

Cours - Révisions

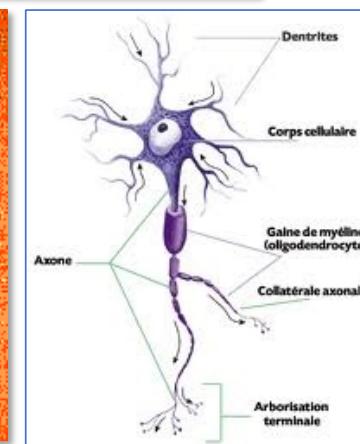
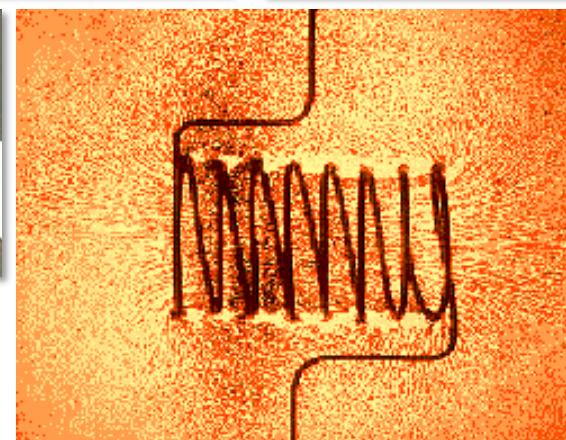
semaines 1 - 7

EE 105 – Sciences et Technologies de
l'électricité
Printemps 2025

Sciences de l'électricité ?

L'électricité c'est:

- Chapitre de la physique, domaine scientifique construit d'abord sur l'électrostatique puis l'électromagnétisme



Technologies de l'électricité ?

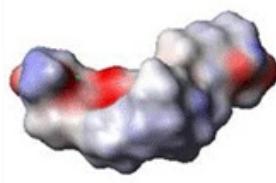
L'électricité et le magnétisme sont présents dans presque tous les phénomènes qui nous entourent.



Structure des matériaux



Batterie de voiture



Liaisons chimiques



Transport d'énergie



Télécommunication



Lumière et lasers



Instruments médicaux



Outils de tous les jours

Quelques symboles graphiques pour la Technologie

	Conducteur parfait
	Résistance (R) Impédance (Z)
	Capacité (C), Condensateur
	Inductance (L)
	Source idéale de tension
	Source idéale de courant
	Croisement sans contact

	Mise à la terre
	Mise à la masse
	Ampèremètre
	Voltmètre
	diode
	Ampoule électrique
	Interrupteur

Les charges électriques

Ces sont des particules électriques fondamentales de la matière.

Il y a 2 deux types de charges électriques:

- Le proton: charge positive.
- L'électron: charge négative.
- Electrons et protons ont une charge ayant la même valeur numérique. C'est *la plus petite charge*: $e = 1.602 \ 10^{-19} \text{ C}$, en Coulomb).



Propriétés de base:

- La charge électrique est *quantifiée* (granularité au niveau atomique).
- La charge électrique d'un système isolé est *conservée*: ne peut être générée ou détruite ... mais peut être redistribuée.

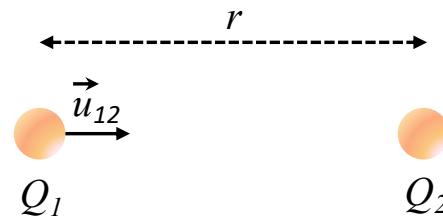
Force et champ électrique

Le champ électrique \vec{E} est la force \vec{F} subie par une particule au repos divisée par sa charge:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} \quad \text{en N/C ou Vm}^{-1}$$

La loi de Coulomb exprime la force électrique entre deux particules chargées.

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \vec{u}_{12}$$



Le champ électrique (force) total(e) lié à un ensemble de charges ponctuelles est la somme vectorielle des champs (forces)

Le courant

Le courant électrique correspond à un déplacement de charge.

- Mesure du flux de charges électriques.
- Possible que dans un circuit fermé et en présence d'une force électromotrice.

$$i = \frac{dQ}{dt}$$

i : courant en ampère (A)
 Q : la charge électrique (C)

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} i(t)dt$$

Les charges se déplacent à une vitesse moyenne: $v_d = \frac{i}{ens}$

Potentiel et tension

Le potentiel électrique au point M à une distance r d'une charge ponctuelle Q est:

$$V(M) = \frac{Q}{4\pi\epsilon r} \quad \text{en volt (V)}$$

Le potentiel lié à un ensemble de k charges ponctuelles connues est la somme des potentiels partiels

$$V(M) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{i=1}^k \frac{Q_i}{r_i}$$

La différence de potentiel entre 2 points est la tension électrique

$$U_{AB} = V(A) - V(B) \quad \text{en volt (V)}$$

Résistance et résistivité

La résistivité ρ (en Ωm) est une propriété du matériau:

- Mesure la capacité de ce matériau à s'opposer à un flux d'électrons.
- L'inverse de la résistivité est la conductivité (en Sm^{-1}).

La résistance R (en Ω) est une propriété d'un composant électrique:

- Mesure la résistance au passage du courant électrique de ce composant lorsque soumis à une tension électrique continue
- Elle dépend du matériau et de la géométrie du composant

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

- La valeur d'une résistance est codée en couleur

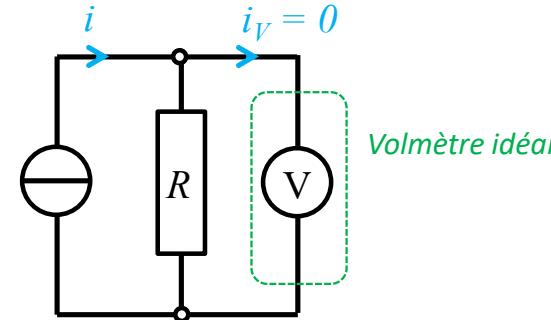
Appareil de mesure - voltmètre

Le voltmètre mesure la tension électrique.

- Il se place en parallèle de l'élément aux bornes duquel nous voulons mesurer la tension

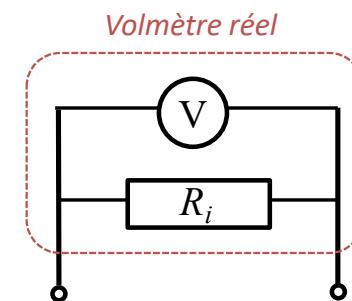
Idéalement le voltmètre ne modifie pas le comportement du circuit

- Aucun courant ne le traverse



Un voltmètre réel soustrait cependant du courant très faible.

- Il a une résistance interne , qui idéalement doit être infinie.
- Il est modélisé par cette résistance interne.



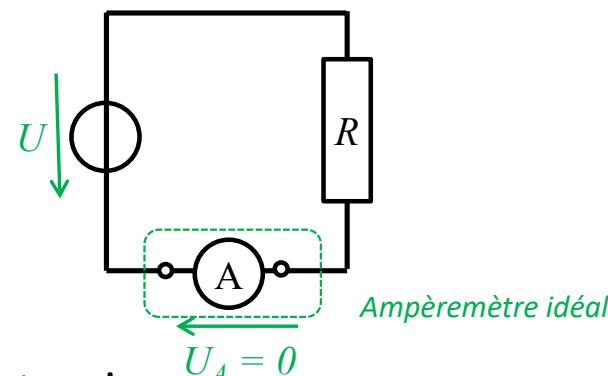
Appareil de mesure - ampèremètre

Un ampèremètre mesure le courant électrique

- Il se place en série, sur la branche parcourue par le courant que nous voulons mesurer.

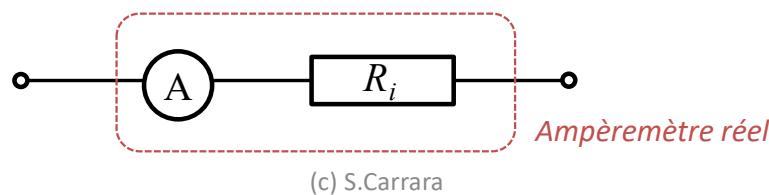
Idéalement l'ampèremètre ne modifie pas le comportement du circuit

- Il n'y a pas de chute de tension à ses bornes



Un ampèremètre réel a cependant une faible chute de tension

- Il a une résistance interne, qui idéalement est nulle

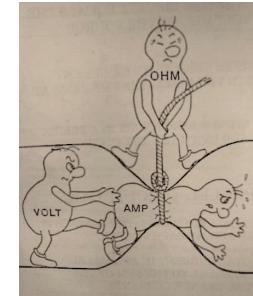


Loi d'Ohm

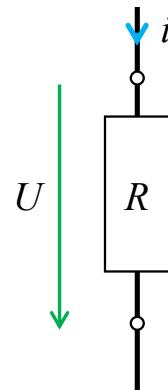
La tension U aux bornes d'une résistance est proportionnelle au courant i qui la traverse.

$$U = Ri ; \quad R \geq 0$$

$$u(t) = Ri(t) ; \quad R \geq 0$$



Attention: suivant la convention des sens (i.e. courant i entre à la borne positive).



Propriétés

R est une constante.

- Relation linéaire entre U et i .

R est positive.

L'unité de la résistance est l'ohm (Ω).

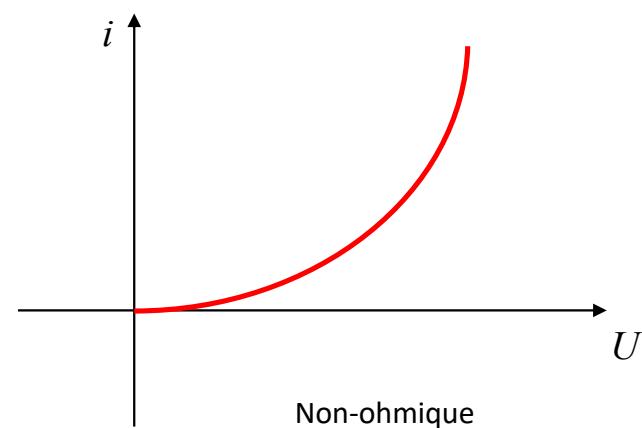
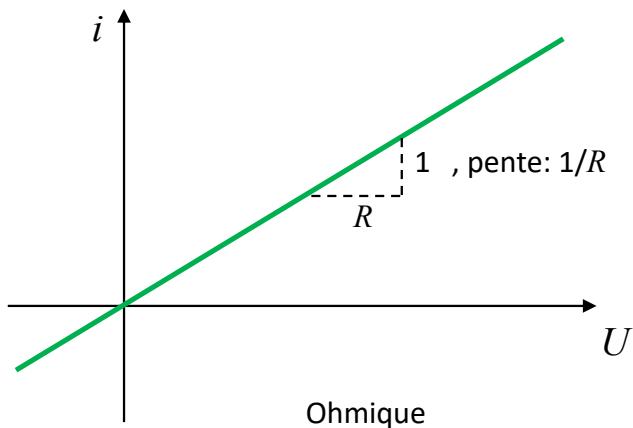
Loi d'ohm peut également s'écrire en fonction de la conductance G .

$$G = \frac{1}{R} \quad \left\{ \begin{array}{l} U = Ri ; \quad R \geq 0 \\ i = GU ; \quad R \geq 0 \end{array} \right. \quad \text{Unité le siemens S}$$

Matériaux ohmiques et non-ohmiques

Le fonctionnement d'un élément électrique dipôle peut être représenté par une courbe $i - U$ ($U - i$).

