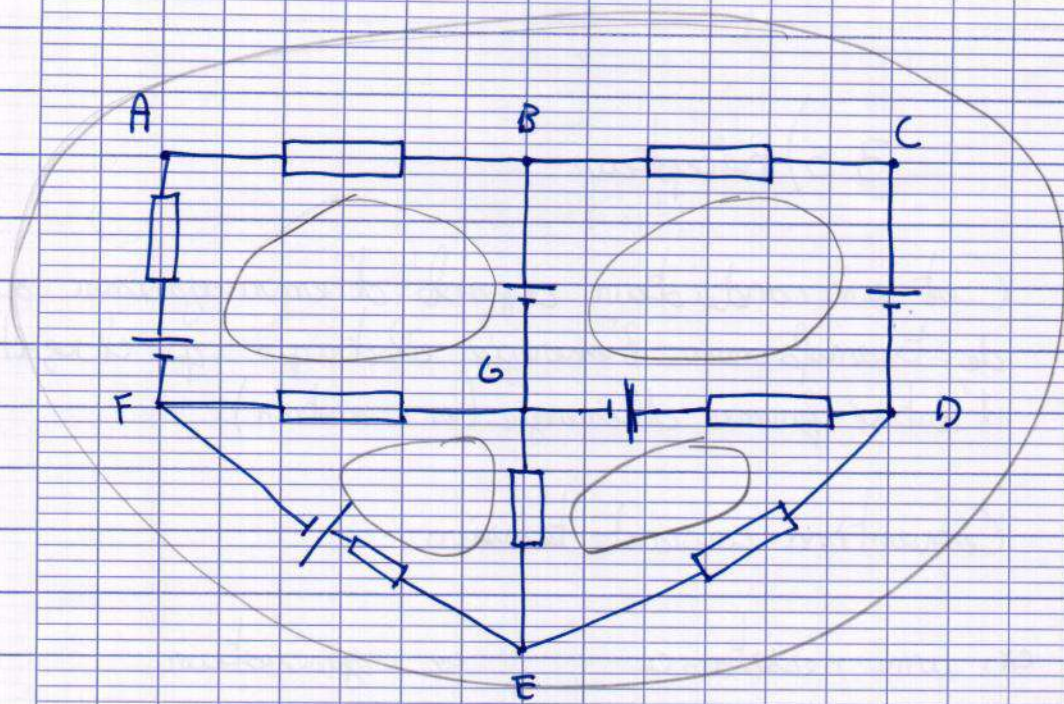
Chapitre III: Analyse de circuits en courant continu

~~I - Loi de Kirchhoff~~

I - Loi de Kirchhoff

1.1) Définition

Une branche est une portion de circuit non bifurquée joignant 2 nœuds. Un nœud est un point de jonction de 3 conducteurs ou moins. Une maille est un parcours fermé constitué de branches successives.



nœuds : B, D, E, F, G

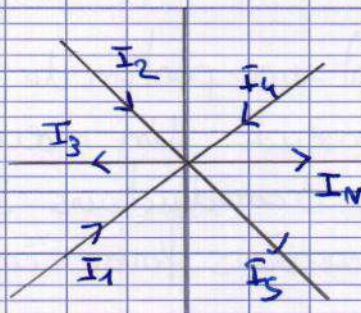
branches : FAB, BCD, BG, GE, DE, FE, FG, GD

⊙ : mailles.

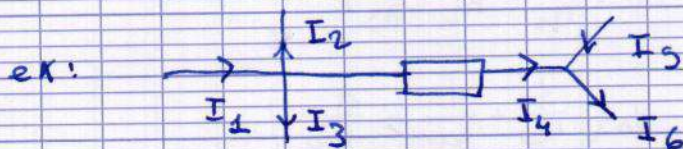
1.2) Lois de Kirchhoff pour les nœuds

La somme des courants qui arrivent à un nœuds et égale à la somme des courants qui en partent

