

Circuits électriques dans l'ARQS

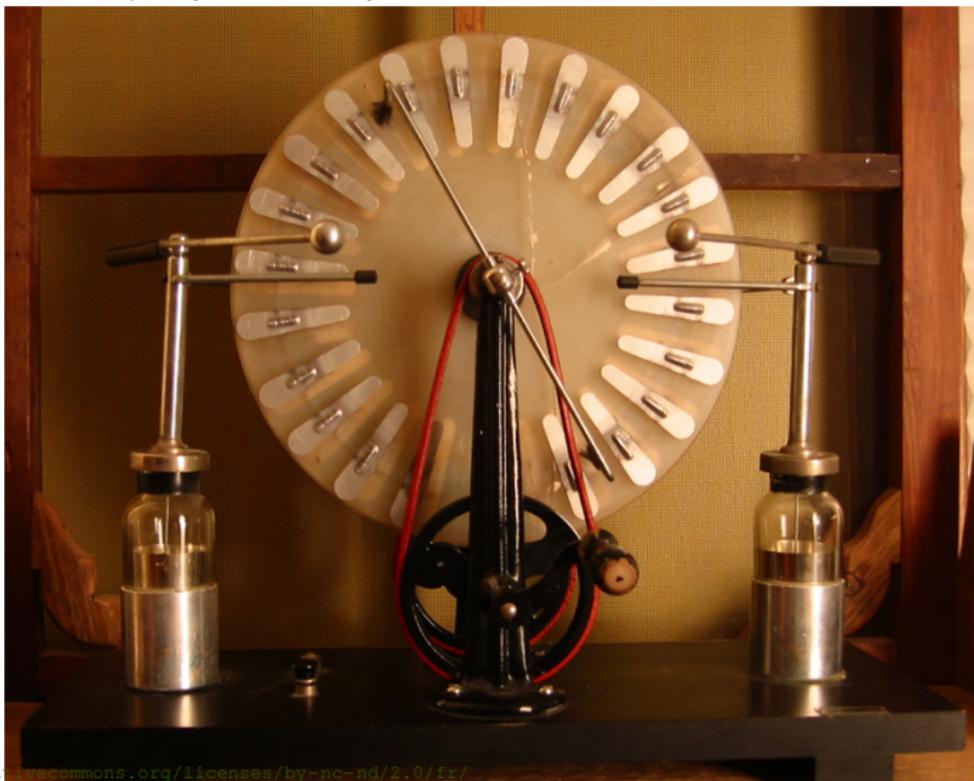
Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

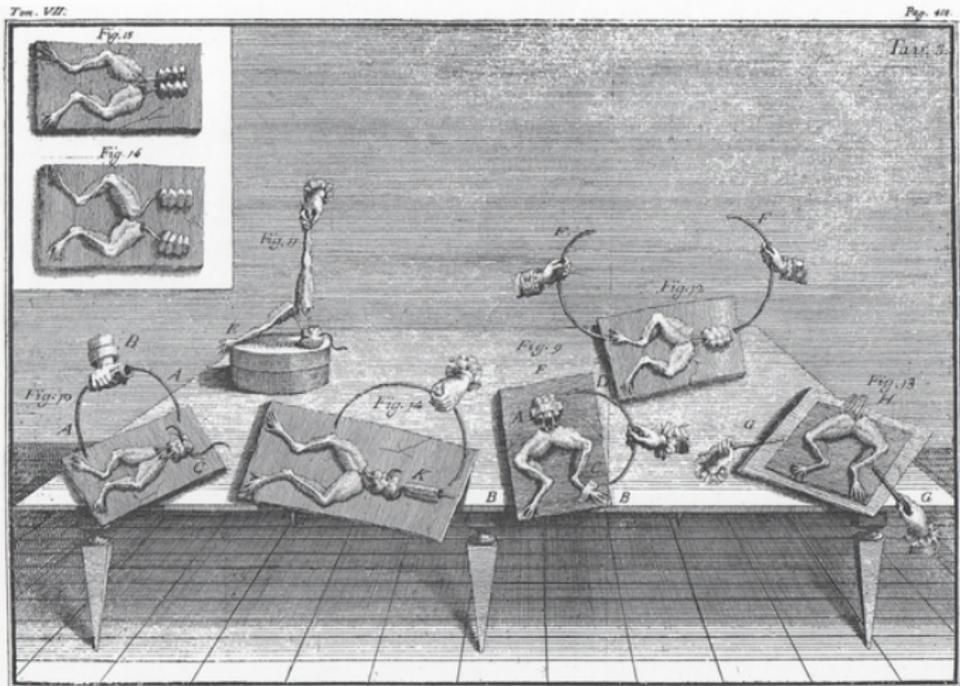
Vendredi 25 septembre 2021

$\text{T}_{\text{E}}\text{X}$:base-directory	./	:publishing-directory
beamer	:base-directory	./	:publishing-directory
notes	:base-directory	./	:publishing-directory
elevés	:base-directory	./	:publishing-directory
cours	:components	(beamer notes élevés)	

- ▶ au XVIII^e siècle : machines électrostatiques (de Ramsden, de Wimshurst) capables de produire des tensions $\times 1000V$



- ▶ Galvani : production chimique de cette électricité statique (1776). Contractions d'une patte de grenouille mise en contact avec deux métaux différents



- ▶ Volta¹ : première pile électrochimique (1800). Générateur électrique délivrant en continu de l'énergie par un **courant électrique**



Code python

```
from sympy import symbols, solve, pprint
u, i, i3 = symbols('u i i3') # Inconnues
E1, E2, eta = symbols('E1 E2 eta') # Donnees
R1, R2, R3, R4 = symbols('R1 R2 R3 R4') # Donnees
sol = solve((R3 * i3 - u,
            E2 - R2 * (i - i3) + R4 * (eta - i),
            R3 * i3 + E2 - R2 * (i - i3) - E1 - R1 * (eta - i3)),
            u, i, i3)
pprint(sol)
```

1. Grandeurs électrocinétiques

2. Caractéristiques de dipôles

3. Lois générales des circuits électriques

4. Association de dipôles

5. Exemples d'utilisation

1. Grandeurs électrocinétiques

1.1 Courant électrique

1.2 Tension électrique

1.3 Puissance électrique

2. Caractéristiques de dipôles

3. Lois générales des circuits électriques

4. Association de dipôles

5. Exemples d'utilisation

Charge électrique

Définition (Charge électrique)

- ▶ la **charge électrique** (notée q) est une grandeur physique caractéristique des objets physiques, exprimée en coulombs, de symbole C .
- ▶ la charge de tout objet est un multiple entier (relatif) de la **charge élémentaire** $e = 1,602\,17 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (par définition)

Dans le cas d'un objet de taille macroscopique, le nombre N de particules chargées sera toujours très grand devant 1 (on note $N \gg 1$), et la charge très grande devant la résolution des appareils de mesure, on considérera donc que la charge **varie continûment**, q sera alors un réel.

Conservation de la charge

Loi de la conservation de la charge

La charge électrique est une grandeur **conservative**. Les variations de la charge q_V contenue dans un volume V délimité par une surface fermée \mathcal{S} sont uniquement dues à l'entrée dans V ou à la sortie de V , à travers \mathcal{S} de particules chargées, nommées **porteurs de charge** (PDC).

- ▶ la charge ne peut être **ni créée ni détruite**
- ▶ on peut former deux objets chargés + et - à partir d'un objet neutre (frottement)

Courant électrique

Définition (Courant électrique)

- ▶ On nomme **courant électrique** un mouvement d'ensemble de porteurs de charge. Le **sens conventionnel du courant** est le sens de déplacement des porteurs de charges positives.
- ▶ L'**intensité** i du courant à travers une surface \mathcal{S} orientée est la charge **nette** traversant \mathcal{S} par unité de temps dans le sens positif défini par l'orientation de la surface \mathcal{S} . Si la charge nette δq infinitésimale traverse \mathcal{S} dans le sens positif pendant la durée infinitésimale dt , on a :

$$i = \frac{\delta q}{dt}.$$

- ▶ L'intensité du courant électrique s'exprime en ampères, de symbole A.

Courant électrique

Définition (Ampère)

L'**Ampère** est l'unité du courant électrique. Sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la charge élémentaire à exactement $1,602\,17 \cdot 10^{-19}$ quand elle est exprimée en A · s, ce qui correspond à des C.

Courant électrique

Définition (Ampère)

L'**Ampère** est l'unité du courant électrique. Sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la charge élémentaire à exactement $1,602\,17 \cdot 10^{-19}$ quand elle est exprimée en A · s, ce qui correspond à des C.

- ▶  notation δ pour une grandeur **infinitésimale** quelconque : elle est petite devant la résolution des mesures, on la fera tendre vers 0 dans les calculs
- ▶ notation d pour une **variation** infinitésimale d'une grandeur entre deux états
- ▶ avant c'était : L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ N par mètre de longueur.

Algébrisation du courant

- ▶ 5C vont de gauche à droite et 2C de droite à gauche et $-3C$ de droite à gauche
- ▶ la charge nette est 6C
- ▶ on a un courant de 6C de gauche à droite, $-6C$ de droite à gauche

Grandeurs électrocinétiques

Caractéristiques de dipôles

Lois générales des circuits électriques

Association de dipôles

Exemples d'utilisation

Courant électrique

Tension électrique

Puissance électrique

Ordres de grandeur

Ordres de grandeur

- ▶ l'agitation thermique est de l'ordre de $7 \cdot 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, dans toutes les directions, dans un conducteur (Cu), même quand $I = 0$

Ordres de grandeur

- ▶ l'agitation thermique est de l'ordre de $7 \cdot 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, dans toutes les directions, dans un conducteur (Cu), même quand $I = 0$
- ▶ quand $I \neq 0$, déplacement global à $\approx 1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Ordres de grandeur

- ▶ mesure avec un **ampèremètre**, qui donne l'intensité qui le traverse
- ▶ la valeur indiquée est celle circulant **du + vers la borne COM**
- ▶ branché en **série**



Analogique



Numérique

Ordres de grandeur

Exemple (Ordres de grandeur)

Domaine	Ordre de grandeur
signaux nerveux	20 μA
signaux électroniques	10 mA
intensité létale	20 mA
ampoule à incandescence	1 A
plaques du cuisson	20 A
Alimentation d'un train	500 A
Éclair	50 kA

Grandeurs électrocinétiques

Caractéristiques de dipôles

Lois générales des circuits électriques

Association de dipôles

Exemples d'utilisation

Courant électrique

Tension électrique

Puissance électrique

Ordres de grandeur

Ordres de grandeur

- ▶ régime **stationnaire** $I = \text{cste}$ (pile, alimentations d'appareils électroniques), sigle DC dit « courant continu »

