

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE



POLYCOPIE DE COURS

Etat de l'art en Génie Electrique

(Cours)

*Préparé par : **Dr. Bachir BOUMEDIENE***

Promotion : **Licence2 Électrotechnique**
Licence2 Électronique
Licence2 Électromécanique
Licence2 Automatique

Semestre: **03**

Expertisé par:
Pr. ALLAOUI Tayeb
Dr. KOULALI Mostefa

Année universitaire: 2023/2024

== Table des matières ==

Sommaire.....	i
Liste des figures et tableaux.....	iv
Acronymes.....	v
Introduction générale.....	2

Chapitre 1 : Electrotechnique

Introduction.....	5
1.1 Définition de l'électrotechnique.....	5
1.2 Processus de production de l'électricité.....	5
1.3 Types de centrales électriques.....	7
1.3.1 Centrales thermiques.....	7
1.3.2 Centrales nucléaires.....	7
a. Principe de fonctionnement.....	8
b. Avantages et inconvénients.....	8
1.3.3 Centrales hydrauliques.....	8
1.3.3.1 Puissance d'une chute d'eau.....	9
1.3.3.2 Classification des turbines hydrauliques.....	10
1.3.3.3 Différents types de centrales hydrauliques.....	10
1.3.4 Centrales de production à base d'énergies renouvelables.....	10
1.3.4.1 Centrale photovoltaïque.....	10
1.3.4.2 Centrale éolienne.....	11
1.3.5 Réseaux électriques.....	12
1.3.5.1 Types de réseaux électriques.....	13
1.3.5.2 Principaux éléments constituant un réseau électrique.....	13
1.3.6 Les niveaux de tension.....	16
1.3.7 Distribution & dispatching.....	17
1.3.8 Résistance & résistivité.....	17
1.3.9 Matériaux électriques.....	17
1.3.9.1 Conducteurs.....	17
1.3.9.2 Isolants.....	17
1.3.9.3 Semi-conducteurs.....	17
1.3.10 Généralités sur l'électronique de puissance.....	18
1.3.11 Les convertisseurs statiques.....	18
1.3.11.1 Définition.....	18
1.3.11.2 Types de convertisseurs statiques.....	18

Chapitre 2 : Electronique

Introduction.....	20
2.1 Notions de base.....	20
2.1.1 Électrons et charges.....	20
2.1.2 Courant électrique.....	20
2.2 Composants électroniques.....	20
2.2.1 Résistances.....	20
a. Définition des résistances.....	20

b. Caractéristiques fondamentales des résistances.....	21
c. Loi d'Ohm et relations fondamentales.....	22
d. Types de résistances.....	22
e. Différents types de résistances.....	23
f. Applications des résistances.....	24
2.2.2 Condensateurs.....	25
a. Rôle d'un condensateur dans les circuits électroniques.....	25
b. Structure d'un condensateur.....	25
c. Mesure de la capacité d'un condensateur.....	26
d. La loi de l'accumulation de charge.....	26
e. La constante de temps d'un condensateur.....	27
f. Types de condensateurs.....	27
g. Applications des condensateurs.....	28
h. Caractéristiques des condensateurs.....	28
2.2.3 Diodes.....	29
a. Fonctionnement d'une diode.....	29
b. Applications des diodes.....	29
2.2.4 Transistors.....	30
a. Fonctionnement des transistors.....	30
b. Applications des transistors.....	31
2.3 Circuits électroniques.....	32
2.3.1 Circuits analogiques.....	32
a. Fonctionnement des circuits analogiques.....	32
b. Applications des circuits analogiques.....	32
c. Avantages et limitations des circuits analogiques.....	33
2.3.2 Circuits numériques.....	33
a. Fonctionnement des circuits numériques.....	33
b. Applications des circuits numériques.....	34
c. Avantages et limitations des circuits numériques.....	34
2.4 Applications de l'électronique.....	34
2.4.1 Électronique grand public.....	34
2.4.2 Communication.....	35
2.4.3 Médecine.....	35
2.5 Conclusion.....	36