$$\sum I_{\text{entrant}} = \sum I_{\text{sortant}}$$



$$I_2 + I_4 + I_1 = I_3 + I_5 + I_5$$



Calculer I_3 et I_4 sachant que $I_1 = 6A$ $I_5 = 11A$
 $I_2 = 1A$ $I_6 = 13A$

$$I_4 + I_5 = I_6$$

$$I_4 + 11 = 13$$

$$I_4 = 2A$$

$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4$$

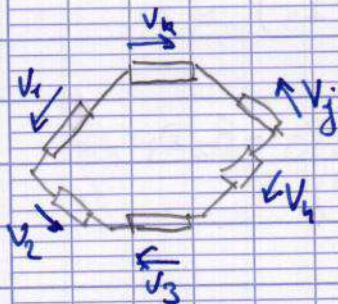
$$6 = 1 + I_3 + 2$$

$$I_3 = 3A$$

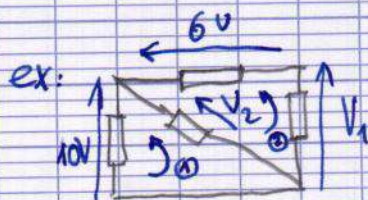
2.3) Loi de Kirchhoff pour les mailles

La somme algébrique des différences de potentiel le long d'une maille est nulle

$$\sum U_{\text{maille}} = 0$$



$$V_1 + V_2 - V_3 - V_4 + V_5 - V_6 = 0$$

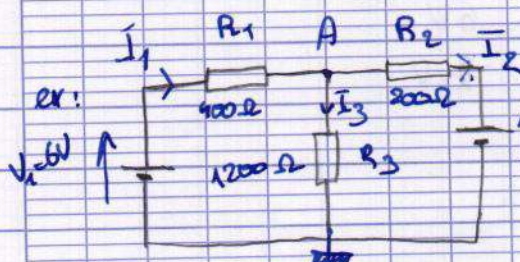


Dans la maille 1 :

$$V_2 - 10 = 0 \Leftrightarrow V_2 = 10V$$

Dans la maille 2 :

$$V_1 + 6 - V_2 = 0 \Leftrightarrow V_1 = 4V$$



→ Calculer V_A

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$\frac{V_1 - V_A}{R_1} = \frac{V_A - V_2}{R_2} + \frac{V_A - 0}{R_3}$$

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} = \frac{V_A}{R_1} + \frac{V_A}{R_2} + \frac{V_A}{R_3}$$

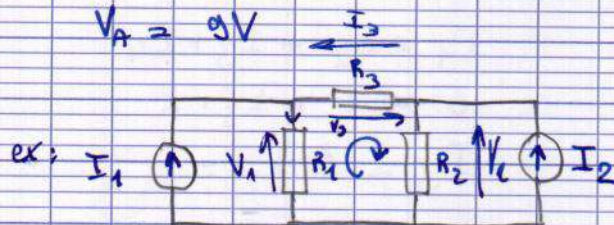
ou alors

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} = V_A \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

$$\frac{6}{400} + \frac{12}{200} = V_A \left(\frac{1}{400} + \frac{1}{200} + \frac{1}{1200} \right)$$

$$\frac{3}{40} = \frac{V_A}{120}$$

$$V_A = 9V$$



$$I_1 = 4 \text{ mA}$$

$$R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$I_2 = 12 \text{ mA}$$

$$R_3 = 2 \text{ k}\Omega$$

1. En prenant I_3 en inconnue calculer la loi des mailles
2. En déduire la valeur de l'intensité dans chaque résistance
3. Calcul des tensions aux bornes de R_1 et R_2

$$\hookrightarrow 1) V_1 + V_3 - V_2 = 0$$

$$R_1(I_1 + I_3) + R_3 I_3 - R_2(I_2 - I_3) = 0$$

$$\hookrightarrow 2) R_1 I_1 - R_2 I_2 = -R_1 I_3 - R_3 I_3 - R_2 I_3$$

$$4 - 12 = I_3 (-4 \cdot 10^3)$$

$$I_3 = 2 \text{ mA} = I_{R_3}$$

$$I_{R_1} = I_1 + I_3 = 6 \text{ mA}$$

$$I_{R_2} = I_2 - I_3 = 10 \text{ mA}$$

$$\hookrightarrow 3) V_1 = R_1(I_1 + I_3) = 400(4 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3})$$

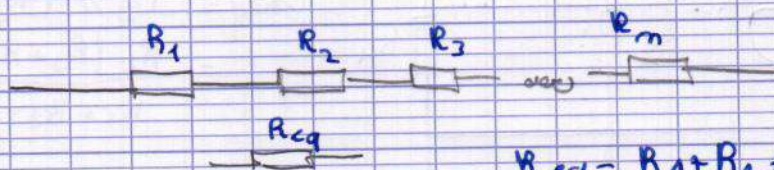
$$= 6V$$

$$V_2 = R_2(I_2 - I_3) = 10V$$

1.4) Résistances en série

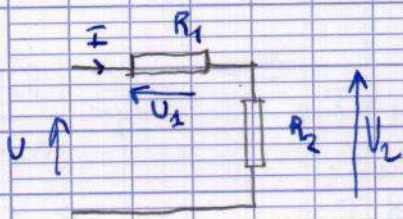
Deux dipôles sont en série quand ils ont une borne commune et sont traversés par le même courant.

N résistances en série peuvent être remplacées par une résistance dite équivalente égale à la somme des N résistances.