Ordres de grandeur

- ▶ régime **stationnaire** $I = \text{cste}$ (pile, alimentations d'appareils électroniques), sigle DC dit « courant continu »
- ▶ régime **sinusoïdal établi** (ou permanent), $I = I_0 \cos(\omega t + \varphi)$ (EDF à 50Hz), sigle AC, dit « courant alternatif »

Ordres de grandeur

- ▶ régime **stationnaire** $I = \text{cste}$ (pile, alimentations d'appareils électroniques), sigle DC dit « courant continu »
- ▶ régime sinusoïdal établi (ou permanent), $I = I_0 \cos(\omega t + \varphi)$ (EDF à 50Hz), sigle AC, dit « courant alternatif »
- ▶ régimes **variables** quelconques

Analogie hydraulique

- ▶ l'intensité du courant est un débit de charge à travers une surface, analogue du débit de masse d'un fleuve sous un pont

Analogie hydraulique

- ▶ l'intensité du courant est un débit de charge à travers une surface, analogue du débit de masse d'un fleuve sous un pont
- ▶ la conservation de la charge est l'analogue de la conservation de la masse

Types de courants

Définition (Types de courants)

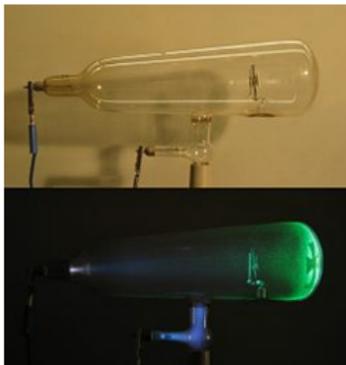
On peut observer des courants :

particulaires constitués de particules chargées se déplaçant dans le vide.

de convection constitués de particules chargées solidaires d'un milieu matériel mobile.

de conduction constitués de particules chargées se déplaçant au sein d'un milieu matériel fixe.

Types de courants



Tube de Crookes, tube cathodique



gouttes d'eau
électrisées, baguette
chargée en
mouvement



électrons dans un
métal ou autre
conducteur

Conducteurs et isolants

Définition (Milieu conducteur)

Un milieu est dit **conducteur** si on peut y provoquer un courant électrique de conduction. Il est **isolant** dans le cas contraire. Les milieux conducteurs diffèrent suivant la nature des porteurs de charge. On distingue :

les métaux dans lesquels la conduction est assurée par des électrons dits **de conduction ou libres**, de charge $q = -e < 0$.

les solutions électrolytiques dans lesquelles les porteurs de charge sont des cations et anions de charge différente de signe opposé, se déplaçant donc en sens inverse.

Conducteurs et isolants

Définition (Milieu conducteur)

les gaz qui sont isolants dans les conditions usuelles, mais dont l'ionisation des atomes en cations libère des électrons pour une température suffisamment élevée ou un champ électrique suffisamment intense. On obtient alors un **plasma** dans lequel les porteurs de charge sont les cations et les électrons de charge de signe opposé, se déplaçant donc en sens inverse.

les semiconducteurs qui sont isolants aux températures usuelles mais dans lesquels des électrons de conduction apparaissent aux températures plus élevées. Les porteurs de charge sont alors ces électrons de conduction et les « trous », de charge positive, qu'ils ont laissés dans la répartition des charges du solide.

Conducteurs et isolants

Définition (Milieu conducteur)

- ▶ gaz : ionisation de l'air pour $\approx 30 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$
- ▶ 1/2 conducteurs : silicium, germanium...à la base des diodes, transistors

1. Grandeurs électrocinétiques

1.1 Courant électrique

1.2 Tension électrique

1.3 Puissance électrique

2. Caractéristiques de dipôles

3. Lois générales des circuits électriques

4. Association de dipôles

5. Exemples d'utilisation

Analogie hydraulique

- ▶ qu'est-ce qui fait couler l'eau ?

Analogie hydraulique

- ▶ qu'est-ce qui fait couler l'eau ?
- ▶ la **différence de potentiel**, ou **tension électrique** entre deux points est l'analogie de la différence d'altitude dans un circuit hydraulique

Analogie hydraulique

- ▶ qu'est-ce qui fait couler l'eau ?
- ▶ la **différence de potentiel**, ou **tension électrique** entre deux points est l'analogie de la différence d'altitude dans un circuit hydraulique
- ▶ à la **hauteur** d'un point en hydraulique correspond le **potentiel électrique**

Lien avec l'énergie des PDC

on admet pour l'instant

Lien avec l'énergie des PDC

on admet pour l'instant

Définition (Potentiel et tension)

- ▶ il existe une grandeur scalaire nommée **potentiel électrique au point M** , notée $v(M)$ et définie en tout point M , telle que l'énergie potentielle électrique d'un porteur de charge de la charge q au point M est $\mathcal{E}_{\text{pot,élec}}(M) = qv(M)$.
- ▶ on nomme **tension ou différence de potentiel**, notée u_{AB} entre deux points A et B la différence $u_{AB} = v(A) - v(B)$.

Lien avec l'énergie des PDC

Définition (Potentiel et tension)

- ▶ il existe une grandeur scalaire nommée **potentiel électrique au point M** , notée $v(M)$ et définie en tout point M , telle que l'énergie potentielle électrique d'un porteur de charge de la charge q au point M est $\mathcal{E}_{\text{pot,élec}}(M) = qv(M)$.
- ▶ on nomme **tension ou différence de potentiel**, notée u_{AB} entre deux points A et B la différence $u_{AB} = v(A) - v(B)$.
- ▶ $[qV] = [\mathcal{E}_{\text{pot}}] : 1V = 1J \cdot C^{-1}$
- ▶ $\mathcal{E}_{\text{pot,élec}}$ est l'analogue de $\mathcal{E}_{\text{pot}} = mgz$

Mesure et ordres de grandeur

- ▶ tension mesurée avec un voltmètre branché entre deux points
- ▶ la tension indiquée est $U = V(+)-V(\text{COM})$
- ▶ branché en **parallèle**

Mesure et ordres de grandeur

- ▶ tension mesurée avec un voltmètre branché entre deux points
- ▶ la tension indiquée est $U = V(+)-V(\text{COM})$
- ▶ branché en **parallèle**



voltmètre
analogique



voltmètre
numérique

Mesure et ordres de grandeur

Exemple (Ordres de grandeur)

Domaine	Ordre de grandeur
plus petite tension mesurable	10 fV
influx nerveux humain	70 mV
pile AAA (chimique)	1,5 V
EDF domestique (~)	230 V
anguille	500 V
méto	750 V
étincelles (vêtements)	1 kV
défibrillateur/clôture bétail	5 kV
EDF centrale (induction~)	10 kV
train	50 kV
taser	50 kV
éclair	50 MV

1. Grandeurs électrocinétiques

1.1 Courant électrique

1.2 Tension électrique

1.3 Puissance électrique

2. Caractéristiques de dipôles

3. Lois générales des circuits électriques

4. Association de dipôles

5. Exemples d'utilisation

Grandeurs électrocinétiques

Caractéristiques de dipôles

Lois générales des circuits électriques

Association de dipôles

Exemples d'utilisation

Courant électrique

Tension électrique

Puissance électrique

- ▶ l'énergie solaire évapore de l'eau, la pluie tombe sur une montagne

- ▶ l'énergie solaire évapore de l'eau, la pluie tombe sur une montagne
- ▶ l'écoulement de la rivière fait fonctionner un moulin

dans un circuit **électrique**

dans un circuit **électrique**

- ▶ un **générateur convertit de l'énergie**
(mécanique/thermique/solaire/chimique) en **énergie électrique**
en la communiquant aux **porteurs de charge**

dans un circuit **électrique**

- ▶ un **générateur convertit de l'énergie**
(mécanique/thermique/solaire/chimique) en **énergie électrique**
en la communiquant aux **porteurs de charge**
- ▶ les **PDC la fournissent à un récepteur qui la**
convertit en une autre forme d'énergie
(mécanique/thermique/lumineux/chimique)

Réseau électrique

on va brancher différents éléments

Réseau électrique

Définition (Constitution d'un réseau électrique)

Un **réseau** électrique est un ensemble de conducteurs reliés les uns aux autres. C'est un **circuit électrique** s'il comporte au moins une boucle fermée. Il est constitué de :

fils ce sont des conducteurs filiformes,

dipôles ce sont des composants reliés par deux fils au reste du réseau,

tripôles ce sont des composants reliés par trois fils au reste du réseau,

quadripôle ce sont des composants reliés par quatre fils au reste du réseau.

Réseau électrique

dipôles résistors, diode, bobine, condensateur

tripôles triode, transistor

quadripôles câble électrique, amplificateur, alimentation

Réseau électrique



Expression générale de la puissance

Expression de la puissance

La puissance instantanée \mathcal{P}_r **reçue** des porteurs de charge par un dipôle X_{AB} soumis à une tension u_{AB} et traversé par un courant $i_{A \rightarrow B}$ est :

$$\mathcal{P}_r = u_{AB} i_{A \rightarrow B}.$$

$\mathcal{P}_f \equiv u_{AB} i_{B \rightarrow A} = -u_{AB} i_{A \rightarrow B} = -\mathcal{P}_r$ est la puissance **fournie** par le dipôle aux porteurs de charge.

Expression générale de la puissance

Expression de la puissance

La puissance instantanée \mathcal{P}_r **reçue** des porteurs de charge par un dipôle X_{AB} soumis à une tension u_{AB} et traversé par un courant $i_{A \rightarrow B}$ est :

$$\mathcal{P}_r = u_{AB} i_{A \rightarrow B}.$$

$\mathcal{P}_f \equiv u_{AB} i_{B \rightarrow A} = -u_{AB} i_{A \rightarrow B} = -\mathcal{P}_r$ est la puissance **fournie** par le dipôle aux porteurs de charge.