Chapitre 3 : Automatique

Introduction.....	38
3.1 Définition de l'automatique.....	38
3.2 Importance et applications de l'automatique.....	39
3.3 Bases historiques et développement de l'automatique.....	39
3.4 Automatique classique.....	39
3.4.1 Introduction aux automates programmables.....	39
3.4.2 Architecture d'un Automate Programmable.....	40
3.4.3 Programmation d'automates.....	40
3.4.4 Fonctions avancées de programmation.....	40
3.4.5 Communication et réseautage.....	41

3.4.6 Applications industrielles.....	41
3.4.7 Dépannage et maintenance.....	41
3.4.8 Tendances actuelles et futures.....	41
3.5 Introduction aux systèmes dynamiques.....	41
3.5.1 Définition.....	41
3.5.2 Importance de l'étude des systèmes dynamiques.....	41
3.5.3 Types de systèmes dynamiques.....	42
a. Les systèmes linéaires et non linéaires.....	42
b. Les systèmes continus et discrets.....	42
3.5.4 Modélisation des systèmes dynamiques.....	42
a. Utilisation d'équations différentielles pour modéliser les systèmes continus.....	43
b. Utilisation d'équations d'état pour modéliser les systèmes discrets et continus.....	43
c. Introduction aux équations d'État.....	43
d. Exemples de modélisation de systèmes.....	44
e. Représentations temporelles et fréquentielles.....	44
✓ Représentation temporelle.....	44
✓ Transformation de Laplace.....	44
✓ Analyse fréquentielle.....	44
✓ Stabilité, marges de stabilité et robustesse.....	45
✓ Performance du système.....	45
3.6 Automatique avancée.....	45
3.6.1 Asservissement.....	45
3.6.2 Contrôleurs PID.....	45
3.6.3 Régulation.....	46
3.6.4 Commandes avancées.....	46
3.7 Automatique non linéaire.....	46
3.8 Conclusion.....	46
Conclusion générale.....	47
Bibliographie.....	49

Liste des figures et tableaux

Figure 1.1 : Centrale de production de l'électricité de type thermique.....	06
Figure 1.2 : Schéma d'une centrale de production de l'électricité de type hydraulique.....	06
Figure 1.3 : Exemple d'une centrale de production photovoltaïque.....	07
Figure 1.4 : Exemple d'une centrale de production de l'électricité de type nucléaire.....	08
Figure 1.5 : Chaîne de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque.....	11
Figure 1.6 : Classement des éléments photovoltaïques.....	11
Figure 1.7 : Éléments constituant une éolienne.....	12
Figure 1.8 : Vue d'ensemble d'un réseau électrique avec plusieurs sources d'énergies.....	12
Figure 1.9 : Jeux de barres d'un poste 380KV.....	14
Figure 1.10 : Disjoncteur haute tension.....	14
Figure 1.11 : Photo d'un sectionneur haute tension.....	14
Figure 1.12 : Transformateur de puissance.....	15
Figure 1.13 : Formes courantes de pylônes.....	16
Figure 1.14 : Efforts mécaniques appliqués et influence de la température sur le câble.....	16
Tableau des niveaux de tension.....	16
Figure 1.15 : Schéma représentant les différents types de convertisseurs statiques.....	18
Figure 2.1 : Représentation d'une résistance sous forme de rectangle.....	21
Figure 2.2 : Code couleur des résistances.....	21
Figure 2.3 : Code couleur d'une résistance de 4,7 k Ω	21
Figure 2.4 : Schéma d'un circuit de résistances connectées en série.....	22
Figure 2.5 : Schéma d'un circuit de résistances connectées en parallèle.....	22
Figure 2.6 : Schéma d'un diviseur de tension.....	24
Figure 2.7 : Schéma d'un diviseur de courant.....	24
Figure 2.8 : Type de Condensateurs à plaques parallèles.....	26
Figure 2.9 : Différents types de Condensateurs.....	28
Figure 2.10 : Fonctionnement d'une diode.....	29
Figure 2.11.a : Redressement en pont de diodes.....	30
Figure 2.11.b : Diodes - LED et diode Zener.....	30
Figure 2.12 : Schéma fonctionnel d'un transistor.....	31
Figure 2.13.a : Transistor bipolaire avec ses deux types : NPN et PNP.....	31
Figure 2.13.b : Transistor à effet de champ avec ses deux types : à canaux N et P.....	31
Figure 2.14 : Schéma d'un circuit analogique représentant un filtre radiofréquence (RF).....	33
Figure 2.15.a : Table de vérité pour portes logiques AND, OR, NOT.....	33
Figure 2.15.b : Réalisation d'un multiplexeur 4x1 à partir de portes logiques.....	33
Figure 3.1 : Association des chaînes d'information et d'énergie pour un système automatisé.....	38
Figure 3.2 : Exemple sur l'ouverture automatisée d'une porte de garage.....	40
Figure 3.3 : Représentation du modèle d'état pour un système linéaire en continue.....	43
Figure 3.4.a : Diagramme de Bode d'un filtre passif de premier ordre (circuit RC).....	45
Figure 3.4.b : Diagramme de Nyquist du 1 ^e ordre.....	45
Figure 3.5 : Régulation par les trois actions PID (architecture parallèle).....	46