- Une façon de décrire la variation de tension (courant) en fonction du courant (tension)



Le matériau est dit **ohmique**, celui-ci obéit à la **loi d'Ohm**.

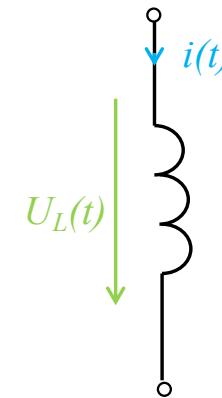
Tension induite

La tension aux bornes d'un bobine dépend du flux total:

$$U_L(t) = \frac{d\phi_t}{dt}$$

$$U_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

?



Sous forme intégrale:

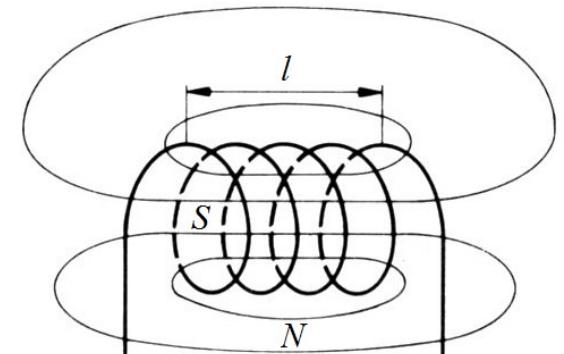
$$i(t) = \int_{-\infty}^t U_L(t') dt'$$

$$i(t) = i(t_0) + \int_{t_0}^t U_L(t') dt'$$

Non-ohmique: Bobine et inductance propre

Une bobine est formée de N spires parcourues par un courant i

- La bobine a un longueur l
- La section de la bobine est S
- Le flux total traversant le bobinage est $\phi_t = N\phi$



Le flux total est proportionnel au courant associé: $\phi_t \propto i$

Par définition, le facteur de proportionnalité entre le flux total est le courant associé est l'inductance propre L d'une bobine:

$$\phi_t = Li$$

$$L = \frac{\phi_t}{i} = \frac{N\phi}{i}$$

$$L = \frac{N^2}{l} \mu_0 S$$

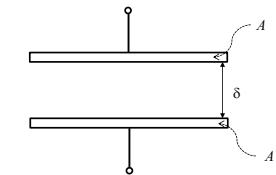
Unité: le henry (H)

(c) S.Carrara

Non-ohmique: Condensateur plan

Un condensateur plan est caractérisé par sa capacité C (en farad)

- Défini la quantité de charge Q qui peut y être stocké pour une tension U



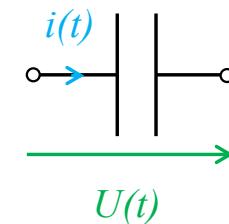
$$Q = CU \quad C = \epsilon \frac{A}{\delta}$$

Un condensateur idéal stocke de l'énergie sans aucune perte:

$$W_C = \frac{1}{2} Qu(t) = \frac{1}{2} Cu^2(t)$$

Courant et tension sont liées par une équation différentielle:

$$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}$$



Régime Transitoire (exemple: Circuit RC)

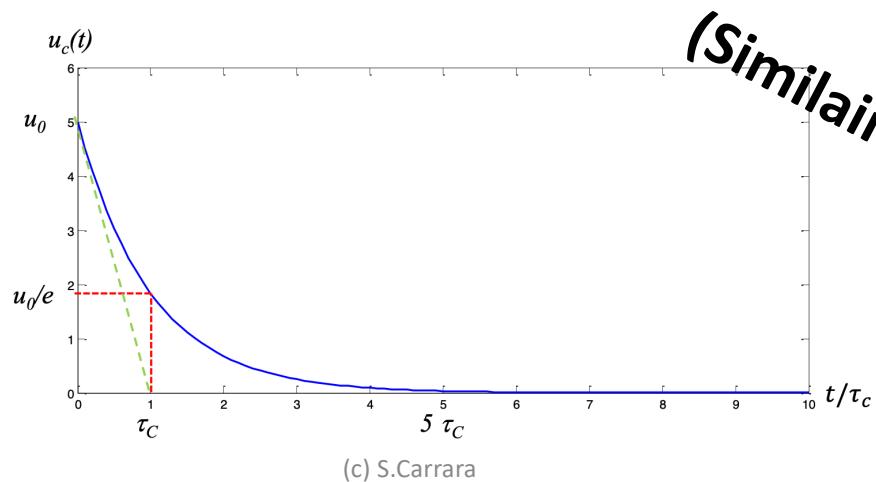
Lorsqu'un circuit contient un(e) condensateur il peut être analysé avec les lois de Kirchhoff

- Courants et tensions sont caractérisés par une équation différentielle.

La tension aux bornes du condensateur ne présente pas de discontinuités

- Des conditions initiales/connues de la tension du condensateur sont à utiliser pour résoudre l'équation différentielle

Le circuit RC a une constante de temps: $\tau_c = R_{eq}C$ avec R_{eq} résistance interne vu des bornes de C



Travail et puissance électrique

La puissance électrique (en W) pour un élément traversé par un courant i avec une tension U à ses bornes est:

$$P =Ui$$

$$P(t_1) = U(t_1)i(t_1)$$

Puissance instantanée à $t = t_1$

Le travail ou énergie (en J) est l'intégrale de la puissance instantanée

$$W = \int_{t_0}^{t_0+T} P(t)dt = \int_{t_0}^{t_0+T} U(t)i(t)dt$$

Pour courant et tension constante:

$$W = Uit$$

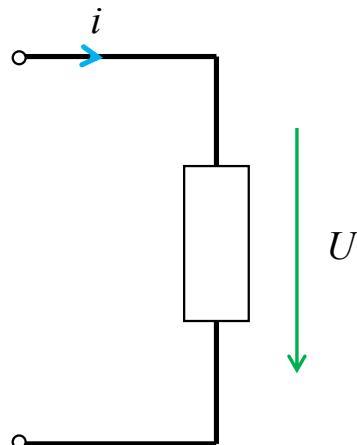
$$W = QU$$

Convention des sens revisitée

Revenons à notre *convention du sens* respectif du courant et des tensions.

- La puissance est calculée telle que le courant i entre par la borne positive de l'élément. (courant et tension dans la même direction!).
- Celle-ci est dite «convention moteur».

$$P =Ui$$



Sous cette convention:

- Si la puissance P est **positive**: elle est **consommée** par l'élément .
- Si la puissance P est **négative**: elle est **fournie** par l'élément.

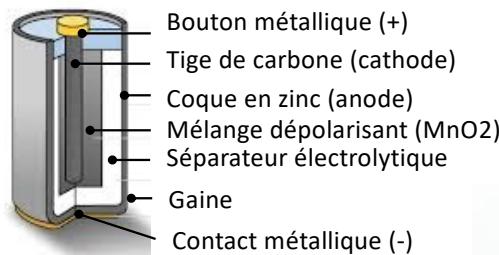
Modèle d'un générateur

L'apport d'énergie électrique dans un circuit est dû:

- À des générateurs produisant une tension ou un courant
- Continu ou variable dans le temps

Exemple

- Pile
- Accumulateur
- Générateur alternatif
- Cellule photoélectrique etc



Le modèle idéalisé d'un générateur est un élément appelé *source de tension* ou *source de courant*.

Source de tension idéale

Nous connectons une résistance de $10 \text{ k}\Omega$ aux bornes de notre pile idéale

- Quelle est la tension aux bornes de la résistance?
- Quel est le courant parcourant la résistance ?

Que se passe-t-il si nous changeons la résistance pour une de $50 \text{ k}\Omega$?



Une source de tension **idéale** présente à ses bornes une **tension indépendante du courant débité**.

Source de courant idéale

Nous connectons une résistance de $10\text{ k}\Omega$ aux bornes de notre source de courant idéale

- Quel est le courant parcourant la résistance ?
- Quelle est la tension aux bornes de la résistance ?

Que se passe-t-il si nous changeons la résistance pour une de $50\text{ k}\Omega$?



Une source de courant **idéale** débite un courant **indépendant de la tension à ses bornes**.

Circuit électrique

Un circuit électrique est un agencement d'éléments électriques.

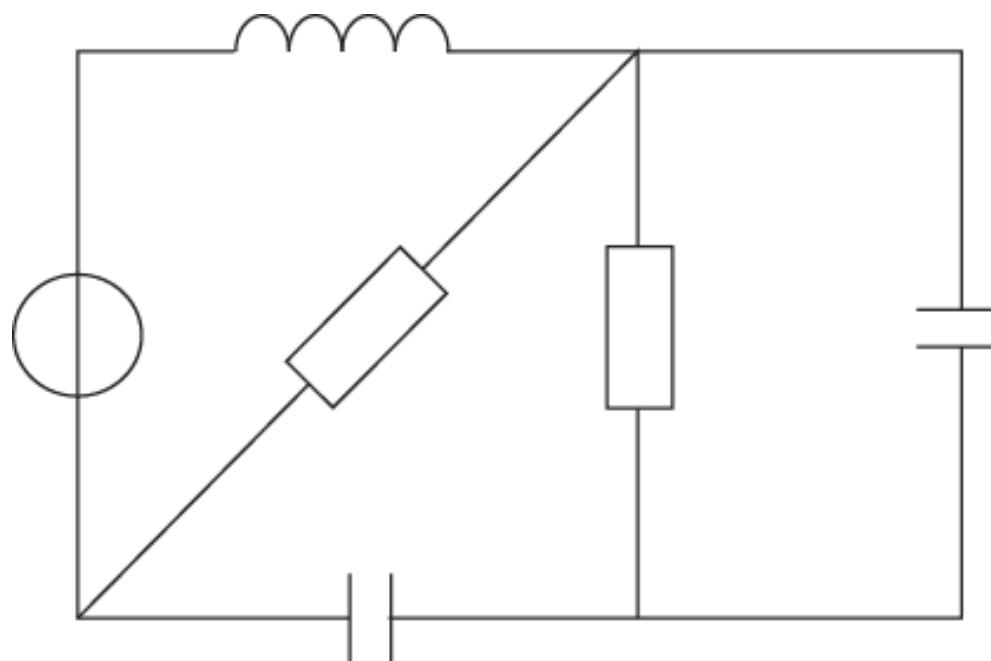
Un nœud est le point de convergence de trois conducteurs ou plus, contenant au moins un dipôle.