- ▶ en Watt : $1 \text{ W} = 1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ A} \cdot \text{V}$
- ▶ ces définitions sont **indépendantes de la nature (signe) des porteurs de charge**

Démonstration (HP)

- ▶ on raisonne sur des électrons (charge $q = -e$) pour simplifier, dans le cas $i_{A \rightarrow B} > 0$, ie les électrons vont globalement **de B vers A**

Démonstration (HP)

- ▶ on raisonne sur des électrons (charge $q = -e$) pour simplifier, dans le cas $i_{A \rightarrow B} > 0$, ie les électrons vont globalement **de B vers A**
- ▶ l'intensité est la même en A et B : chaque électron ressort avec la même vitesse en B qu'il avait en A : pas de variation d'énergie cinétique, seule l'énergie $\mathcal{E}_{\text{pot,élec}}$ est à considérer

Démonstration (HP)

- ▶ on raisonne sur des électrons (charge $q = -e$) pour simplifier, dans le cas $i_{A \rightarrow B} > 0$, ie les électrons vont globalement **de B vers A**
- ▶ l'intensité est la même en A et B : chaque électron ressort avec la même vitesse en B qu'il avait en A : pas de variation d'énergie cinétique, seule l'énergie $\mathcal{E}_{\text{pot,élec}}$ est à considérer
- ▶ 1 électron rentre avec $\mathcal{E}_{\text{pot,élec}} = -ev(B)$, sort avec $\mathcal{E}_{\text{pot,élec}} = -ev(A)$: il a donc apporté au dipôle l'énergie

$$-ev(B) - (-ev(A)) = +e(v(A) - v(B))$$

Démonstration (HP)

- ▶ on raisonne sur des électrons (charge $q = -e$) pour simplifier, dans le cas $i_{A \rightarrow B} > 0$, ie les électrons vont globalement **de B vers A**
- ▶ l'intensité est la même en A et B : chaque électron ressort avec la même vitesse en B qu'il avait en A : pas de variation d'énergie cinétique, seule l'énergie $\mathcal{E}_{\text{pot,élec}}$ est à considérer
- ▶ 1 électron rentre avec $\mathcal{E}_{\text{pot,élec}} = -ev(B)$, sort avec $\mathcal{E}_{\text{pot,élec}} = -ev(A)$: il a donc apporté au dipôle l'énergie

$$-ev(B) - (-ev(A)) = +e(v(A) - v(B))$$

- ▶ le nombre d'électrons traversant pendant dt est $i_{A \rightarrow B} dt / e$

Démonstration (HP)

- ▶ on raisonne sur des électrons (charge $q = -e$) pour simplifier, dans le cas $i_{A \rightarrow B} > 0$, ie les électrons vont globalement **de B vers A**
- ▶ l'intensité est la même en A et B : chaque électron ressort avec la même vitesse en B qu'il avait en A : pas de variation d'énergie cinétique, seule l'énergie $\mathcal{E}_{\text{pot,élec}}$ est à considérer
- ▶ 1 électron rentre avec $\mathcal{E}_{\text{pot,élec}} = -ev(B)$, sort avec $\mathcal{E}_{\text{pot,élec}} = -ev(A)$: il a donc apporté au dipôle l'énergie

$$-ev(B) - (-ev(A)) = +e(v(A) - v(B))$$

- ▶ le nombre d'électrons traversant pendant dt est $i_{A \rightarrow B} dt / e$
- ▶ l'énergie **fournie par les PDC** pendant dt , et donc **reçue par le dipôle**, est :

$$\delta W = \Delta \mathcal{E}_{\text{pot,élec}} \times \frac{i_{A \rightarrow B}}{e} dt = u_{AB} i_{A \rightarrow B} dt \rightarrow \mathcal{P}_r = u_{AB} i_{A \rightarrow B}$$

Signe

$\mathcal{P}_r > 0$ le dipôle est un **récepteur** recevant une énergie électrique qu'il convertit en énergie :

Signe

$\mathcal{P}_r > 0$ le dipôle est un **récepteur** recevant une énergie électrique qu'il convertit en énergie :

- ▶ **mécanique (moteur)**

Signe

$\mathcal{P}_r > 0$ le dipôle est un **récepteur** recevant une énergie électrique qu'il convertit en énergie :

- ▶ **mécanique (moteur)**
- ▶ **électromagnétique (lampe, antenne, radiateur)**

Signe

$\mathcal{P}_r > 0$ le dipôle est un **récepteur** recevant une énergie électrique qu'il convertit en énergie :

- ▶ mécanique (moteur)
- ▶ électromagnétique (lampe, antenne, radiateur)
- ▶ chimique (cuve à électrolyse)

Signe

$\mathcal{P}_r > 0$ le dipôle est un **récepteur** recevant une énergie électrique qu'il convertit en énergie :

- ▶ mécanique (moteur)
- ▶ électromagnétique (lampe, antenne, radiateur)
- ▶ chimique (cuve à électrolyse)

$\mathcal{P}_f > 0$ le dipôle est un **générateur** qui produit de l'énergie électrique à partir d'énergie :

Signe

$\mathcal{P}_r > 0$ le dipôle est un **récepteur** recevant une énergie électrique qu'il convertit en énergie :

- ▶ mécanique (moteur)
- ▶ électromagnétique (lampe, antenne, radiateur)
- ▶ chimique (cuve à électrolyse)

$\mathcal{P}_f > 0$ le dipôle est un **générateur** qui produit de l'énergie électrique à partir d'énergie :

- ▶ mécanique (alternateur)

Signe

$\mathcal{P}_r > 0$ le dipôle est un **récepteur** recevant une énergie électrique qu'il convertit en énergie :

- ▶ mécanique (moteur)
- ▶ électromagnétique (lampe, antenne, radiateur)
- ▶ chimique (cuve à électrolyse)

$\mathcal{P}_f > 0$ le dipôle est un **générateur** qui produit de l'énergie électrique à partir d'énergie :

- ▶ mécanique (alternateur)
- ▶ électromagnétique (cellule photovoltaïque)

Signe

$\mathcal{P}_r > 0$ le dipôle est un **récepteur** recevant une énergie électrique qu'il convertit en énergie :

- ▶ mécanique (moteur)
- ▶ électromagnétique (lampe, antenne, radiateur)
- ▶ chimique (cuve à électrolyse)

$\mathcal{P}_f > 0$ le dipôle est un **générateur** qui produit de l'énergie électrique à partir d'énergie :

- ▶ mécanique (alternateur)
- ▶ électromagnétique (cellule photovoltaïque)
- ▶ chimique (pile)

Signe

$\mathcal{P}_r > 0$ le dipôle est un **récepteur** recevant une énergie électrique qu'il convertit en énergie :

- ▶ mécanique (moteur)
- ▶ électromagnétique (lampe, antenne, radiateur)
- ▶ chimique (cuve à électrolyse)

$\mathcal{P}_f > 0$ le dipôle est un **générateur** qui produit de l'énergie électrique à partir d'énergie :

- ▶ mécanique (alternateur)
- ▶ électromagnétique (cellule photovoltaïque)
- ▶ chimique (pile)

certains dipôles peuvent avoir un comportement tour à tour générateur en accumulant puis redistribuant de l'énergie électrique (batterie, condensateur, bobine)

Ordres de grandeur

- ▶ mesurée avec un wattmètre (quadripôle)
- ▶ le compteur EDF est un « joulemètre » qui mesure une énergie
- ▶ pour du courant alternatif, on s'intéresse à la moyenne temporelle de la puissance

Ordres de grandeur



Ordres de grandeur

Exemple (Ordres de grandeur)

Domaine	Ordre de grandeur
système nerveux	1 μ W
chargeur téléphone	8 W
ampoule basse conso	10 W
dynamo vélo	10 W
antenne relais	40 W
ampoule à incandescence	100 W
machine à laver	3 kW
train	10 MW
éolienne mât (production ~)	2 MW
centrale nucléaire (production ~)	5 GW

Générateur et récepteur

Définition (Conventions générateur et récepteur)

En **convention récepteur** les flèches orientant le courant i dans un dipôle et définissant la tension u à ses bornes sont en **sens opposés**, l'expression $\mathcal{P} \equiv ui$ représente la puissance **reçue** des porteurs de charge par le dipôle.

En **convention générateur** les flèches orientant le courant i dans un dipôle et définissant la tension u à ses bornes sont dans le **même sens**, l'expression, $\mathcal{P} \equiv ui$ représente la puissance **fournie** par le dipôle aux porteurs de charge.

Générateur et récepteur

Comportements générateur et récepteur

Un dipôle a un **comportement générateur** (resp. **récepteur**) à un instant donné s'il fournit (resp. reçoit) de l'énergie aux (resp. des) porteurs de charge.

En convention **générateur** $ui > 0 \Leftrightarrow$ traduit un **comportement** générateur,

En convention **récepteur** $ui > 0 \Leftrightarrow$ traduit un **comportement** récepteur.

Grandeurs électrocinétiques

Caractéristiques de dipôles

Lois générales des circuits électriques

Association de dipôles

Exemples d'utilisation

Courant électrique

Tension électrique

Puissance électrique

Générateur et récepteur

Générateur et récepteur

- ▶  le signe de ui dépend du choix fait pour la convention mais le comportement générateur ou récepteur est indépendant de toute convention : il traduit une réalité physique.

Générateur et récepteur

- ▶  le signe de ui dépend du choix fait pour la convention mais le comportement générateur ou récepteur est indépendant de toute convention : il traduit une réalité physique.
- ▶ un même dipôle peut avoir tour à tour les deux comportements (« batterie » de voiture, de téléphone)

1. Grandeurs électrocinétiques

2. Caractéristiques de dipôles

3. Lois générales des circuits électriques

4. Association de dipôles

5. Exemples d'utilisation

1. Grandeurs électrocinétiques

2. Caractéristiques de dipôles

2.1 Définition

2.2 Conducteur ohmique

2.3 Sources

2.4 Condensateur

2.5 Bobine idéale

2.6 Modélisation linéaire des dipôles

3. Lois générales des circuits électriques

4. Association de dipôles

5. Exemples d'utilisation

Caractéristique statique courant-tension

Définition (Caractéristique statique)

Le **point de fonctionnement statique** d'un dipôle est le couple (U, I) de la tension à ses bornes et du courant le traversant en régime stationnaire.

