

Guy Chateigner, Michel Boës, Daniel Bouix,
Jacques Vaillant, Daniel Verkindère

Manuel de génie électrique

DUNOD

Illustration de couverture : © Frank Rohde/shutterstock.com

© Dunod, 2006, tirage corrigé 2007,
2022 pour la nouvelle présentation.
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

EAN 9782100854707

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

AVANT-PROPOS	X
GRANDEURS – UNITÉS – PRÉFIXES SI	XI
PARTIE 1 • ÉLECTRICITÉ ET SIGNAUX	
CHAPITRE 1 • QU'EST-CE QUE L'ÉLECTRICITÉ ?	2
1.1 Particules, charges électriques et porteurs de charges	2
1.2 Phénomène de conduction : le courant électrique	4
1.3 Potentiel électrique d'une charge	9
CHAPITRE 2 • LOIS GÉNÉRALES DE L'ÉLECTRICITÉ	12
2.1 Les dipôles	12
2.2 Théorèmes sur les circuits électriques	19
CHAPITRE 3 • ÉLECTROSTATIQUE	29
3.1 Champs électrique et d'induction électrique	29
3.2 Potentiel électrique	33
3.3 Principe des condensateurs	35
CHAPITRE 4 • ÉLECTROMAGNÉTISME – FERROMAGNÉTISME	39
4.1 Excitation magnétique	39
4.2 Induction magnétique	44
4.3 Milieux amagnétiques	44
4.4 Milieux ferromagnétiques	45
4.5 Flux d'induction magnétique	47
4.6 Réductance $\mathfrak{R}$ d'un C.M.P.	48
4.7 Flux d'auto-induction	50
4.8 Circuits à flux variable	52

CHAPITRE 5 • RÉGIME SINUSOÏDAL PERMANENT MONOPHASÉ – ÉTUDE EN FRÉQUENCE	54
5.1 Caractéristiques d'une grandeur sinusoïdale	54
5.2 Régime sinusoïdal permanent : Méthodes de calculs	56
5.3 Impédance et admittance complexes d'un dipôle	61
5.4 Puissances – Facteur de puissance	62
5.5 Facteur de qualité – Transformation série ↔ parallèle	67
5.6 Circuits résonants	69
5.7 Étude en fréquence – Fonction de transfert complexe	71
CHAPITRE 6 • RÉGIME SINUSOÏDAL PERMANENT TRIPHASÉ	78
6.1 Installation triphasée – Définitions	78
6.2 Couplages	82
6.3 Puissances – Facteur de puissance	84
CHAPITRE 7 • RÉGIME VARIABLE – VALEURS MOYENNE ET EFFICACE	87
7.1 Régime variable	87
7.2 Valeur moyenne	88
7.3 Valeur efficace	89
7.4 Décomposition d'un signal périodique	91
7.5 Caractérisation d'un signal	92
CHAPITRE 8 • RÉGIME PÉRIODIQUE – SÉRIES DE FOURIER	95
8.1 Séries de Fourier	95
8.2 Régime périodique – Interprétation physique	99
8.3 Représentations graphiques – Spectres	105
8.4 Quelques signaux classiques	109
CHAPITRE 9 • ÉTUDE TEMPORELLE D'UN SYSTÈME LINÉAIRE	112
9.1 Système linéaire	112
9.2 Principe général de l'étude temporelle	113
9.3 Système linéaire du premier ordre	116
9.4 Système linéaire du deuxième ordre	126
CHAPITRE 10 • ÉTUDE SYMBOLIQUE – TRANSFORMÉE DE LAPLACE	135
10.1 Causalité	135
10.2 Impulsion unité ou distribution de Dirac	137
10.3 Transformée de Laplace	140
10.4 Principes de l'étude symbolique d'un système linéaire	150
10.5 Système linéaire du premier ordre	158
10.6 Système linéaire du deuxième ordre	163

PARTIE 2 • COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES

CHAPITRE 11 • RÉSISTANCES	168
11.1 Modèle de base	168
11.2 Limites et imperfections	170
11.3 Résistances variables et ajustables – Potentiomètres	173

CHAPITRE 12 • CONDENSATEURS	175
12.1 Modèle de base	175
12.2 Limites et imperfections	180
CHAPITRE 13 • BOBINES NON-COUPLÉES	184
13.1 Modèle de base	184
13.2 Limites et imperfections	189
CHAPITRE 14 • BOBINES COUPLÉES	194
14.1 Modèle de base	194
14.2 Limites et imperfections	201
CHAPITRE 15 • TRANSFORMATEURS	203
15.1 Introduction	203
15.2 Transformateur parfait (T.P.)	204
15.3 Transformateur sans fuite ni perte (T.S.F.P.)	207
15.4 Transformateur avec fuites et « pertes cuivre »	207
15.5 Transformateur avec fuites magnétiques, « pertes cuivre » et « pertes fer »	210
15.6 Transformateur dans l'hypothèse de Kapp	210
15.7 Transformateur réel – Effets non-linéaires	211
CHAPITRE 16 • DIODES	214
16.1 Diodes à jonction PN	214
16.2 Particularités de certaines diodes	223
CHAPITRE 17 • TRANSISTORS BIPOLAIRES	228
17.1 Symboles – Constitution	228
17.2 Transistor NPN	229
17.3 Transistor PNP	242
17.4 Transistors particuliers	242
CHAPITRE 18 • TRANSISTORS MOS	245
18.1 Symboles – Constitution	245
18.2 MOSFET canal N à enrichissement	246
18.3 MOSFET canal P à enrichissement	257
18.4 MOSFET à appauvrissement	258
18.5 L^2 FET (Logic Level FET)	259
18.6 MOSFET à mesure de courant (SensorFET)	259
18.7 FREDFET (Fast Recovery Epitaxial Diode FET)	261
18.8 I.G.B.T.	261
CHAPITRE 19 • THYRISTORS	262
19.1 S.C.R. (redresseurs commandés)	262
19.2 G.T.O. Thyristors	267
19.3 TRIAC	267
19.4 DIAC	271
19.5 Contraintes de mise en œuvre des S.C.R. et TRIAC	272

CHAPITRE 20 • PHOTOCOMPOSANTS	277
20.1 Généralités	277
20.2 Diodes électroluminescentes (ou LED)	281
20.3 Diodes LASER	284
20.4 Photodiodes	285
20.5 Phototransistors	289
20.6 Photopiles ou piles solaires	290
20.7 Photocoupleurs	290
CHAPITRE 21 • AMPLIFICATEURS OPÉRATIONNELS	291
21.1 Symboles – Constitution	291
21.2 Modèle élémentaire – Modèle parfait	292
21.3 Limites et imperfections	293
CHAPITRE 22 • COMPAREURS ANALOGIQUES	301
22.1 Symboles - Description	301
22.2 Modèle élémentaire – Modèle parfait	302
22.3 Limites et imperfections	303
CHAPITRE 23 • DISSIPATION THERMIQUE	306
23.1 Analogie électrique du modèle thermique	306
23.2 Chaîne de dissipation thermique	307
23.3 Modèle thermique statique (ou continu)	307
23.4 Modèle thermique dynamique (ou transitoire)	308
23.5 Plusieurs composants sur un même refroidisseur	313