Une branche regroupe les éléments situés entre deux nœuds et traversés par le même courant.

Une maille est formée d'un ensemble de branches parcourues en partant d'un nœud pour y revenir sans passer deux fois par la même branche.

Les mailles indépendantes sont des mailles qui ne sont pas elles-mêmes constituées d'autres mailles.

Un exemple avec Résistances, Bobines et Condensateurs...



Circuits électriques

Une fois les différents éléments positionnés en fonction de l'objet à modéliser, on peut y indiquer les courants et les tensions

- Pour le courant: son sens est indiqué par une flèche qui se met sur le conducteur
- Pour les tensions: la chute de tension (flèche de la borne positive à négative) se place au dessus de l'élément
- Avant l'analyse du circuit, courant et tension sont *à priori*. Cependant faites attention à suivre la convention des sens.

Noter le symbole du courant et de la tension suivit des indices correspondant (donner un nom aux inconnues!)

- Cela permet de poser ultérieurement des équations correctement

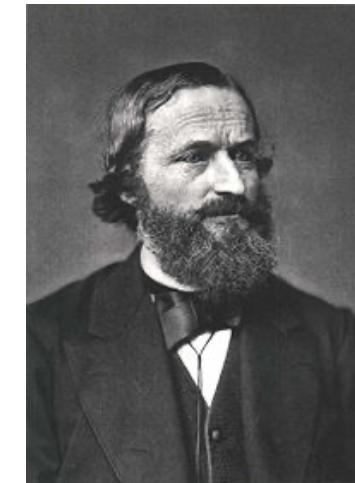
Une fois courants et tensions posés, l'analyse du circuit se fait
grâce aux *lois de Kirchhoff*

Les lois de Kirchhoff

Les lois de Kirchhoff sont des propriétés physiques qui s'appliquent aux circuits électriques. Elles portent le nom du physicien allemand qui les établit en 1845.

Objectif des lois:

- Exprimer mathématiquement la conservation de l'énergie et de la matière dans un circuit électrique



Gustav Kirchhoff (1824 – 1887)

Les lois de Kirchhoff sont fondamentales, au même titre que la loi d'Ohm

Loi de Kirchhoff pour les nœuds

Elle exprime la conservation du courant électrique.

D'un point de vue physique:

- toutes les charges 'entrant' dans un nœud en 'ressortent'.
- C'est-à-dire: il n'y a pas d'accumulation de charges dans le nœud.

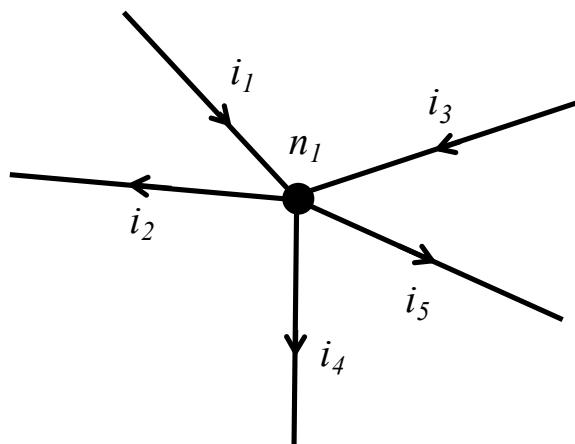
La somme *algébrique* des courants sur un nœud est nulle

$$\sum_{k=1}^N i_k = 0$$

i_k le k^{eme} courant entrant le nœud lorsque N branches y sont connectées

- Remarque:
 - Les courants qui convergent vers le nœud sont 'ajoutés' ($+ i_k$)
 - Les courants qui s'éloignent sont 'soustraits' ($- i_k$)

Loi de Kirchhoff pour les nœuds



Loi des nœuds au nœud n_L :

$$i_1 + i_3 - i_2 - i_4 - i_5 = 0$$

Convergent

S'éloignent

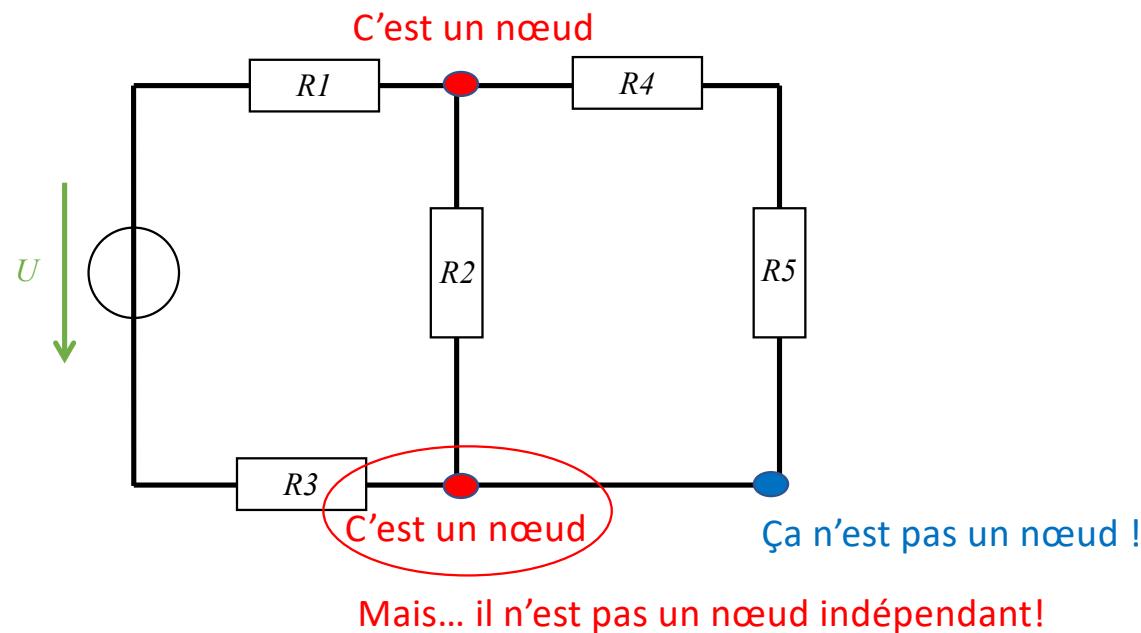
$$i_1 + i_3 = i_2 + i_4 + i_5$$

Courants
entrants

Courants
sortants

(A noter que les courants i_k peuvent être soit négatifs soit positifs)

Nœuds dans un circuit



Loi de Kirchhoff pour les mailles

Elle exprime la conservation de l'énergie électrique.

D'un point de vue physique:

- Toute énergie donnée par une source est utilisée dans les autres composants de la maille.
- i.e. il n'y a pas d'accumulation d'énergie dans la maille.

La somme algébrique des tensions sur une maille est nulle

$$\sum_{k=1}^N U_k = 0$$

U_k la k^{eme} tension *orientée* à l'élément k d'une maille contenant N éléments

Loi de Kirchhoff pour les mailles

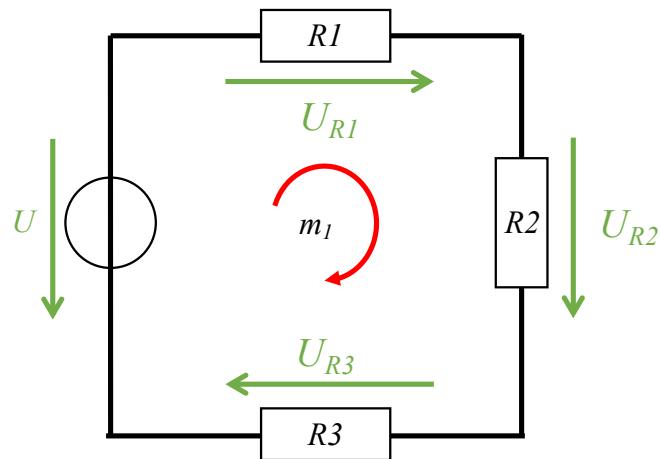
Méthode:

- Pour chaque maille: définir un sens de parcours (peut être indiqué par une flèche).
- Ecrire toutes tensions électriques rencontrées lorsque l'on parcourt la maille:
 - Tension est '*ajoutée*' lorsqu'elle est dans le *même sens* que le parcours.
 - Tension est '*soustraite*' lorsqu'elle est *opposée au sens* du parcours.
- Une fois le tour de la maille complété, la tension totale doit être nulle.
- La loi des mailles peut aussi s'appliquer sur des parties de maille.

Pour l'appliquer il faut donc:

- Avoir identifié les tensions correspondantes aux différents éléments.
- Avoir repéré les mailles qui forment le circuit.