La **caractéristique statique courant-tension** d'un dipôle X est la courbe représentant l'ensemble de ses points de fonctionnement en régime stationnaire.



il faut préciser la **convention** choisie

Détermination du point de fonctionnement

Détermination expérimentale

Le point de fonctionnement statique du circuit réalisé en branchant un dipôle X sur un dipôle G (convention récepteur pour X , générateur pour G) est l'intersection des caractéristiques statiques de X (en convention **récepteur**) et de G (en convention **générateur**).

on n'aura quasiment toujours qu'un seul point de fonctionnement

Exemples et propriétés

dipôle symétrique caractéristique symétrique :

les deux bornes sont équivalentes

dipôle polarisé les deux bornes sont physiquement différentes

dipôle passif la caractéristique passe par $I = 0; V = 0$: le dipôle ne peut pas fournir de l'énergie à un résistor

dipôle actif le dipôle peut fournir de l'énergie à un résistor : la caractéristique en convention générateur doit passer dans les quadrants 1 et/ou 3 sans passer par 0,0

1. Grandeurs électrocinétiques

2. Caractéristiques de dipôles

2.1 Définition

2.2 Conducteur ohmique

2.3 Sources

2.4 Condensateur

2.5 Bobine idéale

2.6 Modélisation linéaire des dipôles

3. Lois générales des circuits électriques

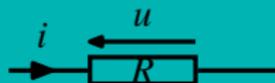
4. Association de dipôles

5. Exemples d'utilisation

Modèle

Modèle

- ▶ L'équation caractéristique d'un conducteur ohmique est $u = Ri$ en **convention récepteur**.
- ▶ R (resp. $G = \frac{1}{R}$) est sa résistance (conductance) exprimée en Ohm Ω (resp. Siemens S).
- ▶ son schéma électrique est, en **convention récepteur** :



- ▶ sa caractéristique statique est une droite de pente $1/R$

Modèle

Modèle

- ▶ L'équation caractéristique d'un conducteur ohmique est $u = Ri$ en **convention récepteur**.
- ▶ R (resp. $G = \frac{1}{R}$) est sa résistance (conductance) exprimée en Ohm Ω (resp. Siemens S).
- ▶ son schéma électrique est, en **convention récepteur** :



- ▶ sa caractéristique statique est une droite de pente $1/R$
- ▶ microscopiquement : on modélise par des frottements fluides l'interaction avec les défauts du réseau cristallin

Modèle

Modèle

- ▶ L'équation caractéristique d'un conducteur ohmique est $u = Ri$ en **convention récepteur**.
- ▶ R (resp. $G = \frac{1}{R}$) est sa résistance (conductance) exprimée en Ohm Ω (resp. Siemens S).
- ▶ son schéma électrique est, en **convention récepteur** :



- ▶ sa caractéristique statique est une droite de pente $1/R$
- ▶ microscopiquement : on modélise par des frottements fluides l'interaction avec les défauts du réseau cristallin
- ▶ analogie hydraulique : vitesse d'écoulement constante à cause des frottements dans une canalisation

Modèle

Modèle

- ▶ L'équation caractéristique d'un conducteur ohmique est $u = Ri$ en **convention récepteur**.
- ▶ R (resp. $G = \frac{1}{R}$) est sa résistance (conductance) exprimée en Ohm Ω (resp. Siemens S).
- ▶ son schéma électrique est, en **convention récepteur** :



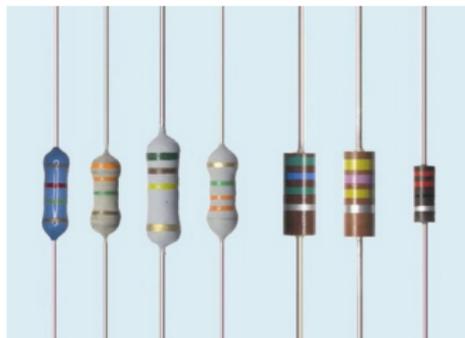
- ▶ sa caractéristique statique est une droite de pente $1/R$
- ▶ microscopiquement : on modélise par des frottements fluides l'interaction avec les défauts du réseau cristallin
- ▶ analogie hydraulique : vitesse d'écoulement constante à cause des frottements dans une canalisation
- ▶ aussi appelé « résistor » ou « résistance » par métonymie

Considérations énergétiques

Effet Joule

Un résistor a toujours un comportement récepteur, il **reçoit** des porteurs de charge la puissance :

$$\mathcal{P}_r = RI^2 = \frac{U^2}{R} \geq 0.$$



l'énergie des PDC est **cédée au milieu conducteur du dipôle** :
chauffage (radiateur), rayonnement (ampoules)

Ordres de grandeur

Modèle du conducteur cylindrique

Pour un conducteur cylindrique de longueur l et section s , on a $R = \rho l / s = l / (\sigma s)$, où ρ (resp. $\sigma = \frac{1}{\rho}$) est la **résistivité électrique** (resp. **conductivité électrique**) du matériau.

- ▶ analogie hydraulique avec un tuyau plus ou moins long, de diamètre plus ou moins grand
- ▶ ρ en $\Omega \cdot \text{m}$ et σ en S/m
- ▶ la résistance d'un fil sera négligée : $u = 0 \forall i$ et deux points reliés par un fil seront **au même potentiel**
- ▶ on modélisera un **interrupteur fermé par un fil** (même caractéristique)

Ordres de grandeur

Modèle du conducteur cylindrique

Pour un conducteur cylindrique de longueur l et section s , on a $R = \rho l / s = l / (\sigma s)$, où ρ (resp. $\sigma = \frac{1}{\rho}$) est la **résistivité électrique** (resp. **conductivité électrique**) du matériau.

	Ag	Cu	Au	Al	Hg	verre
$\sigma (1 \cdot 10^6 \text{ S/m})$	62,1	58,0	45,5	34,5	1	$1 \cdot 10^{-12}$

1. Grandeurs électrocinétiques

2. Caractéristiques de dipôles

2.1 Définition

2.2 Conducteur ohmique

2.3 Sources

2.4 Condensateur

2.5 Bobine idéale

2.6 Modélisation linéaire des dipôles

3. Lois générales des circuits électriques

4. Association de dipôles

5. Exemples d'utilisation

Sources idéales

Définition (Définition)

Une **source idéale** de tension (resp. de courant) délivre une tension $e(t)$ (resp. un courant $\eta(t)$) **indépendamment** du reste du circuit.

source idéale de tension caractéristique $u = e \quad \forall i$

source idéale de courant caractéristique $i = \eta \quad \forall u$

Sources idéales

Définition (Définition)

Une **source idéale** de tension (resp. de courant) délivre une tension $e(t)$ (resp. un courant $\eta(t)$) **indépendamment** du reste du circuit.

source idéale de tension caractéristique $u = e \quad \forall i$

source idéale de courant caractéristique $i = \eta \quad \forall u$

- ▶ **source stationnaire** : alimentation stabilisée (peut fonctionner en source de I ou en source de U dans certains régimes)

Sources idéales

Définition (Définition)

Une **source idéale** de tension (resp. de courant) délivre une tension $e(t)$ (resp. un courant $\eta(t)$) **indépendamment** du reste du circuit.

source idéale de tension caractéristique $u = e \quad \forall i$

source idéale de courant caractéristique $i = \eta \quad \forall u$

- ▶ **source stationnaire** : alimentation stabilisée (peut fonctionner en source de I ou en source de U dans certains régimes)
- ▶ **source alternative** : EDF

Sources idéales

Définition (Définition)

Une **source idéale** de tension (resp. de courant) délivre une tension $e(t)$ (resp. un courant $\eta(t)$) **indépendamment** du reste du circuit.

source idéale de tension caractéristique $u = e \quad \forall i$

source idéale de courant caractéristique $i = \eta \quad \forall u$

- ▶ **source stationnaire** : alimentation stabilisée (peut fonctionner en source de I ou en source de U dans certains régimes)
- ▶ **source alternative** : EDF
- ▶ il existe aussi des sources **commandées**

Sources idéales

Définition (Définition)

Une **source idéale** de tension (resp. de courant) délivre une tension $e(t)$ (resp. un courant $\eta(t)$) **indépendamment** du reste du circuit.

source idéale de tension caractéristique $u = e \quad \forall i$

source idéale de courant caractéristique $i = \eta \quad \forall u$

- ▶ **source stationnaire** : alimentation stabilisée (peut fonctionner en source de I ou en source de U dans certains régimes)
- ▶ **source alternative** : EDF
- ▶ il existe aussi des sources **commandées**
- ▶ une source stationnaire aura un comportement générateur si elle est branchée sur un résistor

Modélisation linéaire d'une source réelle

une source idéale de u devrait fournir une puissance infinie à un résistor de résistance nulle

Modélisation linéaire d'une source réelle

une source idéale de u devrait fournir une puissance infinie à un résistor de résistance nulle

Définition (Modèle linéaire d'une source réelle)

Une source **réelle linéaire** est caractérisée par

sa **tension à vide / force électromotrice** e

sa **résistance interne** r

Sa caractéristique est, en **convention générateur** :

$$u = e - ri$$

Modélisation linéaire d'une source réelle

une source idéale de u devrait fournir une puissance infinie à un résistor de résistance nulle

Définition (Modèle linéaire d'une source réelle)

Une source **réelle linéaire** est caractérisée par
sa tension à vide / force électromotrice e
sa résistance interne r

Sa caractéristique est, en **convention générateur** :

$$u = e - ri$$

- ▶ la tension est toujours inférieure à la fem e
- ▶ la puissance fournie est bornée
- ▶ de l'ordre de $1\ \Omega$ pour une pile AA

1. Grandeurs électrocinétiques

2. Caractéristiques de dipôles

2.1 Définition

2.2 Conducteur ohmique

2.3 Sources

2.4 Condensateur

2.5 Bobine idéale

2.6 Modélisation linéaire des dipôles

3. Lois générales des circuits électriques

4. Association de dipôles

5. Exemples d'utilisation

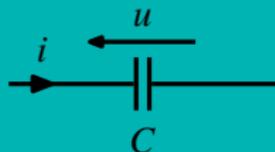
Modèle linéaire du condensateur

on étudie maintenant des dipôles intéressants uniquement en régime variable, on les utilisera toujours dans l'**approximation des régimes quasi stationnaires** (voir plus loin)

Modèle linéaire du condensateur

Définition (Modèle linéaire du condensateur)

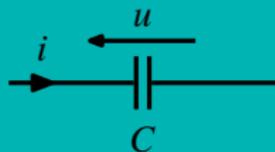
- ▶ un condensateur idéal est un dipôle d'équation caractéristique en convention récepteur : $i = C \frac{du}{dt} = \frac{dq}{dt}$
- ▶ il est caractérisé par sa **capacité** C , exprimée en farads de symbole F. On définit sa **charge** $q = Cu$
- ▶ son schéma électrique est, en **convention récepteur** :



Modèle linéaire du condensateur

Définition (Modèle linéaire du condensateur)

- ▶ un condensateur idéal est un dipôle d'équation caractéristique en convention récepteur : $i = C \frac{du}{dt} = \frac{dq}{dt}$
- ▶ il est caractérisé par sa **capacité** C , exprimée en farads de symbole F. On définit sa **charge** $q = Cu$
- ▶ son schéma électrique est, en **convention récepteur** :



Régime stationnaire

Un condensateur est équivalent à un **interrupteur ouvert** en régime **stationnaire**.