$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_m$$

1.5) Règle du diviseur de tension



$$U = (R_1 + R_2) I$$

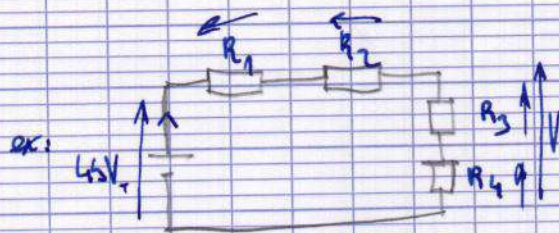
$$U_2 = R_2 I$$

$$U_1 = R_1 I$$

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

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

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U$$



$$R_1 = 3 \Omega$$

$$R_2 = 2 \Omega$$

$$R_3 = 4 \Omega$$

$$R_4 = 6 \Omega$$

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} V_T = 9V$$

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} V_T = 6V$$

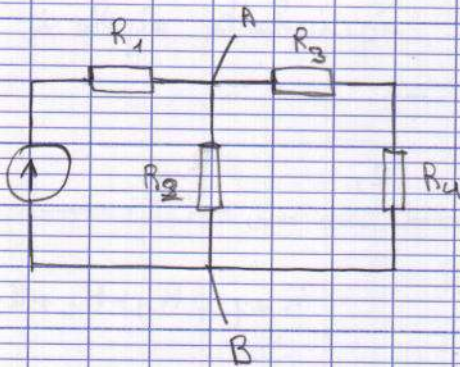
$$V_3 = \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} V_T = 30V$$

1.6) Résistances en parallèle

Des dipôles sont dits en parallèle quand ils ont 2 bornes communes et qu'ils ont la même tension à leurs bornes.

N résistances en parallèles peuvent être remplacées par une résistance équivalente $R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$

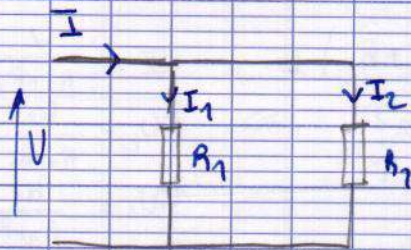
ex:



$$R_{eq} = R_2 \parallel (R_3 + R_4)$$

$$= \frac{R_2 (R_3 + R_4)}{R_2 + R_3 + R_4}$$

1.7) Règle du diviseur de courant



$$I = I_1 + I_2$$

$$V = R_1 I_1$$

$$V = R_2 I_2$$

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V = R_{eq} I$$



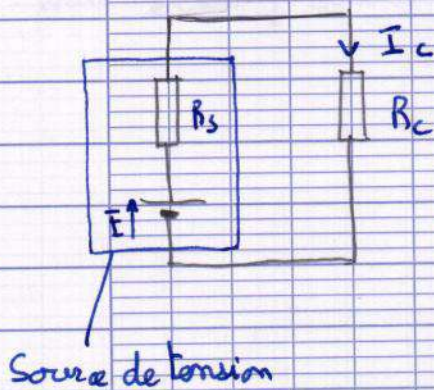
$$I_1 = \frac{R_2 I}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = \frac{R_1 I}{R_1 + R_2}$$

1.8) Transposition des sources

Source de tension: c'est une source qui à ses bornes délivre une différence de potentiel constante quel que soit le courant délivré.

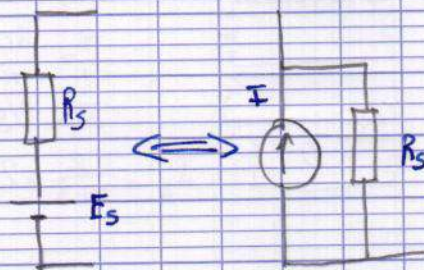
Source de courant: source qui débite un courant constant quel-que-soit la tension à ses bornes.



$$I_c = \frac{E}{R_s + R_c} = \frac{E \left(\frac{R_c}{R_s} \right)}{R_s + R_c} = \left(\frac{E}{R_s} \right) \frac{R_s}{R_s + R_c}$$



Source de courant



$$I = \frac{E}{R_s}$$

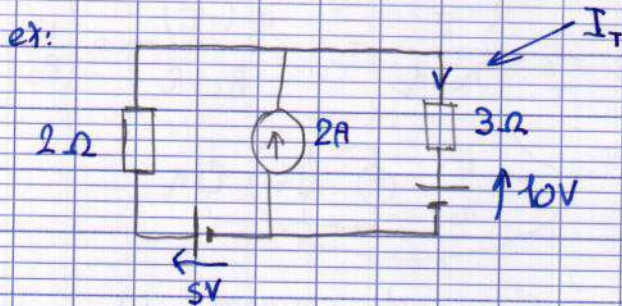
II - Théorèmes généraux

2.1) Théorème de superposition (de Helmholtz)

Dans un réseau linéaire le courant (ou la tension) créé dans une branche par plusieurs sources indépendantes agissant simultanément est égale à la somme des courants (ou des tensions) produits dans cette même branche par les différentes sources agissant isolément.