Loi de Kirchhoff pour les mailles



Loi des mailles pour m_1 :

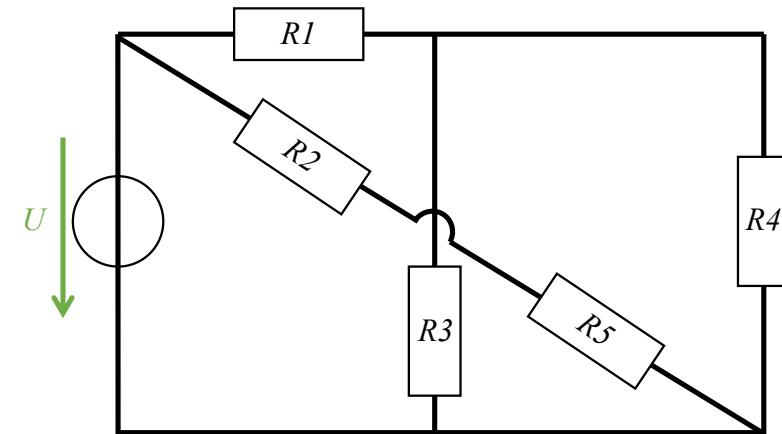
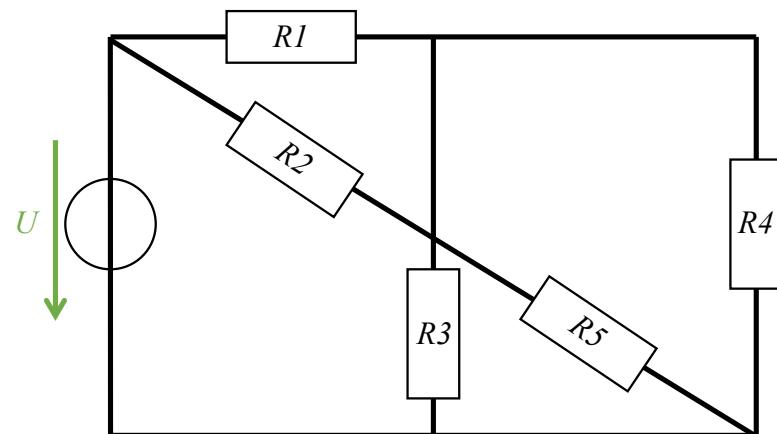
$$U_{R1} + U_{R2} + U_{R3} - U = 0$$

Dans le sens
du parcours

Opposée au
sens du parcours

(A noter que les tensions U_k peuvent être soit négatives soit positives)

Les mailles indépendantes (essayez-vous!)



Elaborer sur la différence

Lois de Kirchhoff

Loi des nœuds: la somme algébrique des courants sur un nœud est nulle.

$$\sum_{k=1}^N i_k = 0$$

i_k le k^{eme} courant entrant le nœud lorsque N branches y sont connectées

Loi des mailles: la somme algébrique des tensions sur une maille est nulle

$$\sum_{k=1}^N U_k = 0$$

U_k la k^{eme} tension orientée à l'élément k d'une maille contenant N éléments

Appliquer les lois de Kirchhoff

Si tous les courants de branche ont été identifiés et calculé, le circuit est résolu

- Pour les résistances les tensions peuvent alors être calculées par la loi d'Ohm.

En régime continu, les lois de Kirchhoff permettent de générer *un nombre d'équations égal au nombre d'inconnus* (typiquement les courants de branche)

Méthode de résolution

(1) Le schéma

Il peut être utile de remodeler le circuit pour lui donner une allure plus compréhensible.

Bien identifier les nœuds, les branches, les mailles.

(2) Définir les grandeurs

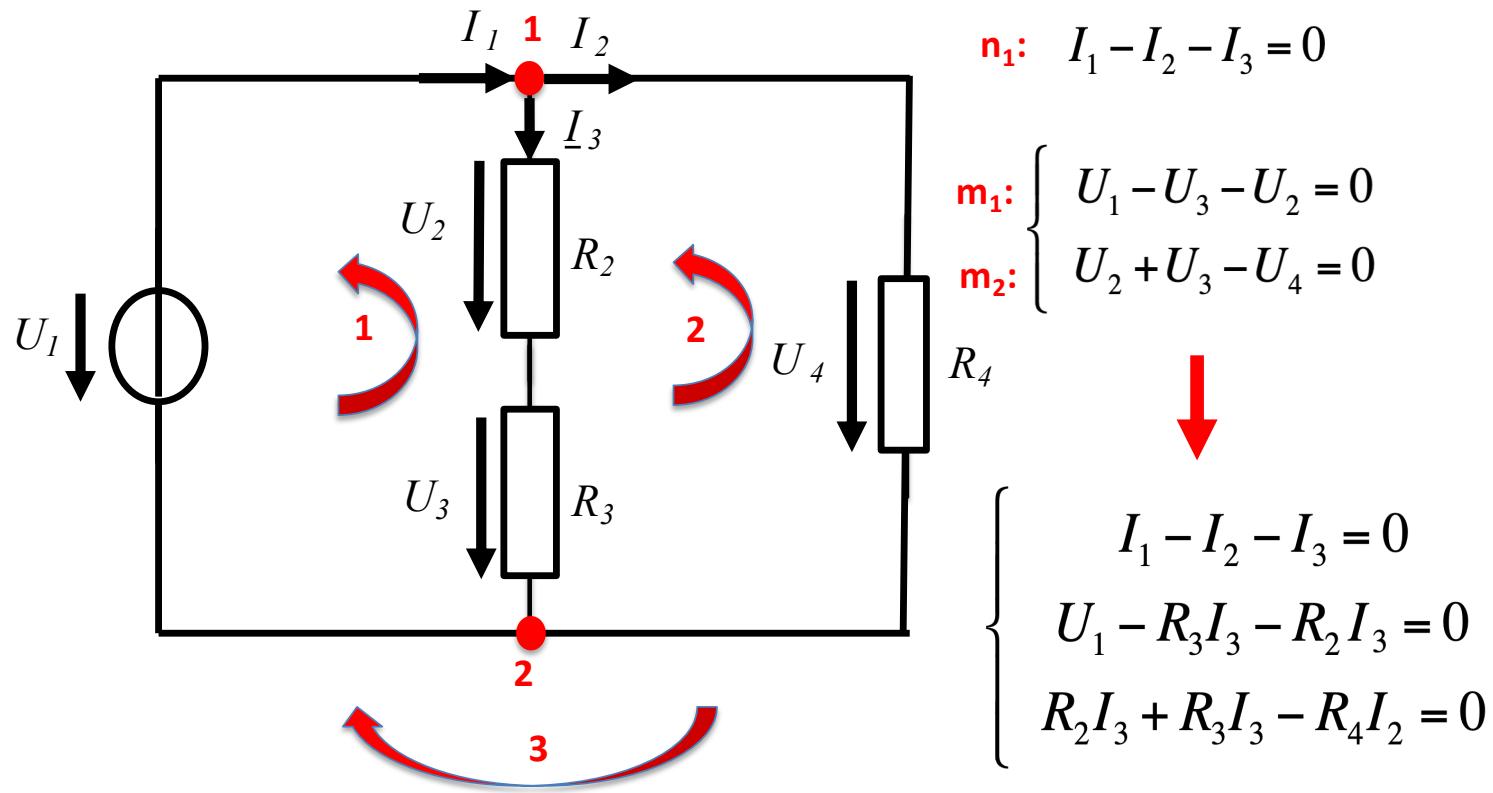
Sur le schéma, identifier les éléments.

Définir chaque source, résistance, inductance etc.

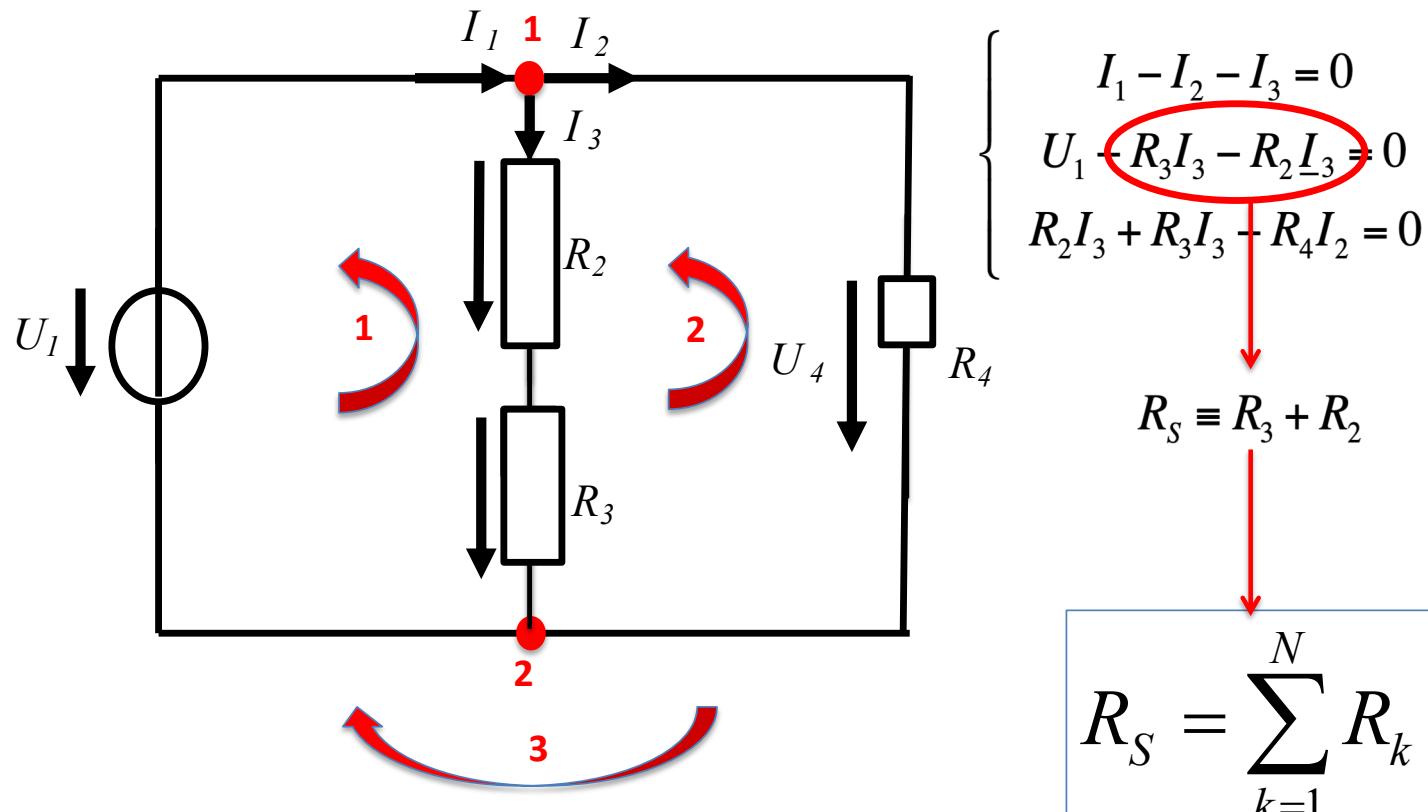
(3) Définir le sens des tensions et des courants

Toutes tensions et courants doivent être indiqués par leur sens et numérotés pour pouvoir ensuite être analysés.