PARTIE 3 • ÉLECTRONIQUE DU SIGNAL

CHAPITRE 24 • FILTRAGE ANALOGIQUE	316
24.1 Fonction – Filtres idéaux	316
24.2 Fonctions de transfert élémentaires	317
24.3 Approximation des filtres analogiques idéaux	327
24.4 Fréquence d'échantillonnage – Filtre anti-repliement	331
CHAPITRE 25 • AMPLIFICATION ET OPÉRATIONS ANALOGIQUES	333
25.1 Généralités – Définitions	333
25.2 Amplification en tension	337
25.3 Amplification en courant	340
25.4 Conversion courant-tension (transimpédance)	341
25.5 Conversion tension-courant (transadmittance)	342
25.6 Amplification différentielle	344
25.7 Amplification de puissance	348
25.8 Adaptation d'impédance	353
25.9 Autres opérations analogiques sur les signaux	355

CHAPITRE 26 • CONDITIONNEMENT DES SIGNAUX	363
26.1 Introduction	363
26.2 Calcul différentiel – Sensibilité	364
26.3 Petites variations – Calcul approché	365
26.4 Erreurs – Incertitudes – Tolérances	367
26.5 Calibration	371
CHAPITRE 27 • SYSTÈMES BOUCLÉS : CONTRE RÉACTION – OSCILLATEURS	374
27.1 Principe des systèmes bouclés : la réaction	374
27.2 La contre-réaction appliquée à l'amplification	379
27.3 Oscillateurs sinusoïdaux	384
CHAPITRE 28 • COMPARAISON ANALOGIQUE	392
28.1 Comparaison	392
28.2 Comparaison à hystérésis	394
28.3 Comparaison à fenêtre	397
CHAPITRE 29 • GÉNÉRATION DE SIGNAUX « TOUT OU RIEN » (TOR)	400
29.1 Monostable	400
29.2 Astable	402
29.3 Retard – Temporisation	405
29.4 Conduite du raisonnement dans deux cas usuels	409
CHAPITRE 30 • CONVERSIONS NUMÉRIQUE ANALOGIQUE ET ANALOGIQUE NUMÉRIQUE	412
30.1 Définitions	412
30.2 C.N.A.	413
30.3 C.A.N.	415
30.4 Codes utilisés dans les C.N.A. et C.A.N.	416
30.5 Spécifications des C.N.A. et C.A.N.	421

PARTIE 4 • ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

CHAPITRE 31 • REDRESSEMENT NON COMMANDÉ	428
31.1 Redressement monophasé simple alternance	429
31.2 Redressement monophasé double alternance	433
31.3 Redressement triphasé simple alternance	438
31.4 Redressement triphasé double alternance en pont	440
31.5 Principales caractéristiques des montages	443
CHAPITRE 32 • REDRESSEMENT COMMANDÉ	444
32.1 Redressement monophasé simple alternance	445
32.2 Redressement monophasé double alternance	449
32.3 Redressement triphasé simple alternance	458
32.4 Redressement triphasé double alternance	463
32.5 Facteur de puissance d'un redresseur	469
32.6 Critères de choix	471

CHAPITRE 33 • HACHEURS	472
33.1 Hacheur série ou dévolteur	472
33.2 Hacheur parallèle ou survolteur	477
33.3 Hacheur à accumulation inductive	484
33.4 Hacheur deux quadrants ou en demi-pont	485
33.5 Hacheur quatre quadrants ou en pont	488
CHAPITRE 34 • ALIMENTATIONS À DÉCOUPAGE	492
34.1 Convertisseurs sans isolation galvanique	492
34.2 Convertisseurs avec isolation galvanique	501
CHAPITRE 35 • RELAIS STATIQUES – GRADATEURS	512
35.1 Relais statiques	512
35.2 Gradateurs	523
CHAPITRE 36 • ONDULEURS AUTONOMES	528
36.1 Principe de base en monophasé	528
36.2 Principe d'un onduleur de tension en pont	529
36.3 Principe d'un onduleur triphasé	542

PARTIE 5 • MACHINES ÉLECTRIQUES

CHAPITRE 37 • ÉNERGÉTIQUE (CHARGES – COMPARAISON DES MOTEURS)	544
37.1 Bilan énergétique	544
37.2 Travail d'une force – Travail d'un couple	546
37.3 Équation de la dynamique	548
37.4 Moment d'inertie d'un solide par rapport à un axe	549
37.5 Caractéristiques idéales de charges	551
37.6 Comparaison des moteurs	552
CHAPITRE 38 • TRANSFORMATEURS EN RÉGIME SINUSOÏDAL À FRÉQUENCE CONSTANTE	553
38.1 Utilisation – Schéma de principe – Fonctionnement	553
38.2 Transformateur parfait (T.P.)	554
38.3 Transformateur réel	555
38.4 Transformateur triphasé	557
CHAPITRE 39 • CHAMPS TOURNANTS	561
39.1 Organisation des machines tournantes alternatives	561
39.2 Distribution du champ magnétique dans l'entrefer	562
39.3 Création d'un champ tournant	565
39.4 Cas d'un enroulement monophasé	568
39.5 Cas d'un enroulement diphasé	568

CHAPITRE 40 • MACHINES SYNCHRONES TRIPHASÉES	569
40.1 Constitution – Principe – Excitation	569
40.2 Alternateur triphasé	571
40.3 Moteur synchrone	578
40.4 Moteur « brushless » ou à commutation électronique	579
40.5 Utilisation des machines synchrones	583
CHAPITRE 41 • MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS	584
41.1 Constitution – Fonctionnement – Glissement	584
41.2 Bilan des puissances – Rendement	586
41.3 Modèle et caractéristiques	587
41.4 Démarrage	589
41.5 Réglage de la vitesse	590
41.6 Réversibilité et freinage	590
41.7 Moteur asynchrone monophasé	590
CHAPITRE 42 • MOTEURS PAS À PAS	591
42.1 Principe et définitions	591
42.2 Propriétés	595
42.3 Étage de puissance	595
42.4 Régimes statique et dynamique	596
42.5 Utilisation	598
CHAPITRE 43 • MACHINES À COURANT CONTINU	599
43.1 Principes généraux	599
43.2 Moteur à excitation indépendante ou séparée	603
43.3 Moteur à excitation série	605
INDEX	608

Avant-propos

Cet ouvrage réunit aide-mémoire et méthodes du génie électrique en 43 chapitres thématiques organisés en cinq parties :

- l'électricité et les signaux (phénomènes physiques, lois de l'électricité, régime sinusoïdal, régime périodique, réponses fréquentielles et temporelles, etc.) ;
- les composants électroniques (de la résistance à l'amplificateur opérationnel en passant par les bobines couplées, les thyristors et les photocomposants : leurs modèles et leurs limites, la dissipation thermique) ;
- l'électronique du signal (filtrage, amplification, conversion analogique numérique et numérique analogique, etc.) ;
- l'électronique de puissance (redressement, hacheurs, alimentations à découpage, gradateurs, onduleurs) ;
- les machines électriques (transformateurs, moteurs : synchrones, asynchrones, pas à pas, courant continu).

De nombreux exemples sont présentés sous la forme de questions-réponses.