Méthode: On a un circuit de n sources de tensions ou de courants
 1) On garde 1 seule source en éliminant les $n-1$ autres
 ↳ éliminer une source implique court-circuiter les sources de tension remplacer par un circuit ouvert les sources de courant
 2) On calcule les grandeurs entre les bornes demandées

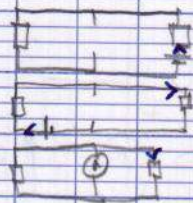
- 3) On refait la même procédure avec chaque source
 4) On calcule le courant ou la tension totale ou le courant total est la somme algébrique de tous les courants ou tensions calculées précédemment.



↳ 1) On garde 10V :

↳ 2) On garde 5V :

↳ 3) On garde 2A :

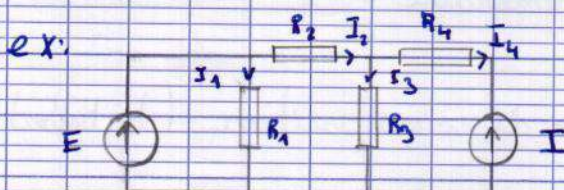


$$I_1 = \frac{10}{5} = 2 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{5}{5} = 1 \text{ A}$$

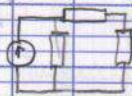
$$I_3 = \frac{2}{2+3} \times 2 = 4/5 \text{ A}$$

$$\Rightarrow I_T = -I_1 + I_2 + I_3 = -2 + 1 + 0,8 = -0,2 \text{ A}$$



→ Calculer I_4

↳ On enlève I :



$$I_2 = I_3 = \frac{E}{R_{eq}} = \frac{E}{R_2 + R_3}$$

↳ On court-circuite E :



$$I_2 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} I \quad \text{et} \quad I_3 = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I$$

$$\Rightarrow I_{2\text{total}} = \frac{E}{R_2 + R_3} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} I$$

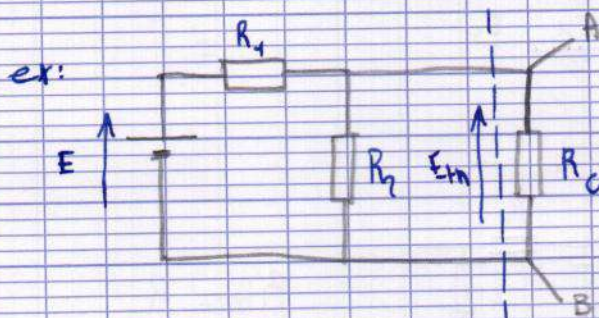
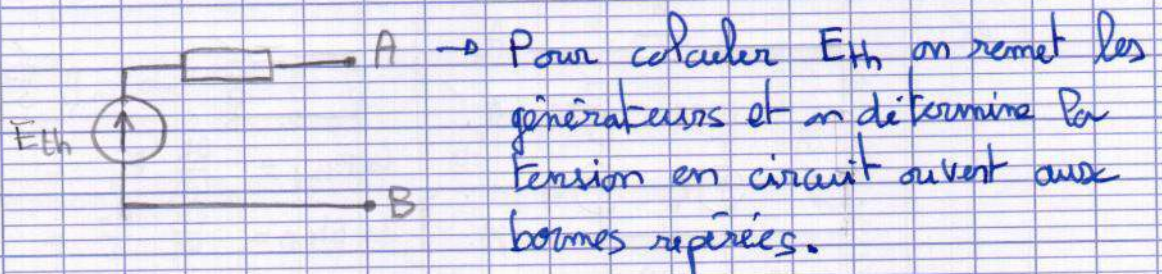
$$I_{3\text{total}} = \frac{E}{R_2 + R_3} + \frac{R_2}{R_2 + R_3} I$$

2.2) Théorème de Thevenin

Tout réseau linéaire bilatéral à deux bornes peut être remplacé par un générateur constitué d'une source de tension et d'une résistance en série avec cette source.

Méthode:

- On retire du réseau la branche à laquelle sera raccordé le générateur.
- On calcule la résistance R_{th} en court-circuitant les générateurs de tension et on laissant en circuit ouvert les générateurs de courant.

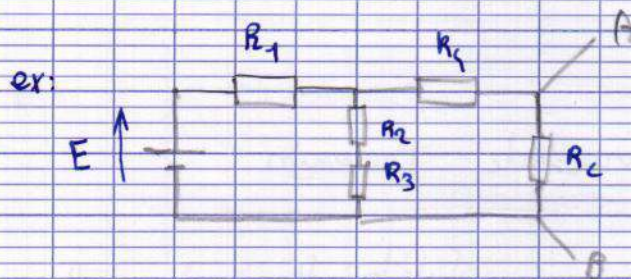


↳ On retire R_c , et on court-circuite E

$$R_{th} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

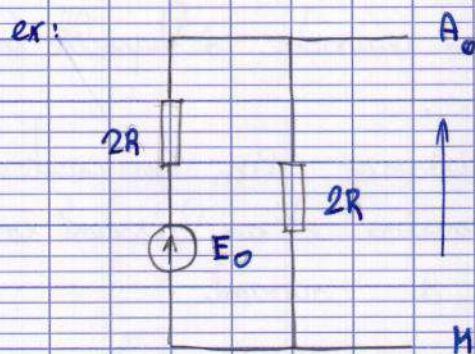
↳ On remet E et on calcule la tension aux bornes A et B :