Acronymes

RC	Circuit résistance et condensateur
ICs	Développement des circuits intégrés
SoC	Systèmes sur puce
IoT	Internet des objets
IA	Intelligence artificielle
GE	Génie électrique
BT	Basse tension
MT	Moyenne tension
HT	Haute tension
HTA	Haute tension -A-
HTB	Haute tension -B-
SF6	Gaz d'hexafluorure de soufre
NFC 18-510	Norme de sécurité électrique homologuée
DC	Courant continu
AC	Courant alternatif
Re	Résistance équivalente
CTN	Coefficient de température négatif
CTP	Coefficient de température positif
LDR	Résistances dépendantes de la lumière
PN	Jonction dopée positive-négative
LED	Diode électroluminescente
AM	Modulation d'amplitude
FET	à effet de champ
NPN	Jonction dopée : négative-positive-négative
PNP	Jonction dopée : positive-négative-positive
JFET	à effet de champ à jonction
IGFET	à effet de champ à grille isolée
MOSFET	Transistor à effet de champ à structure métal-oxyde-semi-conducteur
SSD	Lecteur à semi-conducteur à l'état solide
CT	Tomographie calculée par ordinateur
IRM	Imagerie par résonance magnétique
API	Automate programmable industriel
Ladder Logic	Langage graphique pour API (logique à relais)
Grafcet	Graphe Fonctionnel de Commande Étape Transition
SFC	Diagramme de fonctions séquentielles
SCADA	Système de contrôle et d'acquisition de données en temps réel
EDO	Equations différentielles ordinaires
PID	Contrôleur proportionnel-intégral-dérivé

Introduction *générale*

Introduction générale

L'électrotechnique, l'électronique et l'automatique sont trois domaines clés de l'ingénierie qui jouent un rôle central dans le développement technologique de notre société moderne. Chacun de ces domaines a ses propres spécificités, mais ils sont interconnectés et se complètent mutuellement, formant ensemble un socle fondamental pour de nombreuses applications industrielles, scientifiques, et quotidiennes.

L'électrotechnique est la branche de l'ingénierie qui traite des applications de l'électricité. Elle se concentre sur la conception, l'analyse et la maintenance des systèmes électriques et électromécaniques. Cela inclut des composants tels que les générateurs, les moteurs, les transformateurs, et les réseaux de distribution électrique. L'électrotechnique joue un rôle vital dans la production et la distribution de l'énergie, assurant que l'électricité, source d'énergie principale pour de nombreuses industries et ménages, est produite de manière fiable, transportée efficacement et utilisée de manière optimale.

Les développements récents dans ce domaine se concentrent sur l'amélioration de l'efficacité énergétique, la réduction des pertes dans les réseaux de distribution, et l'intégration des énergies renouvelables. Avec l'essor des technologies vertes et des réseaux intelligents (smart grids), l'électrotechnique est plus que jamais au cœur des enjeux de développement durable. La gestion de l'énergie, l'automatisation des systèmes électriques et l'intégration de sources d'énergie renouvelable sont des sujets cruciaux qui façonnent l'avenir de l'électrotechnique.