Cet ouvrage a été conçu pour guider chaque étudiant, pour l'accompagner dans ses études après le bac. Il fait le lien entre les savoirs de l'enseignement secondaire et de l'enseignement supérieur. Plusieurs niveaux de lecture sont possibles. De nombreuses formulations sont compréhensibles dès la fin d'une terminale ou le début d'un premier cycle ; d'autres dévoileront leur intérêt par la suite.

Cet ouvrage s'adresse :

- aux étudiants des IUT, des BTS, des classes préparatoires, des écoles d'ingénieurs, des IUFM, dans les filières de génie électrique, GTR, électronique, électrotechnique, et d'informatique industrielle ;
- aux auditeurs libres de la formation continue pour qui la formation en autonomie est une nécessité ;
- aux professionnels en activité à la recherche de modèles et de méthodes de raisonnement.

Les auteurs

Grandeurs – Unités – Préfixes SI

- *Grandeurs et unités usuelles*

Grandeur		Unité	
Symbole	Nom	Symbole	Nom
a	Accélération	m/s ²	mètre par seconde carrée
B	Induction magnétique	T	tesla
C	Capacité électrique	F	farad
C _{Th} , C _θ	Capacité thermique	J/K	joule par kelvin
E	Champ électrique	V/m	volt par mètre
f	Fréquence	Hz	hertz
F	Force	N	newton
ε	Force magnéto-motrice	A	ampère
ε	Permittivité diélectrique	F/m	farad par mètre
G	Conductance électrique	S	siemens
H	Excitation magnétique	A/m	ampère par mètre
i, I	Courant électrique	A	ampère
ℓ, L	Longueur	m Å	mètre angstrœm (1Å = 10 ⁻¹⁰ m)
L	Inductance propre	H	henry
m	Masse	kg	kilogramme
μ	Perméabilité magnétique	H/m	henry par mètre
M	Moment d'une force	Nm	newton-mètre

Grandeur		Unité	
Symbole	Nom	Symbole	Nom
M	Mutuelle inductance	H	henry
p, P	Puissance, flux thermique	W	watt
q, Q	Quantité d'électricité, charge électrique	C	coulomb
Q	Puissance réactive	var	volt-ampère-réactif
r, R	Résistance électrique	Ω	ohm
R_{Th} , R_{θ}	Résistance thermique	K/W	kelvin par watt
S	Surface	m ²	mètre carré
S	Puissance apparente	VA	volt-ampère
t	Temps	s	seconde
T, θ	Température	K °C	kelvin degré Celsius
u, U	Différence de potentiel, tension	V	volt
v, V	Potentiel électrique	V	volt
v	Vitesse	m/s	mètre par seconde
w, W	Énergie, travail, quantité de chaleur	J	joule
α	Accélération angulaire	rad/s ²	radian par seconde carrée
φ , Φ	Flux d'induction magnétique	Wb	weber
λ	Longueur d'onde	m	mètre
ω	Vitesse angulaire - Pulsation	rad/s	radian par seconde

• *Préfixes des unités du système international*

Préfixe		Facteur multiplicatif
Symbole	Nom	
E	exa	10 ¹⁸
P	peta	10 ¹⁵
T	téra	10 ¹²
G	giga	10 ⁹
M	méga	10 ⁶
k	kilo	10 ³
h	hecto	10 ²
da	déca	10 ¹

Préfixe		Facteur multiplicatif
Symbole	Nom	
d	déci	10 ⁻¹
c	centi	10 ⁻²
m	milli	10 ⁻³
μ	micro	10 ⁻⁶
n	nano	10 ⁻⁹
p	pico	10 ⁻¹²
f	femto	10 ⁻¹⁵
a	atto	10 ⁻¹⁸

• **Décibels.** On peut exprimer le rapport de deux grandeurs, soit par un simple quotient, soit par le logarithme de ce quotient. Le plus souvent, on utilise le logarithme décimal, noté $\log_{10}$ ou plus simplement $\log$.

- Le rapport des puissances p_2 sur p_1 , exprimé en bels (B), de Graham Bell (1847-1922), est défini par :

$$\log \left| \frac{p_2}{p_1} \right|$$

- Le rapport des puissances p_2 sur p_1 , exprimé en décibels (dB), est défini par :

$$10 \log \left| \frac{p_2}{p_1} \right| \quad \text{avec} \quad 1 \text{ B} = 10 \text{ dB}$$

En considérant que p_2 et p_1 sont les puissances dissipées dans deux résistances égales à R_0 , on a :

$$p_1 = \frac{u_1^2}{R_0} = R_0 i_1^2 \quad \text{et} \quad p_2 = \frac{u_2^2}{R_0} = R_0 i_2^2$$

$$\Rightarrow 10 \log \left| \frac{p_2}{p_1} \right| = 20 \log \left| \frac{u_2}{u_1} \right| = 20 \log \left| \frac{i_2}{i_1} \right|$$

- En conséquence et par extension, le rapport des tensions u_2 sur u_1 , et le rapport des intensités des courants i_2 sur i_1 , exprimés en décibels (dB), sont définis par :

$$20 \log \left| \frac{u_2}{u_1} \right| \quad \text{et} \quad 20 \log \left| \frac{i_2}{i_1} \right|$$

Les définitions précédentes donnent des niveaux relatifs de p_2 par rapport à p_1 , de u_2 par rapport à u_1 , et de i_2 par rapport à i_1 . Pour obtenir des niveaux absolus, il faut fixer conventionnellement des valeurs de références.

- Pour une puissance de référence de 1 W, la puissance $p = p(t)$, exprimée en décibels par rapport à 1 W (dBW), est définie par :

$$p_{\text{(dBW)}} = 10 \log \frac{|p_{\text{(W)}}|}{1_{\text{(W)}}} = 10 \log |p_{\text{(W)}}|$$

- Pour une puissance de référence de 1 mW, la puissance $p = p(t)$, exprimée en décibels par rapport à 1 mW (dBm), est définie par :

$$p_{\text{(dBm)}} = 10 \log \frac{|p_{\text{(W)}}|}{10^{-3}_{\text{(W)}}} = 10 \log \frac{|p_{\text{(mW)}}|}{1_{\text{(mW)}}} = 10 \log |p_{\text{(mW)}}|$$

- Pour une tension de référence de 1 V, la tension $u = u(t)$, exprimée en décibels par rapport à 1 V (dBV), est définie par :

$$u_{(\text{dBV})} = 20 \log \frac{|u_{(\text{V})}|}{1_{(\text{V})}} = 20 \log |u_{(\text{V})}|$$

- Relation entre dBm et dBV. Soit u la tension aux bornes d'une résistance R_0 , la puissance dissipée est $p = u^2/R_0$. D'où :

$$p_{(\text{dBm})} = u_{(\text{dBV})} - 10 \log \frac{R_0}{1\,000} \implies P_{\text{Moy (dBm)}} = U_{\text{Eff (dBV)}} - 10 \log \frac{R_0}{1\,000}$$

$$R_0 = 600 \, \Omega \implies p_{(\text{dBm})} \approx u_{(\text{dBV})} + 2,22$$

$$R_0 = 50 \, \Omega \implies p_{(\text{dBm})} \approx u_{(\text{dBV})} + 13,01$$

- Pour une tension de référence de $\sqrt{0,6} \, \text{V} \approx 0,775 \, \text{V}$, la tension $u = u(t)$, exprimée en décibels par rapport à $\sqrt{0,6} \, \text{V} \approx 0,775 \, \text{V}$ (dBu), est définie par :

$$u_{(\text{dBu})} = 20 \log \frac{|u_{(\text{V})}|}{\sqrt{0,6}_{(\text{V})}} \approx 20 \log \frac{|u_{(\text{V})}|}{0,775_{(\text{V})}}$$

Remarque : En téléphonie, l'impédance de référence a été historiquement définie comme étant une résistance pure de $600 \, \Omega$ en Europe ($900 \, \Omega$ aux États-Unis) qui correspond grossièrement à l'impédance moyenne d'une ligne d'abonné dans la bande passante de fréquence allant de 300 Hz à 3 400 Hz. Pour une puissance de référence de 1 mW, on obtient alors une tension efficace de référence de $\sqrt{0,6} \, \text{V} \approx 0,775 \, \text{V}$; d'où la définition du dBu.