$$E_{th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E$$



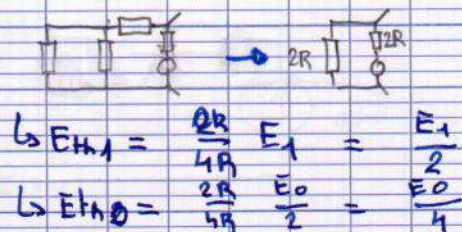
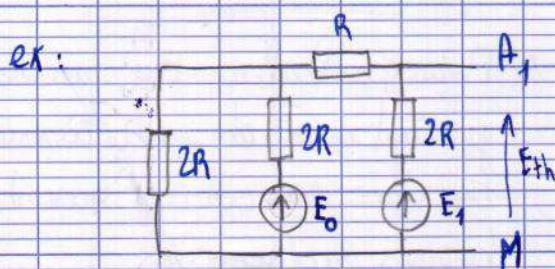
$$R_{th} = [R_1 // (R_2 + R_3)] + R_4$$

$$E_{th} = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \times E$$



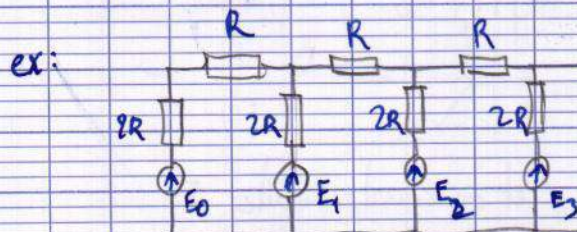
$$E_{th} = \frac{2R}{2R + 2R} \bar{E}_0$$

$$R_{th} = 2R // 2R = R$$



$$R_{th} = R$$

Done $E_{th} = \frac{E_1}{2} + \frac{E_0}{4}$



$$R_{th} = R$$

$$E_{th} = \frac{E_0}{16} + \frac{E_1}{8} + \frac{E_2}{4} + \frac{E_3}{2}$$

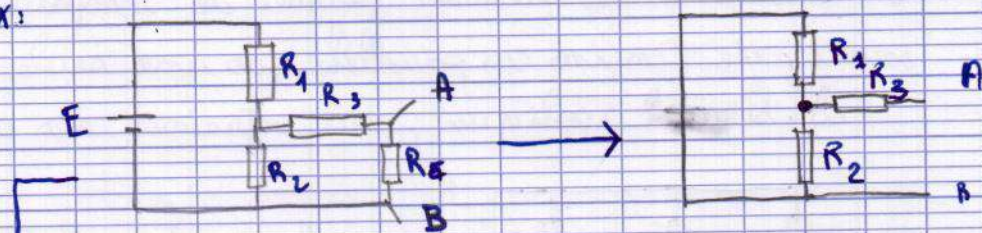
2.3) Théorème de Norton

Tout réseau linéaire bilatéral peut être remplacé par un générateur d'une source de courant et d'une résistance en parallèle avec cette source.

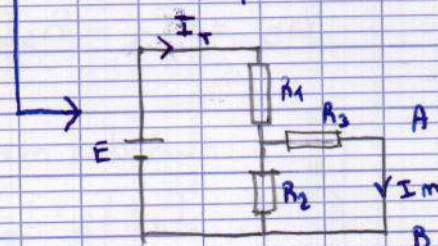
Méthode:

- On retire du réseau la branche à laquelle sera connecté le générateur
- On calcule R_m en court-circuitant les générateurs de tension et en enlevant les générateurs de courant
- On calcule I_m : on remet les sources et on calcule le courant en court-circuit en reliant les 2 bornes repérées.

ex:



$$R_m = (R_1 \parallel R_2) + R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3$$

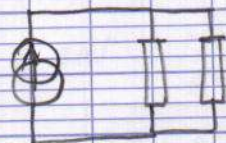


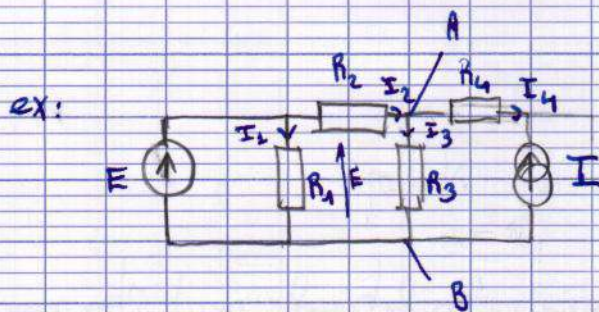
$$R_T = (R_1 + R_2) \parallel R_3$$

$$I_T = \frac{E}{R_T}$$

$$I_m = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I_T$$

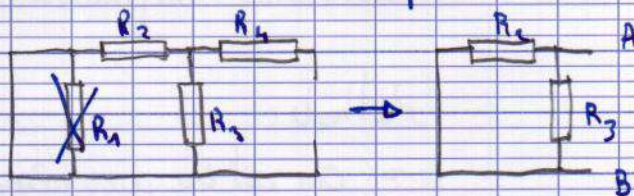
Donc :





→ Etablir le théorème de Norton entre les points A et B.