Application des lois de Kirchhoff



Résistances en série

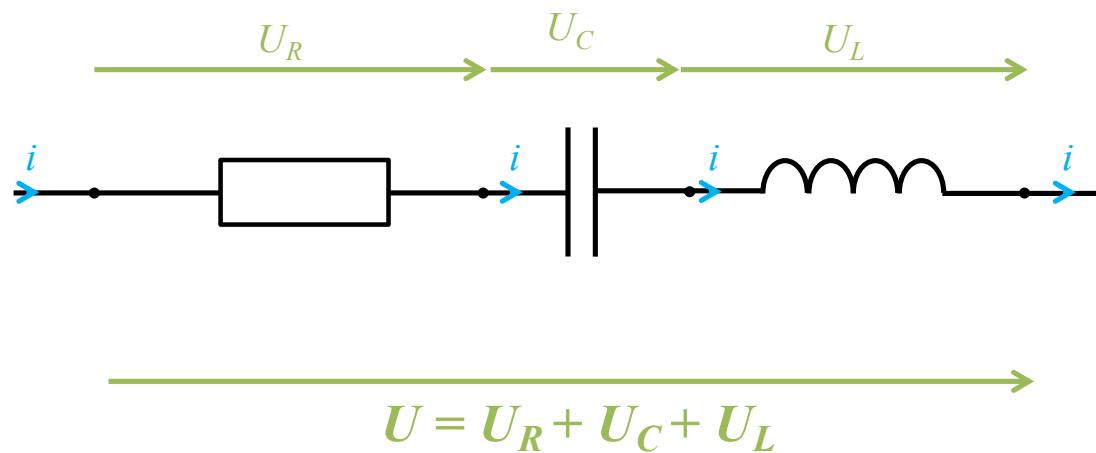


(c) S.Carrara

Éléments en série

Propriété fondamentale

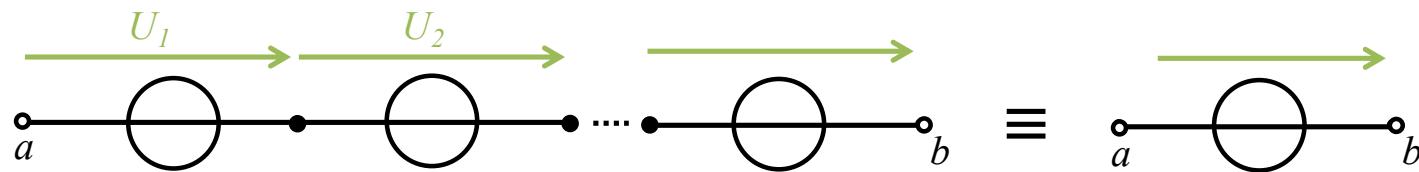
- Conformément aux lois de Kirchhoff, les éléments connectés en série:
 - sont parcourus par le même courant (1^{ere} loi).
 - De plus la tension aux bornes du circuit série est égale à la somme des tensions relatives à chaque élément (2^{eme} loi).



Éléments en série

Mise en série de sources de tension

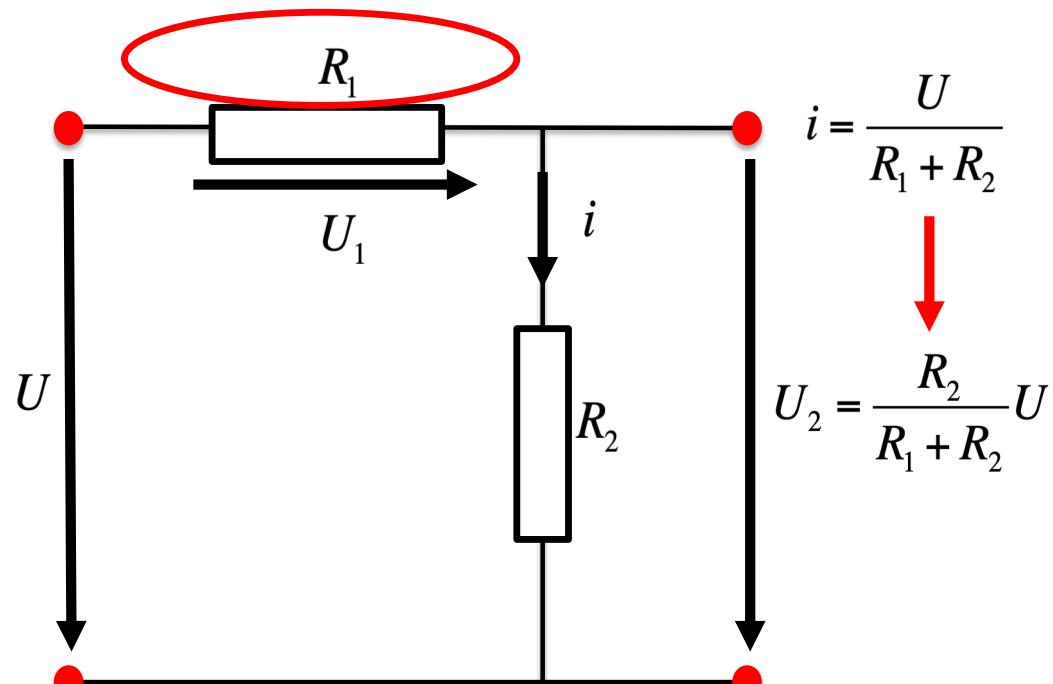
- Un circuit composé de plusieurs sources de tension idéales en série est équivalent à une source de tension unique égale à la *somme algébrique* des tensions individuelles



$$U_S = \sum_{k=1}^N U_k$$

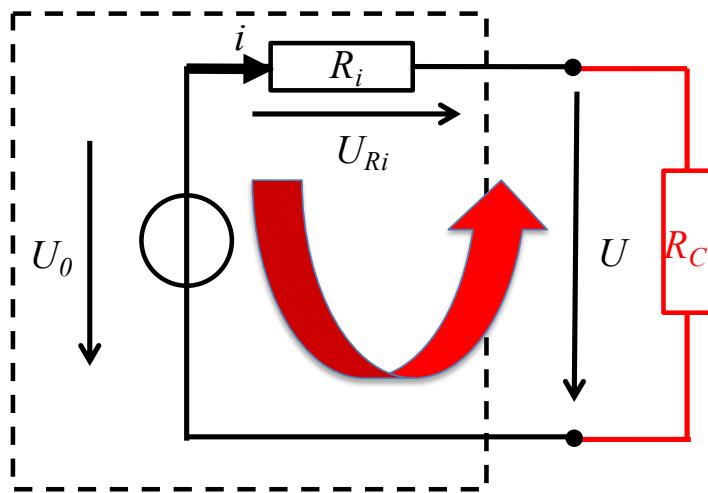
(c) S.Carrara

Diviseur de Tension



Commentaire: la tension partielle aux bornes de l'autre résistance est: $U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U$

La source *réelle* de tension



On a: $U = U_0 - R_i i$

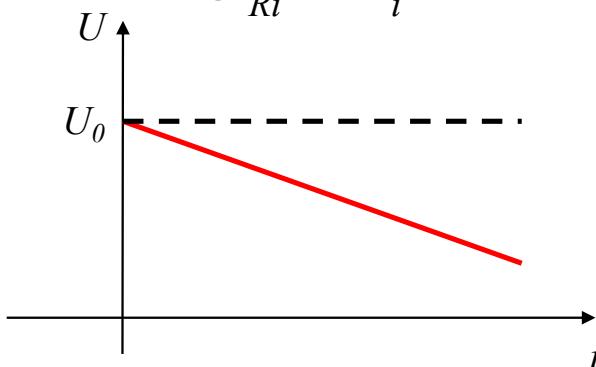
Loi des mailles:

$$U_0 - U - U_{Ri} = 0$$

$$U = U_0 - U_{Ri}$$

Loi d'Ohm:

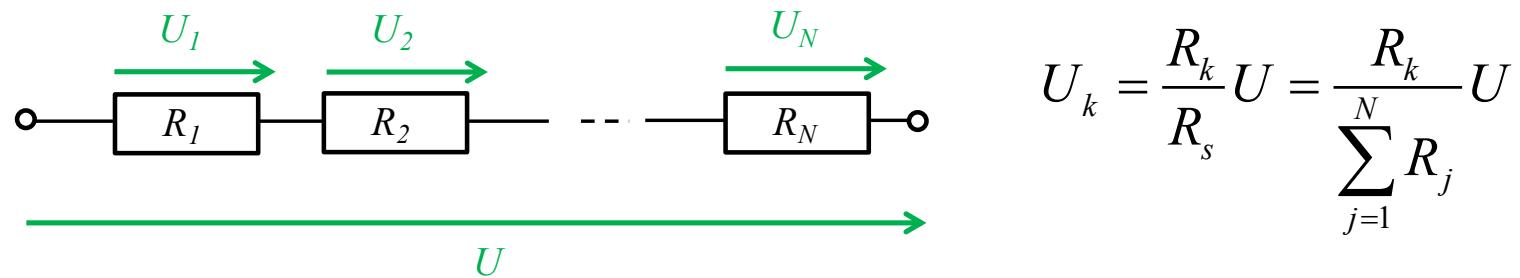
$$U_{Ri} = R_i i$$



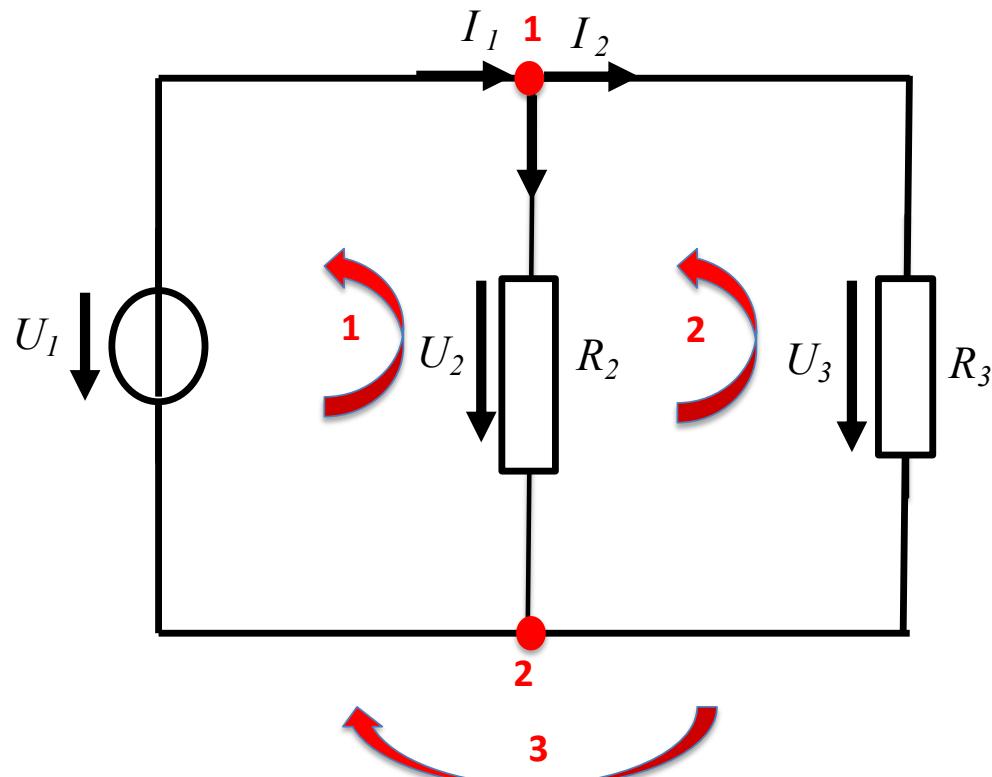
Diviseur de Tension

Mise en série de sources de tension

- Si une *tension totale* U apparaît entre les bornes d'un agencement *en série* de résistances, alors la tension aux bornes de chaque résistance peut être directement exprimée en fonction de U .