- Relation entre dBm et dBu. Soit u la tension aux bornes d'une résistance R , la puissance dissipée est $p = u^2/R$. D'où :

$$p_{(\text{dBm})} = u_{(\text{dBu})} - 10 \log \frac{R}{600} \implies P_{\text{Moy (dBm)}} = U_{\text{Eff (dBu)}} - 10 \log \frac{R}{600}$$

$$R = 600 \, \Omega \implies p_{(\text{dBm})} = u_{(\text{dBu})}$$

$$R = 150 \, \Omega \implies p_{(\text{dBm})} \approx u_{(\text{dBu})} + 6,02$$

- Relation entre dBu et dBV.

$$u_{(\text{dBu})} \approx u_{(\text{dBV})} + 2,22$$

PARTIE 1

Électricité et signaux

Chapitre 1

Qu'est-ce que l'électricité ?

1.1 PARTICULES, CHARGES ÉLECTRIQUES ET PORTEURS DE CHARGES

(Compléments, voir Chapitre 3 : Électrostatique)

1.1.1 Particules et charges électriques (Fig. 1.1)

Particules	Masses	Charges électriques en coulombs (C)	Remarques
Électron 	$m_e \approx 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	$q_e = -e \approx -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Masse très petite. Charge électrique négative.
Proton 	$m_p \approx 16726 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	$q_p = +e \approx +1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Masse 1836,15 fois plus grande que celle de l'électron. Charge électrique positive.
Neutron 	$m_n \approx 16749 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	charge électrique nulle	Il assure la stabilité des noyaux atomiques; il est présent dans tous, sauf dans l'hydrogène. Masse 1838,68 fois plus grande que celle de l'électron.
Photon 	masse nulle	charge électrique nulle	Corpuscule de lumière, il se déplace dans le vide à la célérité : $c \approx 299792 \text{ km/s}$

Fig. 1.1 Électron – Proton – Neutron – Photon

Après la découverte de l'électron, de nombreuses particules ont été mises en évidence : les protons et neutrons qui composent le noyau de l'atome, les photons qui composent la lumière et toutes celles qui sont issues de la fission des noyaux atomiques : neutrinos, muons, kaons, gluons, etc. (une centaine environ).

1.1.2 Forces électrostatiques : Loi de Coulomb

- *Attraction et répulsion de deux charges électriques (Fig. 1.2).*

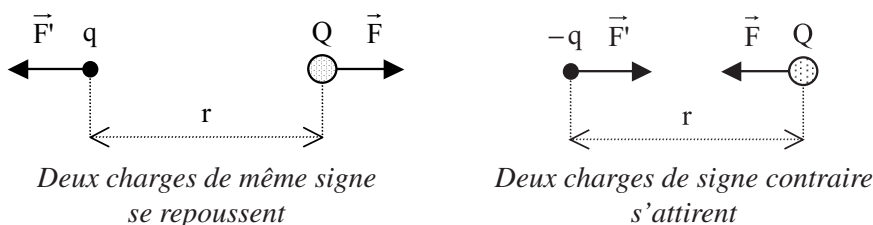


Fig. 1.2 Attraction et répulsion de deux charges électriques

- *Module des forces d'attraction et de répulsion.* Exprimé en newton (N), il est donné par la *loi de Coulomb* :

$$F = F' = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{qQ}{r^2} \quad \text{Unités :} \quad N = \frac{1}{\text{F/m}} \frac{\text{C}^2}{\text{m}^2} = \frac{\text{C}^2}{\text{Fm}}$$

où ϵ est la permittivité absolue du milieu. Dans le vide (et quasiment dans l'air sec) :

$$\epsilon = \epsilon_0 \approx 8,8541878 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

Remarque : La théorie de la propagation des ondes électromagnétiques montre que les constantes ϵ_0 (permittivité du vide), μ_0 (perméabilité magnétique du vide) et c (vitesse de la lumière dans le vide) sont liées par la relation : $\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$. Depuis que la vitesse de la lumière dans le vide est devenue une référence, la permittivité du vide est devenue une constante exacte définie par :

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$$

avec

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \quad \text{et} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2 \text{ (ou H/m)}$$

1.1.3 Champ électrique

La force $\vec{F}$ qui agit sur la charge Q , résulte de l'action à distance de la charge q . Cette interprétation conduit à une nouvelle écriture de la *loi de Coulomb* :

$$\vec{F} = Q\vec{E} \quad \text{Unités : } N = C \frac{V}{m}$$

où l'intensité E , du vecteur champ électrique $\vec{E}$, est :

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q}{r^2} \quad \text{Unités : } V/m = \frac{1}{F/m} \frac{C}{m^2} = \frac{C}{Fm}$$

La charge Q , permet de détecter la présence d'un champ électrique (Fig. 1.3).

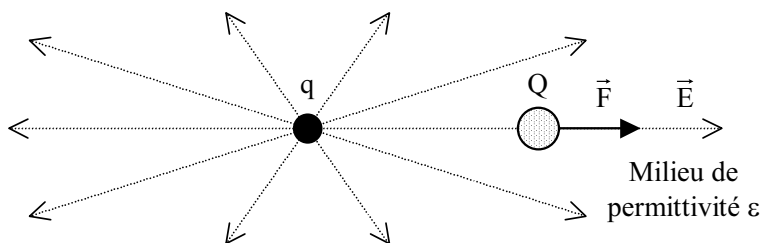


Fig. 1.3 Champ électrique dû à la charge q

1.2 PHÉNOMÈNE DE CONDUCTION : LE COURANT ÉLECTRIQUE

1.2.1 Le courant électrique

• **Courant électrique.** Les charges électriques, soumises à un champ électrique, subissent des forces électrostatiques : elles se déplacent. Le flux de charges à travers une surface S s'appelle *l'intensité du courant électrique*. On le note i et son unité est l'ampère (A).

$$i = \frac{dq}{dt} \quad \text{Unités : } A = \frac{C}{s}$$

Remarque : Si le flux de charges est constant, on a : $I = \Delta Q / \Delta t$

• **Densité moyenne de courant.** On associe à cette grandeur fondamentale, la densité moyenne de courant rapportée à l'unité de surface, notée J :

$$J = \frac{I}{S} \quad \text{Unités : } A/m^2 = \frac{A}{m^2}$$

Question : Sachant qu'un conducteur de cuivre nu supporte approximativement une densité de courant $J = 5 \text{ A/mm}^2$, évaluer la section minimale S_{Min} des conducteurs nécessaire à l'alimentation d'une cuisinière électrique traversée par un courant nominal $I_{\text{Nom}} = 30 \text{ A}$.