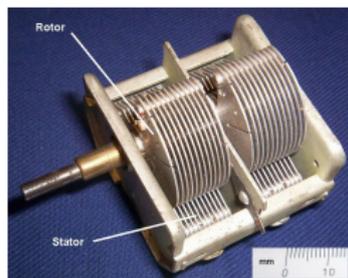
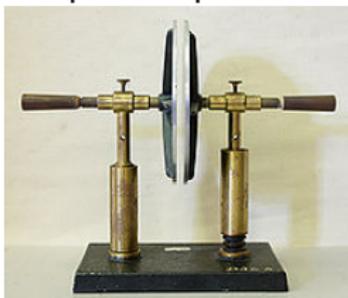
Condensateurs réels

constitué par des surfaces conductrices (« armatures » s'il est plan)
séparées par un isolant (**diélectrique**)

²cf. cours d'électrostatique de 2^e année

Condensateurs réels

constitué par des surfaces conductrices (« armatures » s'il est plan) séparées par un isolant (**diélectrique**)



Condensateurs réels

²cf. cours d'électrostatique de 2^e année

Condensateurs réels

- ▶ q désigne la charge portée par une armature, l'autre porte $-q$, le condensateur est globalement neutre, sa charge totale est nulle

Condensateurs réels

- ▶ q désigne la charge portée par une armature, l'autre porte $-q$, le condensateur est globalement neutre, sa charge totale est nulle
- ▶ $i = \frac{dq}{dt}$ en veillant aux conventions d'orientation

Condensateurs réels

- ▶ q désigne la charge portée par une armature, l'autre porte $-q$, le condensateur est globalement neutre, sa charge totale est nulle
- ▶ $i = \frac{dq}{dt}$ en veillant aux conventions d'orientation
- ▶ on montre² qu'il existe une constante C telle que : $q = Cu$

²cf. cours d'électrostatique de 2^e année

Énergie électrostatique

Définition (Énergie électrostatique d'un condensateur)

Un condensateur reçoit la puissance :

$$\mathcal{P}_r = \frac{dCu^2/2}{dt} = \frac{dq^2/(2C)}{dt}.$$

On peut donc définir l'énergie électrostatique $\mathcal{E}_{\text{élec}}$ telle que :

$$\frac{d\mathcal{E}_{\text{élec}}}{dt} \equiv \mathcal{P}_r \quad \text{On choisit : } \mathcal{E}_{\text{élec}} = \frac{Cu^2}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

Énergie électrostatique

Définition (Énergie électrostatique d'un condensateur)

Un condensateur reçoit la puissance :

$$\mathcal{P}_r = \frac{dCu^2/2}{dt} = \frac{dq^2/(2C)}{dt}.$$

On peut donc définir l'**énergie électrostatique** $\mathcal{E}_{\text{élec}}$ telle que :

$$\frac{d\mathcal{E}_{\text{élec}}}{dt} \equiv \mathcal{P}_r \quad \text{On choisit : } \mathcal{E}_{\text{élec}} = \frac{Cu^2}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

\mathcal{P}_r peut être **positif ou négatif** selon que $\mathcal{E}_{\text{élec}}$ croît ou décroît

Énergie électrostatique

« Condensation » des charges/de l'énergie

- ▶ L'énergie $\mathcal{E}_{\text{élec}}$ est **emmagasinée** dans le condensateur. La continuité temporelle de cette énergie impose la **continuité** de la tension u à ses bornes et de la charge q .
- ▶ Le condensateur peut avoir un comportement générateur ou récepteur en régime variable mais n'échange pas d'énergie en régime stationnaire.

Énergie électrostatique

« Condensation » des charges/de l'énergie

- ▶ L'énergie $\mathcal{E}_{\text{elec}}$ est **emmagasinée** dans le condensateur. La continuité temporelle de cette énergie impose la **continuité** de la tension u à ses bornes et de la charge q .
- ▶ Le condensateur peut avoir un comportement générateur ou récepteur en régime variable mais n'échange pas d'énergie en régime stationnaire.
- ▶ analogie hydraulique : système de vases communicants, l'énergie emmagasinée est proportionnelle au carré de la différence d'altitude
- ▶ petits condensateurs « céramique » $C \simeq 1 \cdot 10^{-6} \text{ F}$
- ▶ gros condensateurs « électrolytiques » $C \simeq 1 \cdot 10^{-3} \text{ F}$

Énergie électrostatique

« Condensation » des charges/de l'énergie

- ▶ L'énergie $\mathcal{E}_{\text{elec}}$ est **emmagasinée** dans le condensateur. La continuité temporelle de cette énergie impose la **continuité** de la tension u à ses bornes et de la charge q .
- ▶ Le condensateur peut avoir un comportement générateur ou récepteur en régime variable mais n'échange pas d'énergie en régime stationnaire.
- ▶ analogie hydraulique : système de vases communicants, l'énergie emmagasinée est proportionnelle au carré de la différence d'altitude
- ▶ petits condensateurs « céramique » $C \simeq 1 \cdot 10^{-6} \text{ F}$
- ▶ gros condensateurs « électrolytiques » $C \simeq 1 \cdot 10^{-3} \text{ F}$

Énergie électrostatique

« Condensation » des charges/de l'énergie

- ▶ L'énergie $\mathcal{E}_{\text{elec}}$ est **emmagasinée** dans le condensateur. La continuité temporelle de cette énergie impose la **continuité** de la tension u à ses bornes et de la charge q .
- ▶ Le condensateur peut avoir un comportement générateur ou récepteur en régime variable mais n'échange pas d'énergie en régime stationnaire.
- ▶ analogie hydraulique : système de vases communicants, l'énergie emmagasinée est proportionnelle au carré de la différence d'altitude
- ▶ petits condensateurs « céramique » $C \simeq 1 \cdot 10^{-6} \text{ F}$
- ▶ gros condensateurs « électrolytiques » $C \simeq 1 \cdot 10^{-3} \text{ F}$

1. Grandeurs électrocinétiques

2. Caractéristiques de dipôles

2.1 Définition

2.2 Conducteur ohmique

2.3 Sources

2.4 Condensateur

2.5 Bobine idéale

2.6 Modélisation linéaire des dipôles

3. Lois générales des circuits électriques

4. Association de dipôles

5. Exemples d'utilisation

Modèle linéaire de la bobine

On regarde cette fois-ci la dérivée première de i

Régime stationnaire

Une bobine est équivalente à un **interrupteur fermé** en régime **stationnaire**.

Modèle linéaire de la bobine

Définition (Modèle linéaire de la bobine)

- ▶ une bobine idéale est un dipôle d'équation caractéristique en convention **récepteur** : $u = L \frac{di}{dt}$, caractérisée par son **auto-inductance** L , exprimée en henrys de symbole H.



- ▶ son schéma est, en **convention récepteur** :

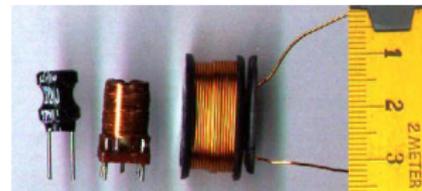
Régime stationnaire

Une bobine est équivalente à un **interrupteur fermé** en régime **stationnaire**.

Bobines réelles

- ▶ enroulement d'un fil conducteur, souvent autour d'un noyau de fer doux
- ▶ effet d'**auto-induction** entre chacune des spires de la bobine
- ▶ L de l'ordre du mH au H, on parlera souvent d'**inductance** au lieu d'auto-inductance

Bobines réelles



Énergie magnétique

Définition (Énergie magnétique d'une bobine)

Une bobine reçoit la puissance :

$$\mathcal{P}_r = \frac{dLi^2/2}{dt}.$$

On peut donc définir l'**énergie magnétique** \mathcal{E}_{mag} :

$$\frac{d\mathcal{E}_{\text{mag}}}{dt} \equiv \mathcal{P}_r. \quad \text{On choisit : } \mathcal{E}_{\text{mag}} = \frac{Li^2}{2}.$$

Énergie magnétique

Continuité de l'énergie magnétique

- ▶ L'énergie \mathcal{E}_{mag} est **emmagasinée** dans la bobine. La continuité temporelle de cette énergie impose la **continuité** de l'intensité i traversant la bobine.
- ▶ La bobine peut avoir un comportement générateur ou récepteur en régime variable mais n'échange pas d'énergie en régime stationnaire.

1. Grandeurs électrocinétiques

2. Caractéristiques de dipôles

2.1 Définition

2.2 Conducteur ohmique

2.3 Sources

2.4 Condensateur

2.5 Bobine idéale

2.6 Modélisation linéaire des dipôles

3. Lois générales des circuits électriques

4. Association de dipôles

5. Exemples d'utilisation

Définition

Les dipôles précédents sont des exemples de dipôles **linéaires**, *ie* tels que i et u sont reliés par une équation différentielle **linéaire** ($i, u, \frac{d^n i}{dt^n}, \frac{d^n u}{dt^n}, e(t)$) :

régime stationnaire caractéristique statique affine (résistor, source, interrupteurs)

Définition

Les dipôles précédents sont des exemples de dipôles **linéaires**, *ie* tels que i et u sont reliés par une équation différentielle **linéaire** ($i, u, \frac{d^n i}{dt^n}, \frac{d^n u}{dt^n}, e(t)$) :

régime stationnaire caractéristique statique affine (résistor, source, interrupteurs)

Définition

Les dipôles précédents sont des exemples de dipôles **linéaires**, *ie* tels que i et u sont reliés par une équation différentielle **linéaire** ($i, u, \frac{d^n i}{dt^n}, \frac{d^n u}{dt^n}, e(t)$) :

régime stationnaire caractéristique statique affine (résistor, source, interrupteurs)

régime variable condensateur $i = C \frac{du}{dt}$

Définition

Les dipôles précédents sont des exemples de dipôles **linéaires**, *ie* tels que i et u sont reliés par une équation différentielle **linéaire** ($i, u, \frac{d^n i}{dt^n}, \frac{d^n u}{dt^n}, e(t)$) :

régime stationnaire caractéristique statique affine (résistor, source, interrupteurs)

régime variable condensateur $i = C \frac{du}{dt}$

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

Définition

Les dipôles précédents sont des exemples de dipôles **linéaires**, *ie* tels que i et u sont reliés par une équation différentielle **linéaire** ($i, u, \frac{d^n i}{dt^n}, \frac{d^n u}{dt^n}, e(t)$) :

régime stationnaire caractéristique statique affine (résistor, source, interrupteurs)

régime variable condensateur $i = C \frac{du}{dt}$

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

source sinusoïdale $u(t) = U_0 \cos(\omega t) - ri(t)$

Grandeurs électrocinétiques

Caractéristiques de dipôles

Lois générales des circuits électriques

Association de dipôles

Exemples d'utilisation

Définition

Conducteur ohmique

Sources

Condensateur

Bobine idéale

Modélisation linéaire des dipôles

Étude d'un dipôle non-linéaire : la photodiode

Étude d'un dipôle non-linéaire : la photodiode

- ▶ caractéristique statique non linéaire

Étude d'un dipôle non-linéaire : la photodiode

- ▶ caractéristique statique non linéaire
- ▶ dipôle polarisé

Étude d'un dipôle non-linéaire : la photodiode

- ▶ caractéristique statique non linéaire
- ▶ dipôle polarisé
- ▶ comportement essentiellement récepteur