Résistances en parallèle



$$\frac{U_1}{R_P} = \frac{U_1}{R_2} + \frac{U_1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_P} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

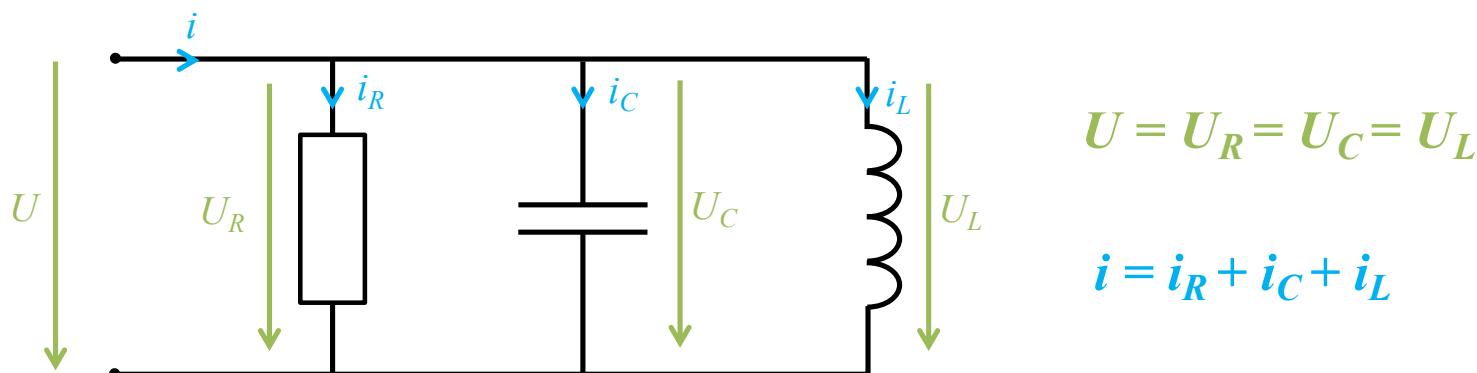
$$\frac{1}{R_P} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k}$$

(c) S.Carrara

Éléments en Parallèle

Propriété fondamentale

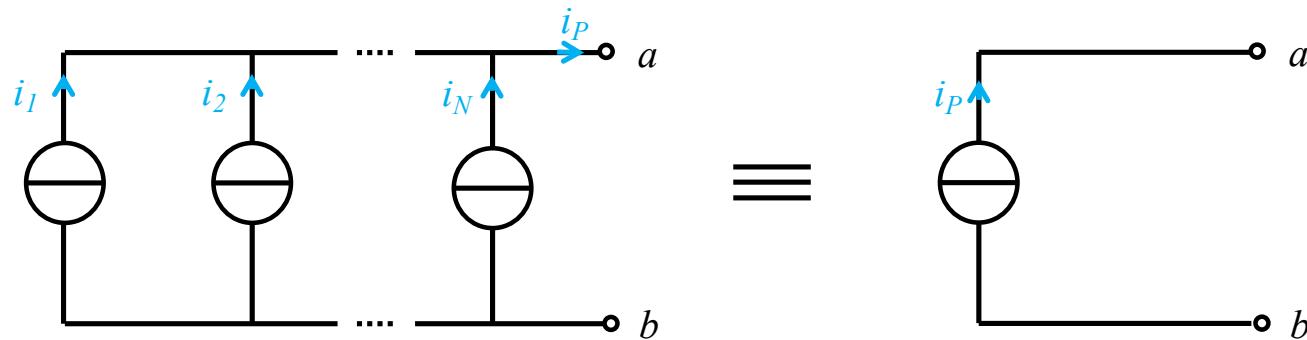
- Conformément aux lois de Kirchhoff, les éléments connectés en série:
 - La tension aux bornes de chaque élément mis en parallèle est identique (2^{eme} loi).
 - Le courant total entrant le circuit parallèle est égal à la somme des courants individuels de chaque élément (1^{ere} loi).



Éléments en Parallèle

Mise en parallèle de sources de courant

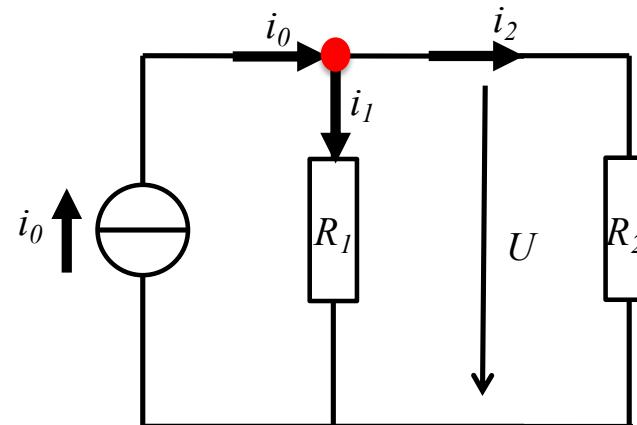
- Un circuit composé de plusieurs sources de courant idéales en parallèle est équivalent à une source de courant débitant la *somme algébrique* des courants individuels.



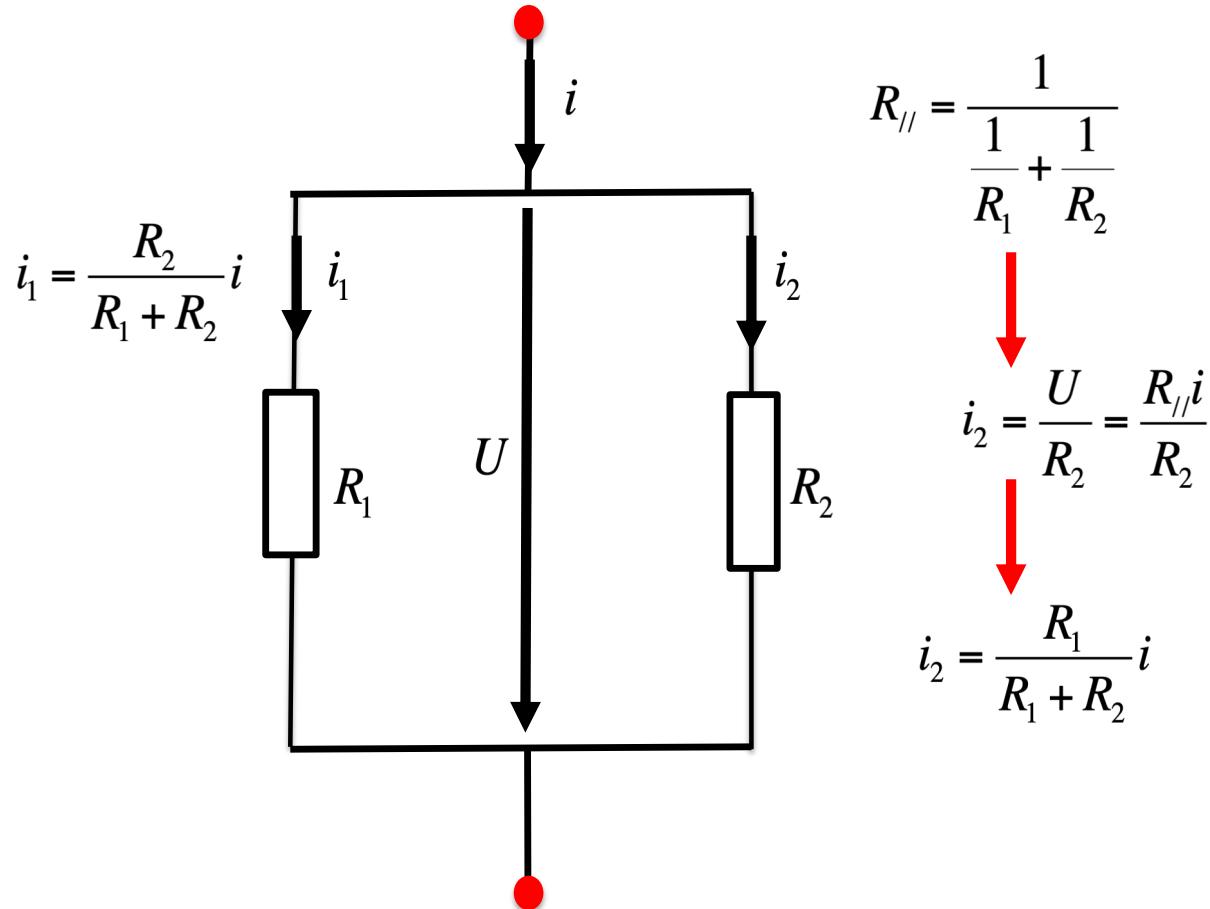
$$i_P = \sum_{k=1}^N i_k$$

Diviseur de Courantes

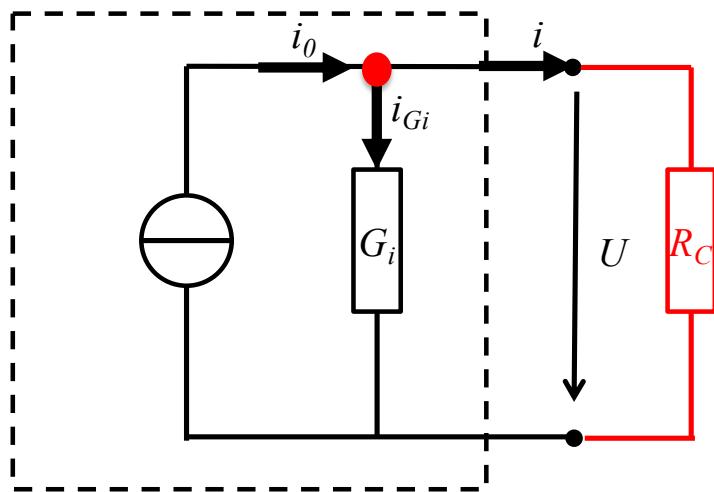
- Nous avons vu qu'une source idéale de courant délivre un courant constant i_0 indépendant de la tension U à ses bornes
- Cette courant délivre va se diviser entre deux résistances