Réponse : $S_{\text{Min}} = I_{\text{Nom}}/J = 6 \text{ mm}^2$

• Vitesse des charges – Loi d'Ohm

- Dans le vide, sous l'effet des forces électrostatiques, les charges atteignent couramment des vitesses de l'ordre de plusieurs milliers de m/s (tubes cathodiques).
- Dans la matière, en raison de la difficulté à se frayer un chemin entre les atomes ou molécules, les porteurs de charges, soumis à l'agitation thermique, atteignent rapidement une vitesse limite très faible de l'ordre de quelques mm/s (Cuivre).

C'est la loi d'Ohm qui traduit cette vitesse limite par l'intermédiaire de $\vec{j}$.

1) Sous forme microscopique ($\vec{j}$ est la densité de courant et σ la conductivité du matériau) :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad \text{Unités : } \text{A/m}^2 = (\Omega^{-1} \text{m}^{-1}) (\text{V/m})$$

2) Sous forme macroscopique (I est l'intensité du courant, U la tension aux bornes du conducteur, ℓ est la longueur du conducteur, S sa section et $\rho = 1/\sigma$ la résistivité du matériau) :

$$I = SJ = S\sigma E = S\sigma \frac{U}{\ell} = \frac{S\sigma}{\ell} U = \frac{U}{R}$$

La loi d'Ohm s'écrit alors :

$$U = RI$$

$$\text{Unités : } V = \Omega A \quad \text{avec}$$

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{\ell}{S} = \rho \frac{\ell}{S}$$

Remarque : Pour qu'il y ait un courant I , il faut que le milieu possède des charges libres (conductivité σ) soumises à un champ électrique $\vec{E}$ (Fig. 1.4).

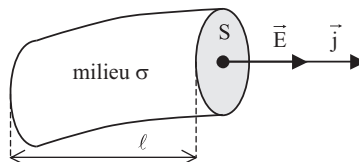


Fig. 1.4 Conduction électrique

1.2.2 Charges libres – Charges liées

Les atomes sont formés d'un noyau entouré d'un nuage électronique (Fig. 1.5).

Pour obtenir des charges électriques il faut arracher à l'atome un ou plusieurs électrons. Cela peut se faire de plusieurs manières :

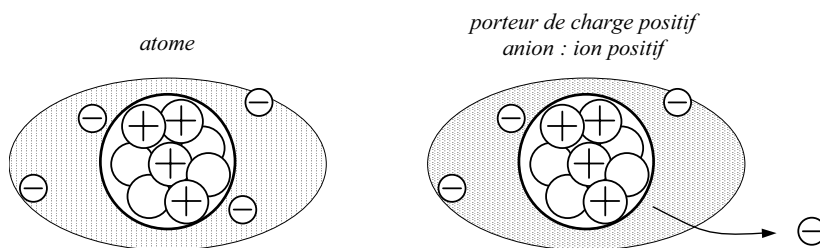


Fig. 1.5 Atome – Ion

1) Par apport d'une énergie extérieure.

- Mécaniquement par frottement : l'air sur la carrosserie d'une voiture.
- Électriquement : un champ électrique intense peut étirer un atome jusqu'à lui extraire un électron (diode Zener).
- Thermiquement : l'agitation thermique des atomes et molécules dans les gaz peut se traduire par l'ionisation de ceux-ci (plasma).

2) Par rapprochement des atomes (cristaux, polycristaux). Bien que les chaînes cristallines doivent leur cohésion à la mise en commun de leurs électrons, elles ne donnent pas toujours des matériaux conducteurs. On trouve : des conducteurs, des semi-conducteurs et des isolants.

1.2.3 Milieux électriques

• **Conducteurs.** Beaucoup d'électrons sont libres de se déplacer à l'intérieur du métal (Fig. 1.6).

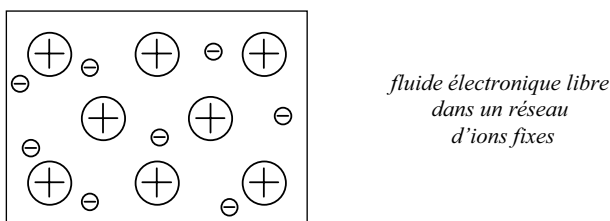


Fig. 1.6 Conducteurs

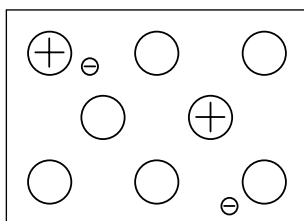
La conductivité d'un métal est grande. Cette conductivité s'exprime en fonction de la mobilité μ des porteurs et de leur concentration n .

$$\sigma = ne\mu \quad \text{Unités :} \quad \Omega^{-1}\text{m}^{-1} = \frac{1}{\text{m}^3} \text{C} \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}} = \frac{1}{\text{m}} \frac{\text{C}}{\text{Vs}} = \frac{1}{\text{m}} \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

Exemple 1.2.1

Le cuivre a une conductivité $\sigma \approx 59 \cdot 10^6 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$.

• **Semi-conducteurs.** Ce sont des monocristaux, extrêmement purs, dont quelques-uns seulement des atomes libèrent à la température ambiante ($T \approx 300 \text{ K}$) un électron, typiquement 1 électron pour plus de 100 millions d'atomes (Fig. 1.7). Les atomes des cristaux semi-conducteurs appartiennent à la colonne IV de classification périodique des éléments.



*fluide électronique et ionique
libre dans un réseau
d'atomes fixes*

Fig. 1.7 Semi-conducteurs intrinsèques

La conduction est assurée, à la fois par les électrons (porteurs négatifs) et les ions positifs qui donnent l'impression de se déplacer car, en raison de l'agitation thermique permanente, des électrons quittent un atome pour un ion, etc. On appelle ces ions positifs des *trous* (porteurs positifs). La conductivité du semi-conducteur est la somme de deux conductivités :

- La conductivité des porteurs positifs (faible) σ_p : les trous se déplacent moins facilement que les électrons.
- La conductivité des électrons (moins faible) σ_n .

Globalement la conductivité est bien plus faible que celle des métaux car les porteurs de charges sont peu nombreux (il y a autant de porteurs de charges positifs que négatifs).

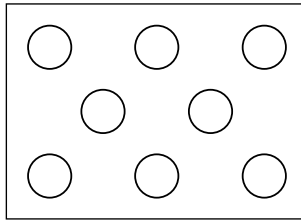
Question : Pour le silicium pur à température ambiante ($T \approx 300 \text{ K}$), on a :

$$\mu_n \approx 0,12 \text{ m}^2/\text{Vs}, \quad \mu_p \approx 0,05 \text{ m}^2/\text{Vs}, \quad \text{et} \quad n_p = n_n = n_i \approx 1,5 \cdot 10^{16} \text{ porteurs/m}^3.$$

Calculer la conductivité.

$$\text{Réponse : } \sigma = \sigma_n + \sigma_p = n_n e \mu_n + n_p e \mu_p \approx 4,08 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$$

• **Isolants.** Aucun électron libre à température ambiante ($T \approx 300 \text{ K}$), dans un isolant (Fig. 1.8). La conductivité est pratiquement nulle.