* Pour calculer R_m :



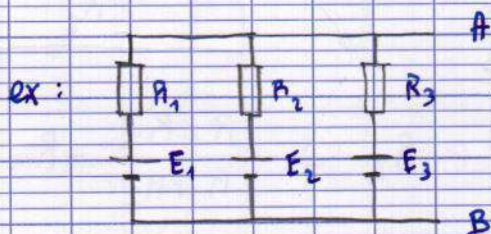
Donc $R_m = R_2 \parallel R_3$

* On calcule $I_3 = I_2 - I_4 = \frac{E}{R_2} + I$

2.4) Théorème de Millman

Le Théorème de Millman permet de remplacer plusieurs sources de tension en parallèle par une seule.

⚠ si mal appliqué, peut entraîner des erreurs.



$$V_{AB} = E_1 - R_1 I_1$$

$$V_{AB} = E_2 - R_2 I_2$$

$$V_{AB} = E_3 - R_3 I_3$$

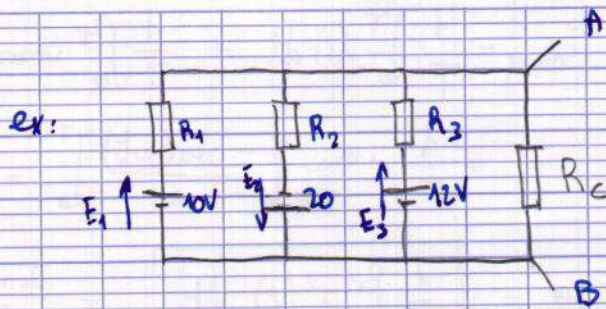
$$\Rightarrow \begin{aligned} I_1 &= \frac{E_1}{R_1} - \frac{V_{AB}}{R_1} \\ I_2 &= \frac{E_2}{R_2} - \frac{V_{AB}}{R_2} \\ I_3 &= \frac{E_3}{R_3} - \frac{V_{AB}}{R_3} \end{aligned}$$

Loi des nœuds
 $I_1 + I_2 + I_3 = 0$

On a donc: $\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3} - V_{AB} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = 0$

D'où:
$$V_{AB} = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

(généralisable à n sources)



$$R_1 = 2 \Omega$$

$$R_2 = 4 \Omega$$

$$R_3 = 8 \Omega$$

$$R_4 = 5 \Omega$$

$$V_{AB} = \frac{\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3} + \frac{0}{R_4}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{\frac{10}{2} - \frac{20}{4} + \frac{12}{8}}{\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{5}} = 0.00$$

Chapitre 3: Analyse des circuits en régime sinusoïdal

I- Caractéristique d'une grandeur sinusoïdale

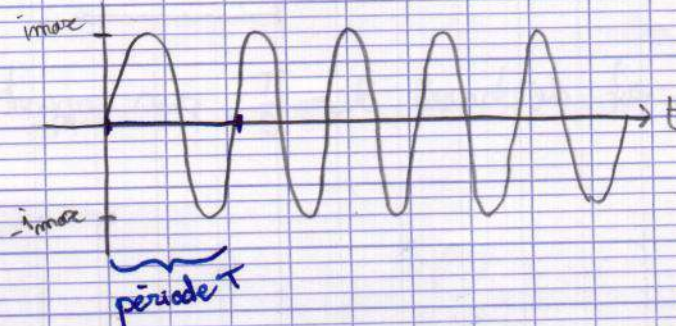
C'est un courant périodique dont la valeur moyenne de l'intensité est nulle sur une période.

1.1) Définitions

Un courant sinusoïdal est un courant périodique alternatif dont l'intensité instantanée est de la forme $i = i_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$.

- $\omega t + \varphi$ est la phase en radians
- ω la pulsation en rad.s^{-1}
- φ est la phase à l'origine

ex: $i = i_{\max} \sin(\omega t)$ ($\varphi = 0$)



fréquence $f = \frac{1}{T}$ (Hz)

$$\omega = 2\pi f$$

1.2)

Valeur moyenne: $i_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{max}} \sin(\omega t) dt$
 $= \frac{1}{T} i_{\text{max}} \left[-\frac{\cos(\omega t)}{\omega} \right]_0^T = 0$

1.3)

Valeur efficace: $I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$

La valeur efficace correspond au niveau d'un signal continu qui produirait la même dissipation par effet Joule.