Diviseur de Courant



La source *réelle* de courant



On a: $i = i_0 - UG_i$

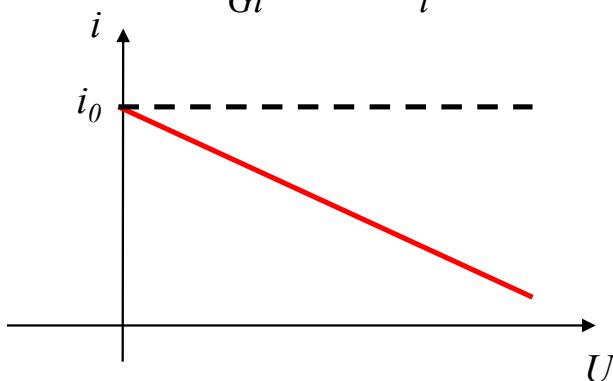
Loi des nœuds :

$$i_0 - i_{Gi} - i = 0$$

$$i = i_0 - i_{Gi}$$

Loi d'Ohm:

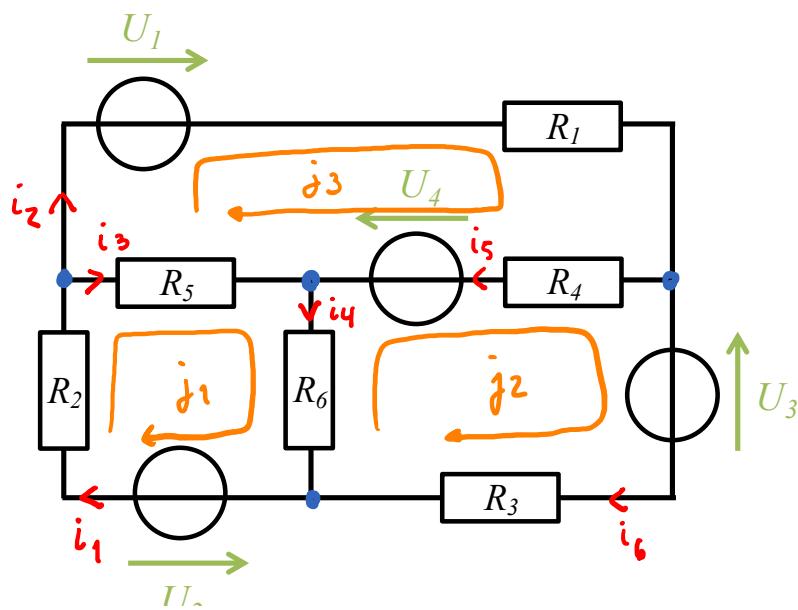
$$i_{Gi} = UG_i$$



New Concept: les courants des mailles

Lorsque le circuit à analyser est complexe, on a avantage à introduire des courants fictifs:

- Nous les appelons courants de mailles.
- C'est un courant fictif circulant dans toute la maille considérée.
- Le courant des branches est alors égal à la somme algébrique des courants des mailles contiguës à cette branche.



$$\# n = 4$$

$$\# m_i = 3$$

$$\# b = 6$$

$$i_1 = j_1$$

$$i_2 = j_3$$

$$i_3 = j_1 - j_3$$

$$i_4 = j_1 - j_2$$

6 courants de branches

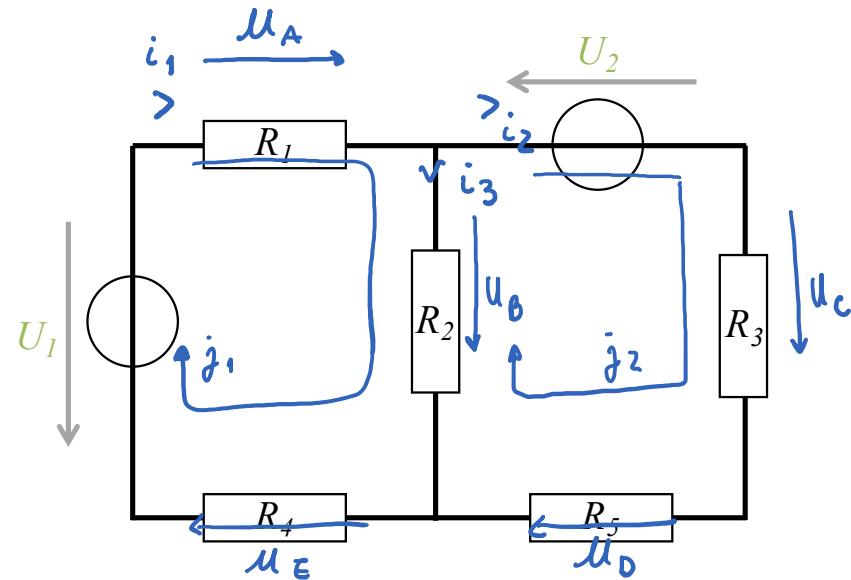
3 courants de mailles

$$i_5 = j_3 - j_2$$

$$i_6 = j_2$$

(c) S.Carrara

Mise en équation



$$i_1 = j_1$$

$$i_2 = j_2$$

$$i_3 = j_1 - j_2$$

$$(m_1; j_1): U_A + U_B + U_E - U_1 = 0$$

$$R_1 i_1 + R_2 i_3 + R_4 j_1 = U_1$$

$$(R_1 + R_4) i_1 + R_2 i_3 = U_1$$

$$(R_1 + R_4) j_1 + R_2 (j_1 - j_2) = U_1$$

$$\textcircled{1} \quad (R_1 + R_2 + R_4) j_1 - R_2 j_2 = U_1$$

$$(m_2; j_2): -U_2 + U_c + U_D - U_B = 0$$

$$R_3 i_2 + R_5 i_2 - R_2 i_3 = U_2$$

$$(R_3 + R_5) i_2 - R_2 i_3 = U_2$$

$$(R_3 + R_5) j_2 - R_2 (j_1 - j_2) = U_2$$

$$-R_2 j_1 + (R_2 + R_3 + R_5) j_2 = U_2 \textcircled{2}$$

Représentation matricielle

Il est possible d'écrire les équations d'un circuit sous la forme de matrice.

Reprenons l'exemple précédent:

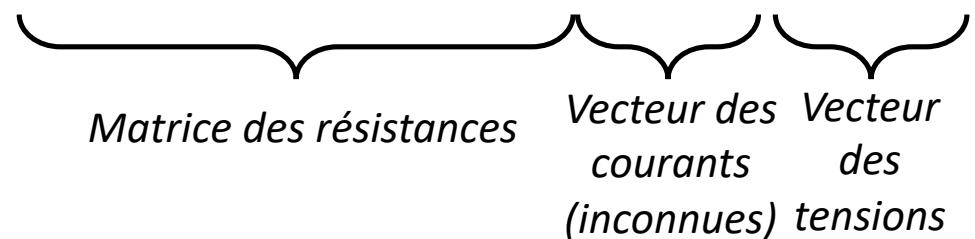
$$\begin{aligned}(R_1 + R_2 + R_4)j_1 - R_2 j_2 &= U_1 \\ -R_2 j_1 + (R_3 + R_5 + R_2)j_2 &= U_2\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} (R_1 + R_2 + R_4) & -R_2 \\ -R_2 & (R_3 + R_5 + R_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$$

Etablir la matrice par inspection (1)

En général si le circuit a N mailles indépendantes les équations des courants des mailles peuvent être représentées de la sorte:

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1N} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{N1} & R_{N2} & \dots & R_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \\ \dots \\ j_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{m1} \\ U_{m2} \\ \dots \\ U_{mN} \end{bmatrix}$$



Matrice des résistances *Vecteur des courants* *Vecteur des (inconnues) tensions*

Résolution d'une matrice – inversion

Soit une matrice carrée $n \times n$

- Si les éléments diagonaux sont égaux à 1 et tous les autres éléments sont égaux à 0, la matrice est appelée matrice identité I

Soit A une matrice carrée de taille $n \times n$.