*Pas d'électron libre
dans un réseau
d'atomes fixes*

Fig. 1.8 Isolants

1.2.4 Influence de la température

● **Conducteurs.** L'agitation thermique augmente avec la température et rend plus difficile la circulation des charges électriques, de ce fait la conductivité des matériaux conducteurs diminue avec la température (σ_0 conductivité à 0 °C, θ température en °C, α coefficient de température négatif en °C⁻¹).

$$\sigma = \sigma_0 (1 + \alpha\theta)$$

● **Semi-conducteurs.** Par contre, dans les matériaux semi-conducteurs à température ambiante, l'agitation thermique a une deuxième conséquence : elle crée de nouvelles charges libres (paires électrons-trous). D'où, à température moyenne, une propriété inverse de celle des conducteurs : La conductivité augmente de façon exponentielle avec la température.

- Pour le germanium la conductivité double tous les 10 °C environ.
- Pour le silicium la conductivité double tous les 6 °C environ.

Cette croissance exponentielle de la conductivité, transforme ces semi-conducteurs en conducteurs à environ 120 °C pour le germanium et 200 °C pour le silicium ! Les diodes, transistors et circuits intégrés perdent leurs propriétés spécifiques pour ces températures à ne jamais dépasser.

1.2.5 Influence de la fréquence – Effet pelliculaire dans un conducteur

Lorsque le courant est alternatif, les effets électromagnétiques chassent les charges du centre du conducteur, c'est ce que l'on appelle *l'effet de peau*. La densité de courant n'est plus uniforme : elle est plus élevée à la périphérie qu'au centre du conducteur (Fig. 1.9).

L'épaisseur de peau est définie par :

$$e = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 \mu_r f \sigma}}$$

où $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m : perméabilité magnétique du vide, μ_r : perméabilité magnétique relative du matériau (sans unité), σ : conductivité du matériau en $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$, et f : fréquence en Hz.

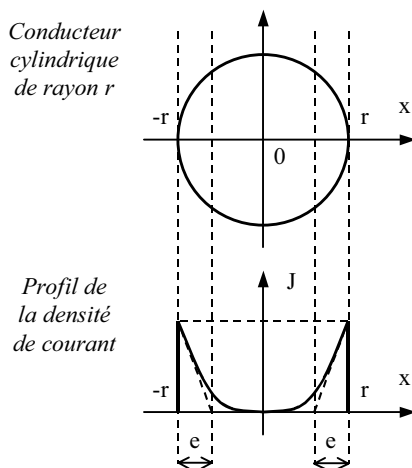


Fig. 1.9 Effet de peau dans un conducteur

Question : Calculer l'épaisseur de peau pour un conducteur en cuivre : ($\sigma \approx 59 \cdot 10^6 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ et $\mu_r \approx 1$) à 50 Hz (réseau EDF).

Réponse : En appliquant la formule, on trouve $e \approx 9,2$ mm. Pour limiter cet effet, on réalise des conducteurs multibrins, et pour le transport d'énergie on utilise des conducteurs multicâbles. De même, les câbles haute-fidélité des enceintes sont multibrins.

Remarque : Plus la fréquence est élevée et plus l'épaisseur de peau diminue.

1.3 POTENTIEL ÉLECTRIQUE D'UNE CHARGE

(Compléments, voir Chapitre 3 : Électrostatique)

1.3.1 But

La charge étudiée q (Fig. 1.10) crée un champ électrique $\vec{E}$ vectoriel. Par simplicité, on remplace ce champ électrique par une grandeur scalaire liée au travail qu'il faudrait fournir à une charge test Q pour l'amener de l'infini jusqu'à la distance r de la charge étudiée q . Cette grandeur s'appelle le *potentiel électrique* noté V .

Remarque : Ainsi défini, le potentiel à distance infinie est nul ; $V(\infty) = 0$.

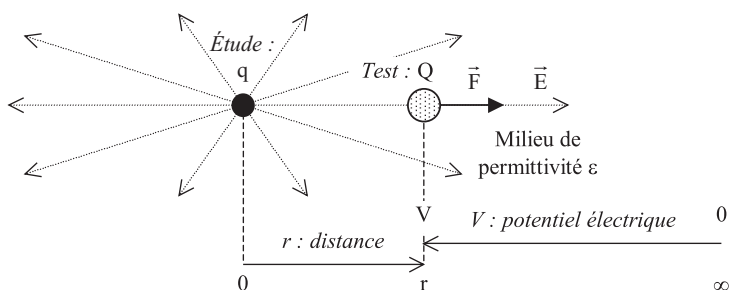


Fig. 1.10 Le potentiel électrique

1.3.2 Travail pour amener Q à distance r de q

- Travail élémentaire dW pour déplacer la charge Q de r à $r - dr$. La force F est supposée constante.

$$dW = -F dr = -QE dr \quad \text{Unités : } J = Nm = C \frac{V}{m}$$

- Travail $W_{A \rightarrow B}$ pour déplacer la charge Q d'une distance A à une distance B . En intégrant de A à B , on obtient :

$$W_{A \rightarrow B} = -Q \int_A^B E(r) dr \quad \text{Unités : } J = C \frac{V}{m}$$

En posant $dV = -E(r) dr$, l'intégrale s'écrit :

$$W_{A \rightarrow B} = Q \int_A^B dV = Q (V_B - V_A) \quad \text{Unités : } J = CV$$

- Travail $W_{\infty \rightarrow M}$ pour déplacer la charge Q de l'infini à M .

$$W_{\infty \rightarrow M} = Q \int_{\infty}^M dV = Q (V_M - V_{\infty}) = Q V_M \quad \text{Unités : } J = CV$$

1.3.3 Potentiel électrique

De ce qui précède, on déduit :

$$V_M = \frac{W_{\infty \rightarrow M}}{Q} \quad \text{Unités : } V = \frac{J}{C}, \quad \text{volt} = \frac{\text{joule}}{\text{coulomb}}$$

La fonction $V_M(r)$ mesure le travail par unité de charge à fournir pour faire passer une charge de l'infini au point M (Fig. 1.11). On appelle V_M le *potentiel électrique* du point M , dû à la charge étudiée q .

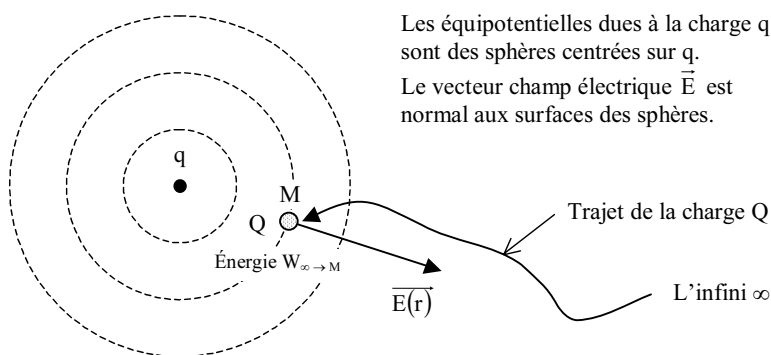


Fig. 1.11 Travail d'une force électrique

Remarques :

- Dès que la charge sera libérée de ses contraintes, elle retournera naturellement vers l'infini et restituera l'énergie qu'elle aura accumulée. Son potentiel sera nul.
- Le potentiel électrique $V_M(r)$ est une grandeur image de l'énergie potentielle électrique stockée par la charge Q , lorsqu'elle est située à distance r de la charge q : elle est indépendante de la charge Q ! C'est donc une notion fondamentalement énergétique.