Étude d'un dipôle non-linéaire : la photodiode

- ▶ caractéristique statique non linéaire
- ▶ dipôle polarisé
- ▶ comportement essentiellement récepteur
- ▶ dans le noir (comportement d'une diode classique) :

Étude d'un dipôle non-linéaire : la photodiode

- ▶ caractéristique statique non linéaire
- ▶ dipôle polarisé
- ▶ comportement essentiellement récepteur
- ▶ dans le noir (comportement d'une diode classique) :
 - ▶ \simeq interrupteur **fermé** quand $u = 0$

Étude d'un dipôle non-linéaire : la photodiode

- ▶ caractéristique statique non linéaire
- ▶ dipôle polarisé
- ▶ comportement essentiellement récepteur
- ▶ dans le noir (comportement d'une diode classique) :
 - ▶ \simeq interrupteur **fermé** quand $u = 0$
 - ▶ \simeq interrupteur **ouvert** quand $u < 0$

Étude d'un dipôle non-linéaire : la photodiode

- ▶ caractéristique statique non linéaire
- ▶ dipôle polarisé
- ▶ comportement essentiellement récepteur
- ▶ dans le noir (comportement d'une diode classique) :
 - ▶ \simeq interrupteur **fermé** quand $u = 0$
 - ▶ \simeq interrupteur **ouvert** quand $u < 0$
 - ▶ **une diode ne laisse passer le courant que dans un seul sens**

Étude d'un dipôle non-linéaire : la photodiode

- ▶ caractéristique statique non linéaire
- ▶ dipôle polarisé
- ▶ comportement essentiellement récepteur
- ▶ dans le noir (comportement d'une diode classique) :
 - ▶ \simeq interrupteur **fermé** quand $u = 0$
 - ▶ \simeq interrupteur **ouvert** quand $u < 0$
 - ▶ **une diode ne laisse passer le courant que dans un seul sens**
- ▶ éclairée :

Étude d'un dipôle non-linéaire : la photodiode

- ▶ caractéristique statique non linéaire
- ▶ dipôle polarisé
- ▶ comportement essentiellement récepteur
- ▶ dans le noir (comportement d'une diode classique) :
 - ▶ \simeq interrupteur **fermé** quand $u = 0$
 - ▶ \simeq interrupteur **ouvert** quand $u < 0$
 - ▶ **une diode ne laisse passer le courant que dans un seul sens**
- ▶ éclairée :
 - ▶ peu de changement pour $u = 0$

Étude d'un dipôle non-linéaire : la photodiode

- ▶ caractéristique statique non linéaire
- ▶ dipôle polarisé
- ▶ comportement essentiellement récepteur
- ▶ dans le noir (comportement d'une diode classique) :
 - ▶ \simeq interrupteur **fermé** quand $u = 0$
 - ▶ \simeq interrupteur **ouvert** quand $u < 0$
 - ▶ **une diode ne laisse passer le courant que dans un seul sens**
- ▶ éclairée :
 - ▶ peu de changement pour $u = 0$
 - ▶ \simeq source idéale de courant η quand $u < 0$

Grandeurs électrocinétiques

Caractéristiques de dipôles

Lois générales des circuits électriques

Association de dipôles

Exemples d'utilisation

Définition

Conducteur ohmique

Sources

Condensateur

Bobine idéale

Modélisation linéaire des dipôles

Étude d'un dipôle non-linéaire : la photodiode

Grandeurs électrocinétiques

Caractéristiques de dipôles

Lois générales des circuits électriques

Association de dipôles

Exemples d'utilisation

Définition

Conducteur ohmique

Sources

Condensateur

Bobine idéale

Modélisation linéaire des dipôles

Étude d'un dipôle non-linéaire : la photodiode

Étude d'un dipôle non-linéaire : la photodiode

première approximation interrupteur fermé pour $u > 0$ et source de courant pour $u \leq 0$

tension de seuil V_d il faut au moins $u = V_d > 0$ pour avoir un courant $i \geq 0$

résistance dynamique R_d u doit croître pour faire croître $i \geq 0$

1. Grandeurs électrocinétiques
2. Caractéristiques de dipôles
- 3. Lois générales des circuits électriques**
4. Association de dipôles
5. Exemples d'utilisation

1. Grandeurs électrocinétiques

2. Caractéristiques de dipôles

3. Lois générales des circuits électriques

3.1 Circuit électrique

3.2 Lois de Kirchhoff

3.3 Approximation des régimes quasistationnaires

3.4 Théorème de superposition

4. Association de dipôles

5. Exemples d'utilisation

Description

Définition (Topologie d'un réseau électrique)

- nœud** l'**intersection** d'au moins trois conducteurs,
- branche** un tronçon de réseau ne contenant **aucun nœud**,
- maille** un ensemble de branches formant une **boucle fermée**, pouvant être parcourue en ne passant qu'**une seule fois** par chacun de ses nœuds. On peut l'orienter en choisissant arbitrairement un sens de parcours.

Description

Définition (Associations série et parallèle)

Deux dipôles sont branchés **en série** s'ils ont une borne commune et s'ils sont parcourus par le **même courant**.

Ils sont branchés **en parallèle**, **en dérivation** si leurs deux bornes sont communes. La **tension** à leurs bornes est alors la même.

Description

- ▶ on pourra **éclater un nœud** en rajoutant des fils pour faciliter la lecture (on vérifiera que la tension aux bornes d'un fil est négligeable)

Grandeurs électrocinétiques

Caractéristiques de dipôles

Lois générales des circuits électriques

Association de dipôles

Exemples d'utilisation

Circuit électrique

Lois de Kirchhoff

Approximation des régimes quasistationnaires

Théorème de superposition

Terre et masse

Grandeurs électrocinétiques

Caractéristiques de dipôles

Lois générales des circuits électriques

Association de dipôles

Exemples d'utilisation

Circuit électrique

Lois de Kirchhoff

Approximation des régimes quasistationnaires

Théorème de superposition

Terre et masse

Terre et masse

réseau domestique ► éléments en parallèle avec la centrale

Terre et masse

- réseau domestique
 - ▶ éléments en parallèle avec la centrale
 - ▶ chacun en série avec un interrupteur dans chaque branche

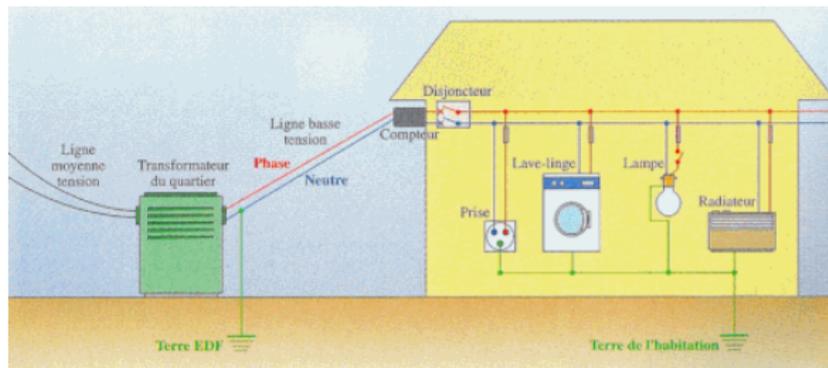
Terre et masse

- réseau domestique
- ▶ éléments en parallèle avec la centrale
 - ▶ chacun en série avec un interrupteur dans chaque branche
 - ▶ plusieurs branches partagent le même disjoncteur

Terre et masse

- réseau domestique
- ▶ éléments en parallèle avec la centrale
 - ▶ chacun en série avec un interrupteur dans chaque branche
 - ▶ plusieurs branches partagent le même disjoncteur
 - ▶ la carcasse métallique de chaque appareil est reliée à la terre pour protéger contre l'électrocution

Terre et masse



Terre et masse

- circuit électronique** ▶ on choisit un potentiel nul en un point du réseau nommé **masse**
- ▶ on éclate le nœud de la masse
 - ▶ la masse est reliée à la terre par les appareils protégés du circuit (source, oscilloscope) par le circuit domestique
 - ▶ ☠ certains branchements des appareils protégés créent des **boucles de masse** en rajoutant des connexions non désirées (cas de deux GBF en série...)

1. Grandeurs électrocinétiques

2. Caractéristiques de dipôles

3. Lois générales des circuits électriques

3.1 Circuit électrique

3.2 Lois de Kirchhoff

3.3 Approximation des régimes quasistationnaires

3.4 Théorème de superposition

4. Association de dipôles

5. Exemples d'utilisation

Régime stationnaire

- ▶ on établit deux lois fondamentales, suffisantes pour déterminer tous les tensions/intensité d'un circuit

Régime stationnaire

- ▶ on établit deux lois fondamentales, suffisantes pour déterminer tous les tensions/intensité d'un circuit
- ▶ on regarde d'abord le cas **stationnaire**

1^{re} loi de Kirchhoff : des nœuds

- ▶ les intensités parvenant à un nœud ne sont pas indépendantes
- ▶ on choisit une convention d'orientation des courants par rapport au nœud (entrant ou sortant)

1^{re} loi de Kirchhoff : des nœuds

Loi des nœuds

La somme **algébrique** des intensités arrivant à un nœud est nulle. On peut écrire :

$$\sum_k \varepsilon_k I_k = 0,$$

avec, pour tout k , $\varepsilon_k = +1$ si la flèche du courant d'intensité I_k pointe vers le nœud et $\varepsilon_k = -1$ sinon.

L'intensité est en particulier **uniforme** dans une **branche**.

1^{re} loi de Kirchhoff : des nœuds

Loi des nœuds

La somme **algébrique** des intensités arrivant à un nœud est nulle. On peut écrire :

$$\sum_k \varepsilon_k I_k = 0,$$

avec, pour tout k , $\varepsilon_k = +1$ si la flèche du courant d'intensité I_k pointe vers le nœud et $\varepsilon_k = -1$ sinon.

L'intensité est en particulier **uniforme** dans une **branche**.

- ▶  un signe + ou - ne présume **rien sur signe** de I_k
- ▶ traduit la conservation de la charge quand les courants sont **stationnaires**

2^e loi de Kirchhoff : des mailles

- ▶ les tensions dans une maille ne sont pas indépendantes
- ▶ on **oriente** une maille pour fixer les conventions de signe

2^e loi de Kirchhoff : des mailles

Loi des mailles

La somme **algébrique** des tensions d'une maille orientée est nulle. On peut écrire :

$$\sum_k \varepsilon_k U_k = 0,$$

avec, pour tout k , $\varepsilon_k = +1$ si la flèche de la tension U_k est dans le sens positif d'orientation de la maille et $\varepsilon_k = -1$ sinon.