Si il existe une matrice carrée B de taille $n \times n$ telle que

$$AB = I \quad BA = I$$

Alors la matrice A est inversible et on appelle B un inverse de A

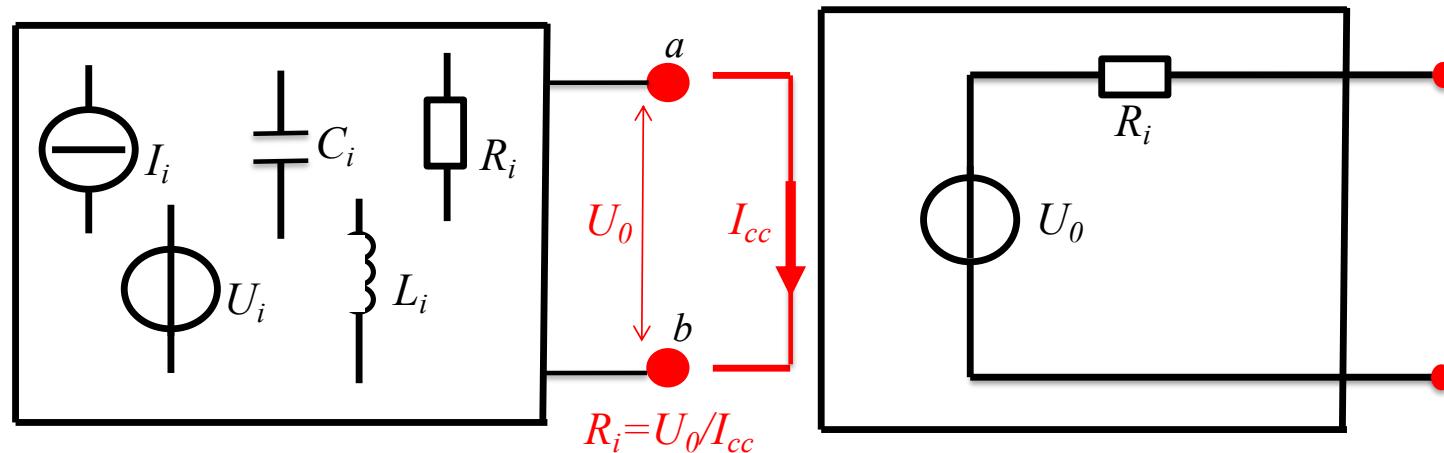
$$B = A^{-1}$$

Théorème (ou Principe) de Thévenin

Les dipôles peuvent être remplacés par une source de tension réelle (tension à vide) et une résistance (calculée avec la courant de court-circuit)

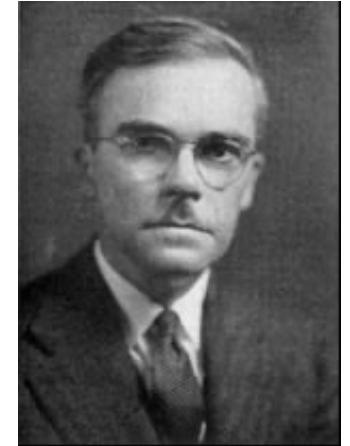


Léon Charles Thévenin(1857-1926)

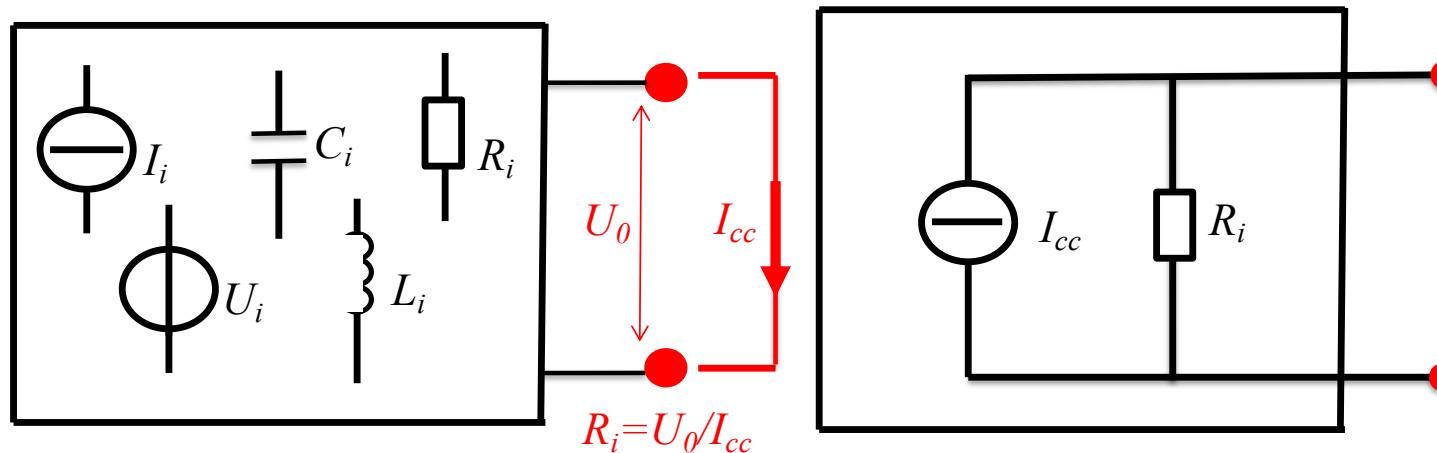


Théorème (ou Principe) de Norton

Les dipôles peuvent être remplacés par une source de courant réelle (**courant de court-circuit**) et une résistance (calculée avec la tension à vide)



Edward Lawry Norton (1898-1983)

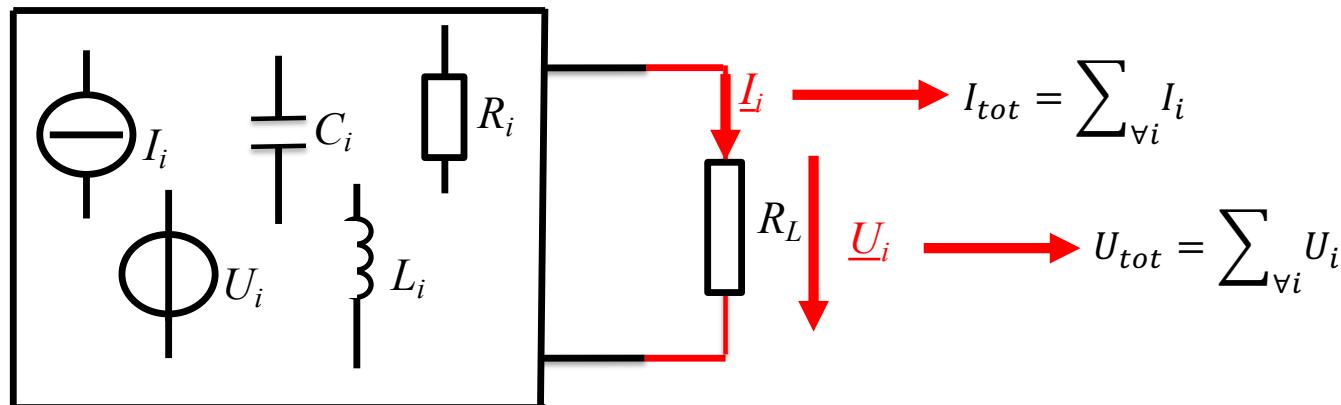


Principe de Superposition

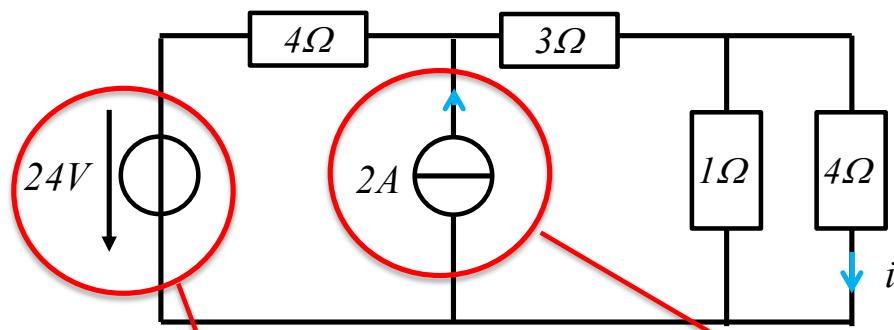
On considère successivement chaque source isolée et le courant définitif est la somme vectorielle des contributions individuelles

La réponse du système à une somme d'excitations est égale à la somme des réponses dues à chaque excitation prise séparément

Un circuit composé de N sources peut être résolu en analysant N circuits, chacun ne contenant qu'une des sources, puis en additionnant les solutions.

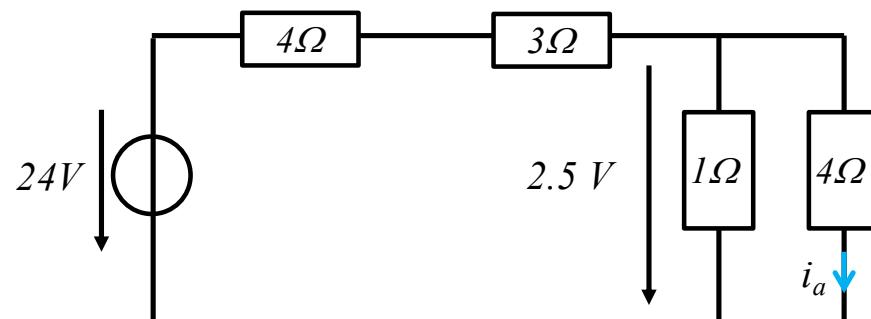


Principe de Superposition: Exemple

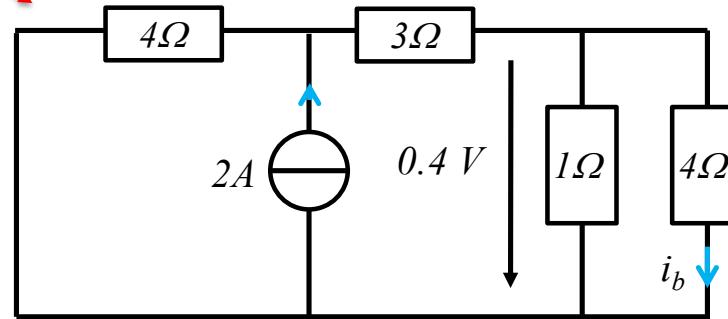


Calculer i en utilisant le principe de superposition

$$i = i_a + i_b$$



$$i_a = \frac{2.5V}{4\Omega} = 0.63 A$$



$$i_b = \frac{0.8V}{4\Omega} = 0.2A$$

Eléments en série et en parallèle

Eléments en série: parcourus par le même courant

Eléments en parallèle: tension identique à leurs bornes

	Série	Parallèle
Résistances	$R_S = \sum_{k=1}^N R_k$	$\frac{1}{R_P} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k}$
Capacités	$\frac{1}{C_S} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{C_k}$	$C_P = \sum_{k=1}^N C_k$
Inductances	$L_S = \sum_{k=1}^N L_k$	$\frac{1}{L_P} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{L_k}$
Sources de tension	$U_S = \sum_{k=1}^N U_k$	
Sources de courant		$i_P = \sum_{k=1}^N i_k$

Midterm du 16 Avril - 25 % de la note finale

Salle ELA2 (emplacement assigné), 12h30 – 15h30.

- Les sacs sont à déposer en bas de l'amphi avant le début de l'épreuve

Papier et brouillon sont fournis et à rendre.

Autorisés:

- Notes de cours et diapositives du cours, livre
- Calculatrice, stylos, règle

Non autorisés:

- Séries et corrigés des exercices,
- Téléphone, ordinateur, tablette etc ...

N'écrivez pas vos réponses au crayon et montrez tous vos développements (schéma, calculs, variables introduites)