II - Loi d'Ohm généralisée

2.1) Comportement d'une résistance

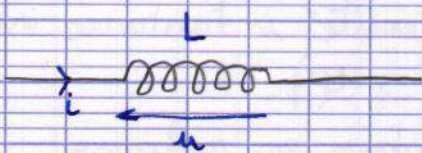


$$u_{\text{max}} = R i_{\text{max}}$$

$$u(t) = R i(t)$$

$$\text{effet Joule} = R i^2$$

2.2) Comportement d'une bobine d'auto-induction en courant alternatif



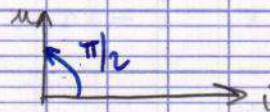
$$u = L \frac{di}{dt}$$

$$u = L \frac{d i_{\text{max}} \sin(\omega t)}{dt}$$

$$\text{Donc } u = L I_{\text{max}} \omega \cos(\omega t)$$

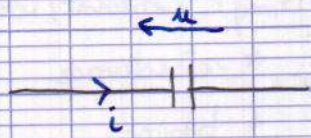
$$= L I_{\text{max}} \omega \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

Représentation de Fresnel :



La tension est déphasée de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à l'intensité

2.3) Comportement d'un condensateur en courant alternatif



$$i = C \frac{du}{dt} = C \frac{d U_{\max} \sin \omega t}{dt}$$

$$\begin{aligned} \text{Donc } i &= C \omega U_{\max} \cos(\omega t) \\ &= C \omega U_{\max} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{aligned}$$

La tension est déphasée de $-\frac{\pi}{2}$ par rapport à l'intensité.

2.4) Impédance d'un dipôle

Une résistance ou un condensateur soumis à une tension sinusoïdale sont le siège d'un courant sinusoïdal. Une bobine soumise à un courant sinusoïdal possède à ses bornes une tension sinusoïdale.

Dans tous les cas le rapport des valeurs efficaces de la tension et du courant est appelé impédance du composant.

On le note Z , mesuré en Ω

2.4.1) Impédance d'une résistance.

$$Z = \frac{u}{i} = R$$

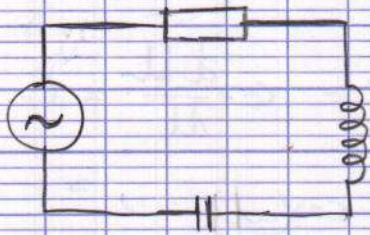
2.4.2) Impédance d'une bobine

$$Z = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = jL\omega$$

2.4.3) Impédance d'un condensateur

$$Z = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = -jC\omega = \frac{1}{jC\omega}$$

2.5) Composant RLC série



R_{mq} : courant/tension continue $\omega = 0$

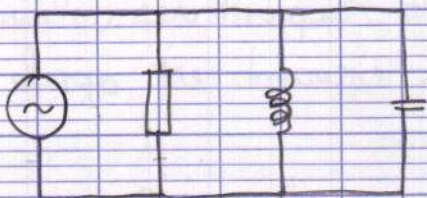
- * résistance $Z = R$
- * bobine $Z = 0$ (fil)
- * condensateur $Z \rightarrow \infty$ (int. ouvert)

$$\hookrightarrow Z = R + jL\omega + \frac{1}{jC\omega} = R + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

$$\varphi = \tan\left(\frac{\text{partie imaginaire}}{\text{partie réelle}}\right) = \tan\left(\frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}\right)$$

- * en série les impédances s'additionnent
- * en parallèle les $1/Z$ s'additionnent.



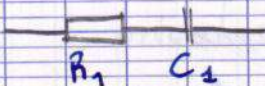
$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{jL\omega} + jC\omega$$

$$= \frac{jL\omega + R + jC\omega R jL\omega}{R jL\omega}$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq} = \frac{R jL\omega}{jL\omega + R - \omega^2 LC}$$

$\Rightarrow$ Exemples :

- * Calcul de l'impédance équivalente

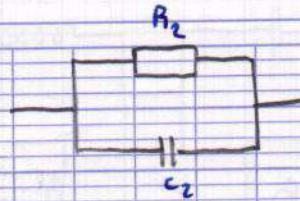


Donner l'expression de ω_1 pour partie réelle = partie im.
module absolue.

$$Z_R = R \text{ et } Z_C = \frac{1}{jC\omega} \quad \text{Donc } Z_1 = R_1 + \frac{1}{jC\omega}$$

$$\text{Donc } |Z_1| = \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}} \quad \Leftrightarrow \omega = \frac{1}{RC}$$