2^e loi de Kirchhoff : des mailles

- ▶  mettre un signe + ou - ne présume rien sur le signe de u_k
- ▶ puisque qV est l'énergie d'une charge, cette loi traduit la conservation de l'énergie des charges sur un tour de la maille en régime stationnaire

1. Grandeurs électrocinétiques

2. Caractéristiques de dipôles

3. Lois générales des circuits électriques

3.1 Circuit électrique

3.2 Lois de Kirchhoff

3.3 **Approximation des régimes quasistationnaires**

3.4 Théorème de superposition

4. Association de dipôles

5. Exemples d'utilisation

Présentation

- ▶ en régime stationnaire, les i et v en chaque point sont constants et dépendent les uns des autres, fixés par les sources

Présentation

- ▶ en régime stationnaire, les i et v en chaque point sont constants et dépendent les uns des autres, fixés par les sources
- ▶ si la tension d'une source varie instantanément, les i et v vont évoluer vers de nouvelles valeurs fixées par la nouvelle valeur

Présentation

- ▶ en régime stationnaire, les i et v en chaque point sont constants et dépendent les uns des autres, fixés par les sources
- ▶ si la tension d'une source varie instantanément, les i et v vont évoluer vers de nouvelles valeurs fixées par la nouvelle valeur
- ▶ la variation de la source est une perturbation qui se propage à $\simeq c$ (comme une vague en hydraulique)

Présentation

- ▶ en régime stationnaire, les i et v en chaque point sont constants et dépendent les uns des autres, fixés par les sources
- ▶ si la tension d'une source varie instantanément, les i et v vont évoluer vers de nouvelles valeurs fixées par la nouvelle valeur
- ▶ la variation de la source est une perturbation qui se propage à $\simeq c$ (comme une vague en hydraulique)
- ▶ si cette variation est **lente** par rapport au temps de propagation, chaque point du circuit répond « instantanément » aux variations des sources, comme en régime stationnaire.

Énoncé

on admet :

Approximation des régimes quasi stationnaires (ARQS)

Un régime est **quasi-stationnaire/lentement variable** si la durée caractéristique τ de ses variations est grande devant la durée de propagation τ_{propa} des ondes électromagnétiques dans le réseau.

En notant l la taille caractéristique du réseau et $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ la vitesse de la lumière, on a $\tau_{\text{propa}} \propto \frac{l}{c}$ et le régime sera lentement variable si :

$$\tau \gg \frac{l}{c}.$$

Il est dans ce cas légitime d'effectuer l'**approximation des régimes quasi-stationnaires** dans laquelle le comportement des éléments d'un circuit est le même qu'en régime stationnaire :

- ▶ les effets des phénomènes de propagation d'ondes électromagnétiques sont négligeables,
- ▶ les lois de Kirchhoff sont vérifiées,
- ▶ les caractéristiques des dipôles fondamentaux sont valables.

Cadre d'application

- ▶ pour $\ell = 1 \text{ m}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, on sera dans l'ARQS pour $f \ll 300 \text{ MHz}$, largement vérifié en TPs.

Cadre d'application

- ▶ pour $\ell = 1 \text{ m}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, on sera dans l'ARQS pour $f \ll 300 \text{ MHz}$, largement vérifié en TPs.
- ▶ circuit de distribution ERDF : $f = 50 \text{ Hz}$, il faut $l \ll 1 \cdot 10^7 \text{ m}$ pour être dans l'ARQS, vérifié sur la métropole.

Cadre d'application

- ▶ pour $\ell = 1 \text{ m}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, on sera dans l'ARQS pour $f \ll 300 \text{ MHz}$, largement vérifié en TPs.
- ▶ circuit de distribution ERDF : $f = 50 \text{ Hz}$, il faut $l \ll 1 \cdot 10^7 \text{ m}$ pour être dans l'ARQS, vérifié sur la métropole.
- ▶ toutes les antennes fonctionneront **hors** de l'ARQS puisqu'elles émettent ou reçoivent des ondes électromagnétiques.

1. Grandeurs électrocinétiques

2. Caractéristiques de dipôles

3. Lois générales des circuits électriques

3.1 Circuit électrique

3.2 Lois de Kirchhoff

3.3 Approximation des régimes quasistationnaires

3.4 Théorème de superposition

4. Association de dipôles

5. Exemples d'utilisation

Théorème de superposition

On admet que la linéarité des lois de Kirchhoff assure que :

Théorème de superposition

Théorème (de superposition)

*Dans un réseau linéaire alimenté par plusieurs sources **indépendantes**, le courant circulant dans une branche, ou la différence de potentiel entre deux points, est la **somme algébrique** des courants ou des différences de potentiel produits par chacune des sources **indépendantes** agissant seule, toute les autres sources **indépendantes** étant éteintes.*

Théorème de superposition

Théorème (de superposition)

Dans un réseau linéaire alimenté par plusieurs sources indépendantes, le courant circulant dans une branche, ou la différence de potentiel entre deux points, est la somme algébrique des courants ou des différences de potentiel produits par chacune des sources indépendantes agissant seule, toutes les autres sources indépendantes étant éteintes.

- ▶ éteindre une source idéale de tension revient à annuler sa force électromotrice ($e = 0$) ie à la remplacer par un fil/interrupteur fermé (court-circuit)
- ▶ éteindre une source idéale de courant revient à annuler son courant électromoteur ($\eta = 0$) ie à la remplacer par un interrupteur ouvert

1. Grandeurs électrocinétiques
2. Caractéristiques de dipôles
3. Lois générales des circuits électriques
- 4. Association de dipôles**
5. Exemples d'utilisation

1. Grandeurs électrocinétiques
2. Caractéristiques de dipôles
3. Lois générales des circuits électriques
- 4. Association de dipôles**
 - 4.1 Associations de résistors**
 - 4.2 Sources linéaires
5. Exemples d'utilisation

Série et parallèle

Résistances équivalentes

L'association **série** de résistors de résistances R_k est un résistor de résistance $R = \sum_k R_k$.

L'association **parallèle** de résistors de conductances G_k est un résistor de conductance $G = \sum_k G_k$.

Série et parallèle

Résistances équivalentes

L'association **série** de résistors de résistances R_k est un résistor de résistance $R = \sum_k R_k$.

L'association **parallèle** de résistors de conductances G_k est un résistor de conductance $G = \sum_k G_k$.

- ▶ pour deux résistors en parallèle : $R_{eq} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$
- ▶ la résistance d'une association série est supérieure à la plus grande des résistances
- ▶ la résistance d'une association parallèle est inférieure à la plus petite des résistances

Ponts diviseurs

Pont diviseur de tension

La tension aux bornes de l'un des résistors (résistance R_{k_0}) d'une association série de résistors (résistances R_k) soumise à la tension totale u_{tot} est :

$$u_{k_0} = u_{\text{tot}} \frac{R_{k_0}}{\sum_k R_k}.$$

Ponts diviseurs

Pont diviseur de courant

L'intensité du courant parcourant un résistor (conductance G_{k_0}) d'une association parallèle de résistors (résistances R_k) parcourue par un courant d'intensité totale i_{tot} est :

$$i_{k_0} = i_{\text{tot}} \frac{G_{k_0}}{\sum_k G_k}.$$

Résistances des appareils complexes

Définition (Résistance d'entrée)

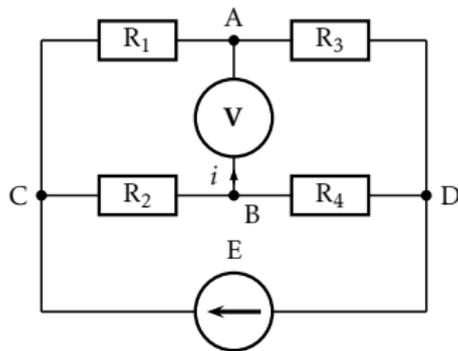
La résistance d'entrée R_e d'un dipôle **passif** est la résistance équivalente vue de l'extérieur.

- ▶ $R_e = U/I$ en convention récepteur quels que soient les composants de l'appareil (en régime stationnaire)
- ▶ valable aussi pour l'entrée d'un quadripôle (amplificateur)
- ▶ la résistance d'un voltmètre idéal doit être infinie pour qu'il ne prélève pas de courant (idem pour un oscilloscope)
- ▶ la résistance d'un ampèremètre idéal doit être nulle pour que la tension à ses bornes soit nulle

Application : pont de Wheatstone

montage permettant de
comparer des résistances

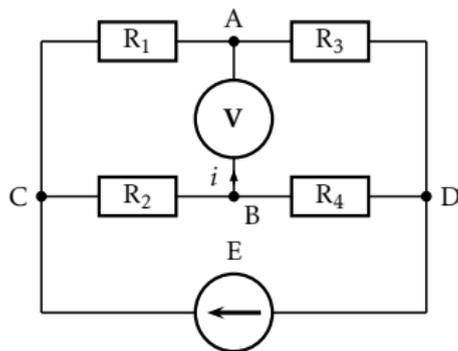
- ▶ voltmètre idéal, traversé par un courant d'intensité nulle : $i = 0$,



Application : pont de Wheatstone

montage permettant de
comparer des résistances

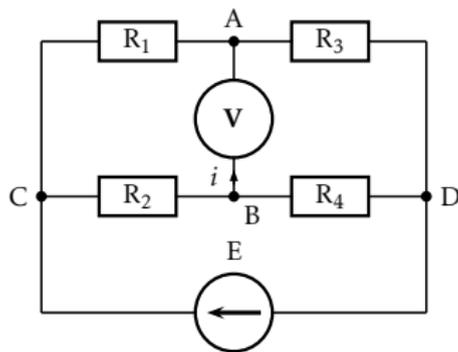
- ▶ voltmètre idéal, traversé par un courant d'intensité nulle : $i = 0$,
- ▶ le pont est dit **équilibré** quand $U_{AB} = 0$,



Application : pont de Wheatstone

montage permettant de
comparer des résistances

- ▶ voltmètre idéal, traversé par un courant d'intensité nulle : $i = 0$,
- ▶ le pont est dit **équilibré** quand $U_{AB} = 0$,
- ▶ les résistances doivent vérifier $R_1 R_4 = R_2 R_3$ pour que le pont soit équilibré.



1. Grandeurs électrocinétiques
2. Caractéristiques de dipôles
3. Lois générales des circuits électriques
- 4. Association de dipôles**
 - 4.1 Associations de résistors
 - 4.2 Sources linéaires**
5. Exemples d'utilisation

Modèles de Thévenin et Norton

Modèles de Thévenin et Norton

Toute source **linéaire** peut être modélisée comme :

- ▶ l'association **série** d'un générateur idéal de tension de force électromotrice e et d'un résistor de résistance interne r : c'est le **modèle de Thévenin**,
- ▶ l'association parallèle d'un générateur idéal de courant de courant électromoteur $\eta = e/r$ et du même résistor : c'est le **modèle de Norton**.