1.3.4 Différence de potentiel (d.d.p.) électrique – Tension électrique

La circulation du courant dans un circuit ne peut avoir lieu que par un échange énergétique avec un milieu extérieur (Fig. 1.12). Ainsi, les porteurs de charges sont susceptibles de transférer une énergie $Q(V_B - V_A)$ vers le milieu extérieur. La d.d.p. est $V_B - V_A$ et la tension est $U_{BA} = V_B - V_A$.

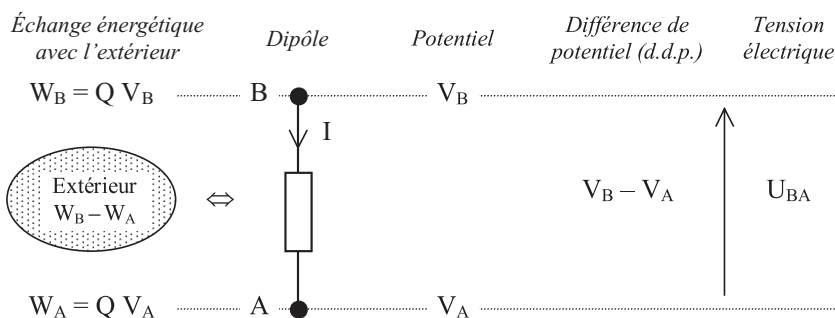


Fig. 1.12 Potentiel – d.d.p. – Tension

Remarque : Il faut imaginer qu'au cours du parcours du circuit électrique, les porteurs de charge voient leur potentiel (énergie) varier, en général diminuer.

Chapitre 2

Lois générales de l'électricité

2.1 LES DIPÔLES

2.1.1 Définition – Conventions

Un dipôle est un récepteur ou un générateur d'énergie électrique, susceptible de convertir l'énergie électrique en une énergie de type différent (chimique, mécanique, radiative, thermique). Il est relié à l'extérieur par deux bornes A et B (Fig. 2.1), le courant entrant par l'une est égal au courant sortant par l'autre. La tension u et le courant i sont des grandeurs algébriques.

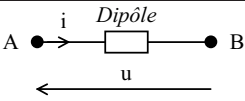
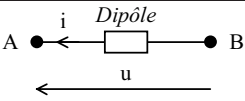
Convention récepteur	Convention générateur
	
La puissance (absorbée, transformée) est positive : $ui > 0$	La puissance (fournie, produite) est positive : $ui > 0$

Fig. 2.1 Conventions récepteur et générateur

2.1.2 Dipôle linéaire – Circuit linéaire

• **Dipôle linéaire.** Un dipôle de relation tension-courant $u = f(i)$ ou $i = g(u)$ est dit linéaire si, et seulement si, la fonction f ou g est linéaire, c'est-à-dire telle que :

$$f(\alpha_1 i_1 + \alpha_2 i_2) = \alpha_1 f(i_1) + \alpha_2 f(i_2) \quad \text{ou} \quad g(\lambda_1 u_1 + \lambda_2 u_2) = \lambda_1 g(u_1) + \lambda_2 g(u_2)$$

• **Circuit linéaire.** Si tous les dipôles constituant un circuit quelconque sont linéaires, alors l'équation permettant le calcul de la sortie $s = s(t)$ en fonction de l'entrée $e = e(t)$ est, dans le cas général, une équation différentielle à coefficients constants du type :

$$a_n \frac{d^n s}{dt^n} + \dots + a_2 \frac{d^2 s}{dt^2} + a_1 \frac{ds}{dt} + a_0 s = b_m \frac{d^m e}{dt^m} + \dots + b_2 \frac{d^2 e}{dt^2} + b_1 \frac{de}{dt} + b_0 e \quad (m \leq n)$$

On dit alors que le circuit est linéaire.

Exemple 2.1.1

La puissance $p = Ri^2$ est non linéaire car la fonction « carré » n'est pas linéaire, sa dérivée dp/di n'est pas indépendante de la valeur de i .

2.1.3 Dipôles élémentaires

a) Classification des dipôles

- Un *dipôle actif* est un dipôle susceptible de produire de l'énergie. *A contrario*, un *dipôle passif* ne peut pas produire de l'énergie.
- Un *dipôle symétrique* est un dipôle tel que :

$$f(i) = -f(-i) \quad \text{ou} \quad g(u) = -g(-u)$$

- *Dipôle linéaire* : voir § 2.1.2

b) Dipôles passifs

• **Éléments passifs linéaires** (Fig. 2.2). On adopte généralement la convention récepteur (u et i : flèches opposées), ce qui évite bien des erreurs.

Remarques :

- Pour un condensateur, la loi traduit le fait que le passage du courant i dans un condensateur, pendant un temps dt entraîne une variation de la tension électrique du qui va s'opposer à son passage. Cette loi s'écrit aussi sous forme intégrale :

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i \, d\tau = \frac{1}{C} \int_0^t i \, d\tau + U_0 \quad \text{avec} \quad U_0 = u(t=0)$$

- Pour une bobine linéaire, la loi traduit la difficulté qu'a l'intensité du courant i à changer dans un circuit inductif. Cela se traduit par l'apparition d'une tension électrique qui s'oppose à la variation du courant ; c'est la loi de Lenz. Cette loi s'écrit aussi sous forme intégrale :

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u \, d\tau = \frac{1}{L} \int_0^t u \, d\tau + I_0 \quad \text{avec} \quad I_0 = i(t=0)$$

- Aspects énergétiques : voir Chapitre 12 : Condensateurs, et Chapitre 13 : Bobines non-couplées.

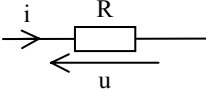
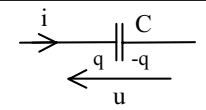
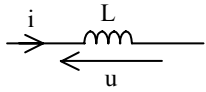
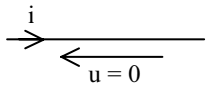
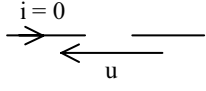
Composant	Symbole	Grandeur caractéristique et unité	Loi	Unités
Résistance (ou résistor)		R : Résistance en ohms (Ω)	$u = Ri$	$V = \Omega A$
Condensateur		C : Capacité en farads (F)	$i = C \frac{du}{dt}$	$A = F \frac{V}{s}$
Bobine		L : Inductance en henrys (H)	$u = L \frac{di}{dt}$	$V = H \frac{A}{s}$
Court-circuit			$\forall i, u = 0$	
Circuit ouvert			$\forall u, i = 0$	

Fig. 2.2 Dipôles passifs linéaires – Convention récepteur

• Éléments passifs non-linéaires

Exemple 2.1.2

- Une V.D.R. (*Voltage Dependant Resistor*) n'est pas un dipôle linéaire. Son équation $i = ku^n$ n'est pas une fonction linéaire de la tension u , et sa dérivée di/du n'est pas indépendante de la valeur de u .
- Une diode (voir Chapitre 16 : Diodes) n'est pas un dipôle linéaire. Son équation

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{u_D}{N U_T}} - 1 \right) \text{ n'est pas une fonction linéaire de la tension } u_D.$$

c) Dipôles actifs

- **Sources** (Fig. 2.3). On adopte indifféremment la convention générateur ou la convention récepteur selon le problème traité.