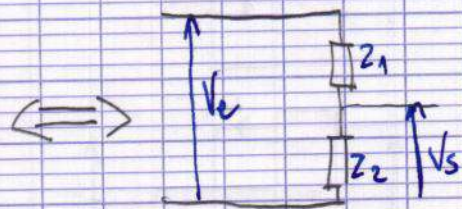
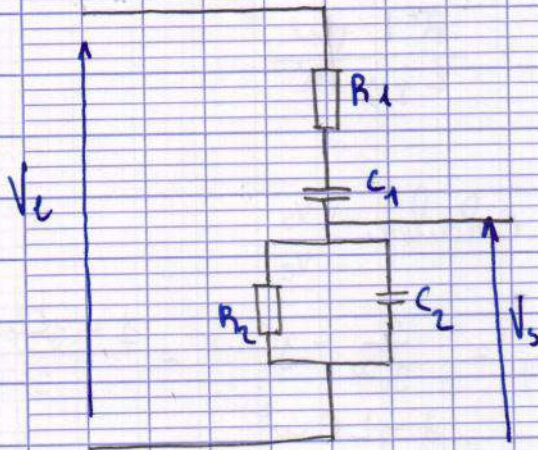
De même pour :



$$\text{On a } \frac{1}{Z_c} = \frac{1}{R_2} + jC_2\omega_c \Leftrightarrow Z_c = \frac{1 + R_2 jC_2\omega_c}{R_2} = \frac{R_2(1 - jR_2C_2\omega_c)}{1 + R_2C_2\omega_c}$$

$$\text{D'où } |R_2| = |1 - R_2C_2\omega_c| \Leftrightarrow \omega_c = \frac{1}{R_2C_2}$$

* Calculer $\frac{V_s}{V_c}$



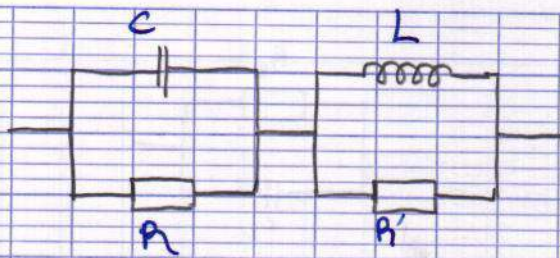
$$\text{On a donc } \frac{V_s}{V_c} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$= \frac{\frac{R_2}{1 + jR_2C_2\omega_c}}{R_1 + \frac{1}{jC_1\omega_c} + \frac{R_2}{1 + jR_2C_2\omega_c}} = \frac{\frac{R_2}{1 + jR_2C_2\omega_c}}{\frac{R_1C_1\omega_c + 1}{jC_1\omega_c} + \frac{R_2}{1 + jR_2C_2\omega_c}}$$

$$= \frac{R_2}{(jC_2R_2\omega_c)(jR_1C_1\omega_c + 1) + \frac{R_2C_1\omega_c}{jC_1\omega_c}}$$

$$= \frac{jR_2C_1\omega_c}{(1 + jC_2R_2\omega_c)(1 + jR_1C_1\omega_c) + R_2C_1\omega_c}$$

$$= \frac{jR_2C_1\omega_c}{1 + j\omega_c(R_2C_2 + R_1C_1 + R_2C_1) - R_2R_1C_2C_1\omega_c^2}$$

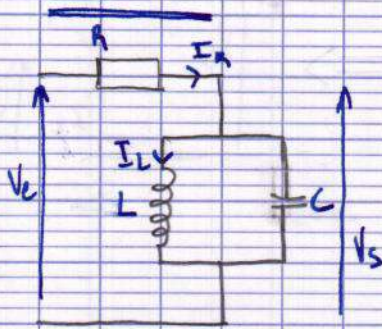


* Calculer $Z_{eq} = Z + Z'$

$$Z = \frac{R}{1 + jRC\omega}$$

$$Z' = \frac{Z_L Z_{R'}}{Z_L + Z_{R'}} = \frac{R' L j\omega}{L j\omega + R'}$$

$$\text{Donc } Z_{eq} = \frac{R}{1 + jRC\omega} + \frac{R' L j\omega}{L j\omega + R'}$$



* Calculer $\frac{V_s}{V_e}$

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{jL\omega} + jC\omega = \frac{1 + (jC\omega)(jL\omega)}{jL\omega} = \frac{1 - LC\omega^2}{jL\omega}$$

$$\text{D'où } Z_{eq} = \frac{jL\omega}{1 - LC\omega^2}$$

$$\begin{aligned} \frac{V_s}{V_e} &= \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R} = \frac{\frac{jL\omega}{1 - LC\omega^2}}{\frac{jL\omega}{1 - LC\omega^2} + R} = \frac{\frac{jL\omega}{1 - LC\omega^2}}{\frac{jL\omega + R - RLC\omega^2}{1 - LC\omega^2}} \\ &= \frac{jL\omega}{1 - LC\omega^2} \times \frac{1 - LC\omega^2}{jL\omega + R - RLC\omega^2} = \frac{jL\omega}{jL\omega + R - RLC\omega^2} \end{aligned}$$

* Calculer I_a en fonction de V_e , puis I_L .