Modèles de Thévenin et Norton

Modèles de Thévenin et Norton

Toute source **linéaire** peut être modélisée comme :

- ▶ l'association **série** d'un générateur idéal de tension de force électromotrice e et d'un résistor de résistance interne r : c'est le **modèle de Thévenin**,
- ▶ l'association parallèle d'un générateur idéal de courant de courant électromoteur $\eta = e/r$ et du même résistor : c'est le **modèle de Norton**.

Résistance de sortie

La **résistance de sortie** r_s d'un dipôle actif **linéaire** est la résistance du modèle linéaire équivalent.

Elle est :

- ▶ **nulle** pour une source de tension idéale,
- ▶ **infinie** pour une source de courant

Modèles de Thévenin et Norton

Résistance de sortie

La **résistance de sortie** r_s d'un dipôle actif **linéaire** est la résistance du modèle linéaire équivalent.

Elle est :

- ▶ **nulle** pour une source de tension idéale,
 - ▶ **infinie** pour une source de courant
-
- ▶ $u = e - r_s i$ quels que soient les composants de l'appareil
 - ▶ elle modélise la chute de tension (resp. de courant) quand la source débite du courant (resp. produit une tension)
 - ▶ elle vaut $\simeq 50\Omega$ pour les générateurs basse fréquence de TPs

Associations de sources

Associations de sources

L'association **série** de sources **linéaires de forces électromotrices** e_k et de résistances internes r_k peut être modélisée comme une source de **Thévenin** :

$$e_{\text{série}} = \sum_k \varepsilon_k e_k \quad r_{\text{série}} = \sum_k r_k.$$

L'association **parallèle** de sources **linéaires de courant électromoteur** η_k et de résistances internes r_k peut être modélisée comme une source de **Norton** :

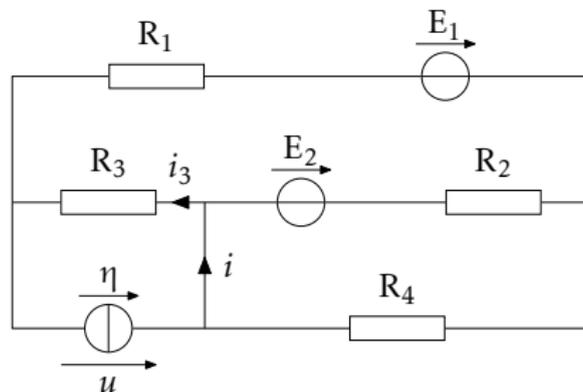
$$\eta_{\parallel} = \sum_k \varepsilon_k \eta_k \quad \frac{1}{r_{\parallel}} = \sum_k \frac{1}{r_k}.$$

- ▶ association série de deux thévenins
- ▶ association série d'un thévenin et d'un Norton

1. Grandeurs électrocinétiques
2. Caractéristiques de dipôles
3. Lois générales des circuits électriques
4. Association de dipôles
- 5. Exemples d'utilisation**

1. Grandeurs électrocinétiques
2. Caractéristiques de dipôles
3. Lois générales des circuits électriques
4. Association de dipôles
- 5. Exemples d'utilisation**
 - 5.1 Application des lois de Kirchhoff**
 - 5.2 Résistances
 - 5.3 Transformations de circuits
 - 5.4 Dipôle non linéaire
 - 5.5 Application du théorème de superposition

Exercice I



- 1 Repérer et dénombrer les nœuds, les branches et les mailles.
- 2
 - a Le conducteur ohmique de résistance R_3 et la source idéale de courant sont-ils en dérivation ?
 - b Les conducteurs ohmiques de résistance R_3 et R_1 sont-ils en série ?

Exercice

- 1 Introduire, pour chaque dipôle, l'intensité du courant électrique et la tension à leurs bornes en respectant les consignes suivantes :
 - ▶ choix de la convention récepteur pour les conducteurs ohmiques et de la convention générateur pour les sources idéales ;
 - ▶ flèches tensions orientées dans le même sens que la force électromotrice pour les sources idéales de tension ;
 - ▶ intensité orientée dans le même sens que le courant électromoteur pour la source idéale de courant.
- 2 En utilisant la loi des nœuds, montrer qu'il suffit de déterminer les expressions de i et de i_3 pour connaître l'intensité du courant dans toutes les branches.
- 3 En utilisant la loi des mailles et les caractéristiques des dipôles, établir un système de trois équations à trois inconnues u , i et i_3 .
- 4 Comment résoudrait-on ce système ?

Solution

$$u = R_3 i_3 - u$$

$$i = E_2 - R_2(i - i_3) + R_4(\eta - i)$$

$$i_3 = R_3 i_3 + E_2 - R_2(i - i_3) - E_1 - R_1(\eta - i_3)$$

Code python

```
from sympy import symbols, solve, pprint
u, i, i3 = symbols('u i i3') # Inconnues
E1, E2, eta = symbols('E1 E2 eta') # Donnees
R1, R2, R3, R4 = symbols('R1 R2 R3 R4') # Donnees
sol = solve((R3 * i3 - u,
            E2 - R2 * (i - i3) + R4 * (eta - i),
            R3 * i3 + E2 - R2 * (i - i3) - E1 - R1 * (eta - i3)),
            u, i, i3)
pprint(sol)
```

1. Grandeurs électrocinétiques
2. Caractéristiques de dipôles
3. Lois générales des circuits électriques
4. Association de dipôles
- 5. Exemples d'utilisation**
 - 5.1 Application des lois de Kirchhoff
 - 5.2 Résistances**
 - 5.3 Transformations de circuits
 - 5.4 Dipôle non linéaire
 - 5.5 Application du théorème de superposition

Résistances d'entrée et de sortie en hifi

Un amplificateur hifi amplifie le signal d'un appareil comme un lecteur de disques vinyl pour alimenter des hauts-parleurs. On le modélise comme un quadripôle dont :

- ▶ l'entrée est un résistor de résistance R_e dite « d'entrée ». On note U_e la tension à ses bornes.
- ▶ la sortie est un générateur linéaire de Thévenin dont la force électromotrice E est proportionnelle à U_e et la résistance dite « de sortie » est notée R_s . On a $E = kU_e$, avec k une constante.

Le lecteur de disques vinyl est modélisé par un générateur linéaire de force électromotrice E_v constante et de résistance interne R_v .

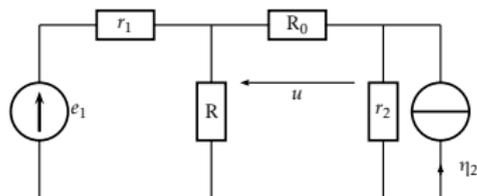
Le haut-parleur est modélisé par un résistor de résistance R_{HP} .

Les signaux électriques associés à la reproduction musicale sont bien évidemment variables mais on les considérera stationnaires pour ces discussions.

- 1 Faire un schéma du branchement du lecteur de disques sur l'entrée de l'ampli et du haut-parleur sur sa sortie.
- 2 On a $R_v = 5\text{k}\Omega$ et $E_v = 5\text{mV}$. La résistance R_e peut être variée.

1. Grandeurs électrocinétiques
2. Caractéristiques de dipôles
3. Lois générales des circuits électriques
4. Association de dipôles
- 5. Exemples d'utilisation**
 - 5.1 Application des lois de Kirchhoff
 - 5.2 Résistances
 - 5.3 Transformations de circuits**
 - 5.4 Dipôle non linéaire
 - 5.5 Application du théorème de superposition

On cherche à déterminer la tension u aux bornes du résistor de résistance R_0 .

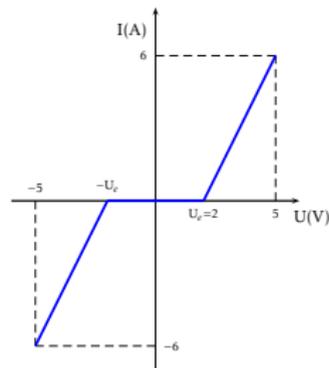


- 1 Transformer le circuit en une seule maille en utilisant successivement plusieurs transformations Thévenin/Norton.
- 2 En déduire u , à l'aide d'un pont diviseur de tension.

1. Grandeurs électrocinétiques
2. Caractéristiques de dipôles
3. Lois générales des circuits électriques
4. Association de dipôles
- 5. Exemples d'utilisation**
 - 5.1 Application des lois de Kirchhoff
 - 5.2 Résistances
 - 5.3 Transformations de circuits
 - 5.4 Dipôle non linéaire**
 - 5.5 Application du théorème de superposition

Énoncé

Un électrolyseur est un dipôle électrochimique dans lequel le passage d'un courant provoque une réaction chimique. On donne la caractéristique statique en convention récepteur d'un tel dipôle ci-contre.

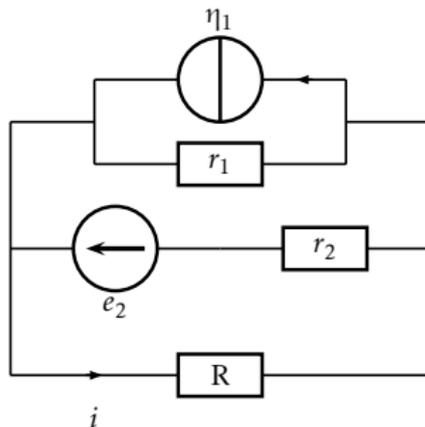


- 1 S'agit-il d'un dipôle passif, actif ?
- 2 Déterminer le point de fonctionnement s'il est branché sur un résistor.
- 3 On le branche maintenant sur un générateur de force électromotrice $E = 3,5\text{V}$ et de résistance interne $r = 0,5\Omega$. Déterminer le point de fonctionnement.
- 4 Exprimer la puissance reçue par l'électrolyseur en fonction de U_e et I et r_d . En interpréter les différents termes.

1. Grandeurs électrocinétiques
2. Caractéristiques de dipôles
3. Lois générales des circuits électriques
4. Association de dipôles
- 5. Exemples d'utilisation**
 - 5.1 Application des lois de Kirchhoff
 - 5.2 Résistances
 - 5.3 Transformations de circuits
 - 5.4 Dipôle non linéaire
 - 5.5 Application du théorème de superposition**

Exercice

Déterminer, par application du théorème de superposition des états l'intensité i du courant circulant dans le résistor de résistance R .



Indispensable

- ▶ caractéristiques des dipôles
- ▶ conventions et comportements générateur et récepteur
- ▶ loi des mailles et nœuds
- ▶ ponts diviseurs
- ▶ transformations thévenin et Norton
- ▶ modélisation avec résistances d'entrée et de sortie
- ▶ cadre d'application de l'ARQS
- ▶ penser à simplifier au maximum les circuits en y reconnaissant les ponts

- ▶ photographie par Hannes Grobe
- ▶ photographie par André Karwath