Remarque : Lorsqu'ils sont utilisés dans des schémas équivalents, les symboles (Fig. 2.3) représentent toujours des sources « idéales » et non « réelles ».

Une source réelle peut souvent être modélisée par une source de tension idéale, en série avec une résistance : c'est le modèle de Thévenin ; on peut aussi la modéliser par une source de courant idéale, en parallèle avec une résistance : c'est le modèle de Norton (voir § 2.2.4).

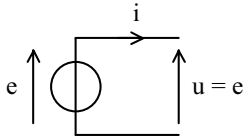
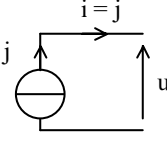
	Symbole	Grandeur caractéristique et unité	Loi
Source de tension		e : Tension en volts (V)	$\forall i, \quad u = e$
Source de courant		j : Intensité en ampères (A)	$\forall u, \quad i = j$

Fig. 2.3 Sources – Convention générateur

Exemple 2.1.3

La batterie de voiture est l'exemple type de la source de tension « presque idéale ». La charge qu'elle est capable de stocker se mesure usuellement en ampère × heure (Ah). Ainsi, une batterie de 12 V capable de stocker 60 Ah, peut délivrer pendant 6 h un courant de 10 A sous une tension de 12 V.

Question : Calculer l'énergie que peut délivrer la batterie de l'exemple précédent.

Réponse : $W = UIt = 12 \times 60 \times 3\,600 = 2\,592 \text{ kJ}$

Remarque : Pratiquement, il n'existe pas de source d'énergie du type « source de courant idéale ». En effet, cela supposerait que l'on soit capable de stocker l'énergie sous forme de courant à valeur constante j. Cependant, on peut réaliser des sources de courant constant en associant des sources d'énergie et des dipôles. C'est le cas d'un transistor associé à une source de tension ou encore d'une photodiode, éclairée par une source d'énergie lumineuse.

- **Source commandée – Source non commandée.** Une *source commandée* ou *liée* est une source dont la grandeur de sortie dépend d'une autre grandeur du circuit. Dans le cas contraire, la source est dite *non-commandée* ou *indépendante*.

Exemple 2.1.4

Le courant de sortie d'un transistor dépend d'une grandeur d'entrée qui est : le courant de base dans les transistors bipolaires, et la tension grille-source pour les transistors à effet de champ (Fig. 2.4).

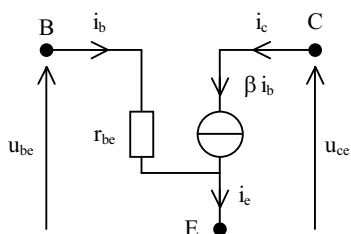
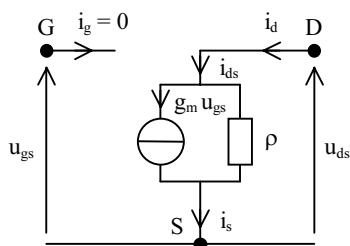
Schéma équivalent « petits signaux »
d'un transistor bipolaireSchéma équivalent « petits signaux »
d'un transistor à effet de champ

Fig. 2.4 Exemples de sources commandées

• **Source commandée linéaire – Source commandée non-linéaire.** Une *source commandée linéaire* est une source commandée dont la grandeur de sortie dépend linéairement de la grandeur de commande. *A contrario*, la source est *non-linéaire*.

2.1.4 Principales limites d'utilisation d'un dipôle

Les principales limites électriques et thermiques d'utilisation d'un dipôle sont : la tension maximale, le courant maximal et la puissance maximale. Ces limites dépendent du fonctionnement qui peut être : continu, alternatif, impulsif, impulsif répétitif, impulsif non-répétitif, etc.

2.1.5 Caractéristique d'un dipôle

Selon le cas, la caractéristique d'un dipôle peut être relevée en continu (caractéristique statique), en alternatif, en impulsif (caractéristique dynamique « larges signaux »), etc.

Exemple 2.1.5

Le dipôle est ici uniquement récepteur car la puissance absorbée ne peut être que positive (Fig. 2.5).

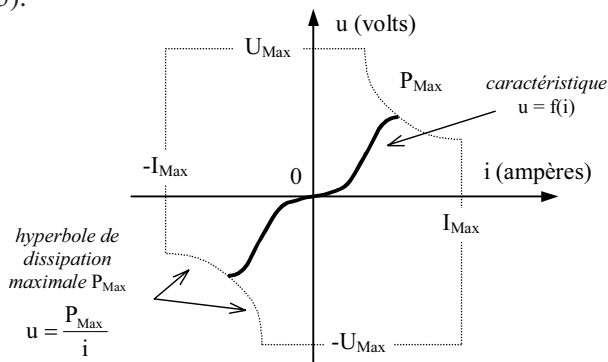


Fig. 2.5 Exemple de caractéristique d'un dipôle

2.1.6 Point de fonctionnement d'un dipôle

Exemple 2.1.6

L'alimentation d'un dipôle récepteur par un dipôle générateur fixe le point de fonctionnement (Fig. 2.6).

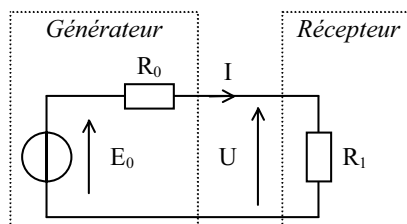


Fig. 2.6 Alimentation d'un récepteur par un générateur

Méthode

Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection des caractéristiques des dipôles générateur et récepteur. Ses coordonnées sont la tension U aux bornes des dipôles et le courant I qui les traverse.

1) D'une manière générale (dipôles non-linéaires ou linéaires), il faut tracer les caractéristiques dans un même repère (Fig. 2.7), ou bien recourir à un procédé informatique (simulation par exemple).

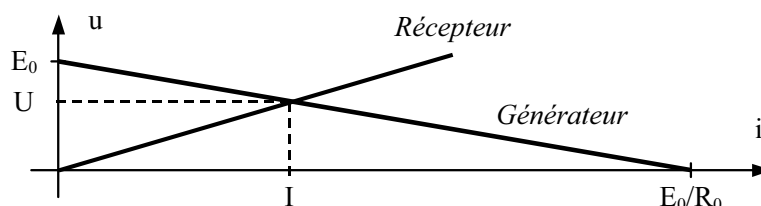


Fig. 2.7 Tracé des caractéristiques (Exemple de la Fig. 2.6)

2) Si les dipôles générateur et récepteur sont linéaires (ce qui est le cas Fig. 2.6 et Fig. 2.7), alors la résolution du système donne la solution :

- Équation du générateur, dite *droite de charge* : $u = E_0 - R_0 i$
- Équation du récepteur : $u = R_1 i$

$$\text{– Système : } \begin{cases} U = E_0 - R_0 I \\ U = R_1 I \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U = \frac{R_1 E_0}{R_0 + R_1} \\ I = \frac{E_0}{R_0 + R_1} \end{cases}$$