L'électronique est la science des circuits et des dispositifs électroniques qui contrôlent le flux des électrons. Ce domaine couvre une vaste gamme d'applications, des simples circuits analogiques aux systèmes numériques complexes. Les composants électroniques, tels que les résistances, les condensateurs, les transistors, et les diodes, sont les éléments de base qui permettent de concevoir des systèmes capables de traiter des signaux, de stocker de l'information, et de contrôler des dispositifs.

L'électronique est omniprésente dans notre vie quotidienne, des smartphones aux ordinateurs, en passant par les appareils ménagers et les systèmes de divertissement. Ce domaine est également crucial dans les secteurs industriels, où il permet la conception de systèmes de contrôle, de capteurs, et de dispositifs de communication. Les avancées récentes en électronique incluent la miniaturisation des composants, le développement des circuits intégrés (ICs) et des systèmes sur puce (SoC), ainsi que l'émergence de l'électronique flexible et de l'Internet des objets (IoT), qui ouvrent de nouvelles perspectives pour la technologie portable et les systèmes embarqués.

L'automatique, ou contrôle automatique, est une discipline qui concerne la conception de systèmes capables de fonctionner de manière autonome, en régulant automatiquement leurs comportements pour atteindre des objectifs spécifiques. Cela inclut le développement de systèmes de contrôle pour des processus industriels, des véhicules autonomes, des robots, et des systèmes de gestion de l'énergie.

L'automatique est essentielle pour optimiser les performances, améliorer l'efficacité, et garantir la sécurité des systèmes complexes. Elle repose sur l'utilisation de capteurs pour collecter des informations sur l'état du système, des contrôleurs pour prendre des décisions basées sur ces informations, et des actionneurs pour appliquer les commandes nécessaires. Les domaines d'application de l'automatique sont vastes, allant de la gestion des processus industriels à la robotique, en passant par l'automatisation des bâtiments et des infrastructures.

Les progrès dans ce domaine sont largement influencés par l'intégration de l'intelligence artificielle (IA) et de l'apprentissage automatique (machine learning) dans les systèmes de contrôle, permettant de développer des systèmes plus adaptatifs et intelligents. Ces innovations ouvrent la voie à des applications telles que les véhicules autonomes, les systèmes de gestion de l'énergie intelligents.

Ensemble, l'électrotechnique, l'électronique et l'automatique constituent le fondement des technologies modernes. Leur synergie permet de concevoir des systèmes complexes, efficaces et sûrs, qui répondent aux besoins croissants de notre société. Les ingénieurs dans ces domaines jouent un rôle crucial en innovant pour améliorer les performances des systèmes, réduire leur impact environnemental, et ouvrir de nouvelles possibilités technologiques. Alors que la demande pour des systèmes plus intelligents et plus durables continue de croître, ces disciplines restent au cœur des développements technologiques futurs.

CHAPITRE 1: *Electrotechnique*

Introduction :

Le domaine du génie électrique, bien que relativement récent par rapport au génie mécanique ou civil, a rapidement évolué au cours des trois derniers siècles pour devenir l'une des branches les plus cruciales de l'ingénierie moderne. Il a largement influencé le développement rapide de nombreuses autres disciplines de l'ingénierie, des sciences et des arts contemporains. Au cours du siècle dernier, le génie électrique a joué un rôle essentiel dans les progrès sociaux, économiques et industriels de notre société. Depuis la découverte de l'électricité, notre monde a été témoin d'une transformation technologique sans précédent, dépassant de loin les anticipations des pionniers de la machine électrique. Aujourd'hui, il est impensable de vivre ou de prospérer sans une maîtrise, ou du moins une familiarité, avec cette technologie électrique qui continue de s'imposer dans tous les aspects de notre quotidien.

Le cours de l'état de l'art en génie électrique consiste généralement à examiner les notions de base sur les techniques et les tendances dans le domaine du GE. Il vise à fournir aux étudiants une compréhension approfondie des technologies les plus récentes, des recherches en cours et des applications émergentes dans différents domaines de l'exploitation de l'énergie et sa production. En plus, on s'intéresse aussi aux différentes disciplines telles que l'électronique et l'automatique passant ainsi de la définition des simples composantes aux systèmes électriques de puissance et aussi la conception, l'analyse et le contrôle des systèmes dynamiques, sans oublier l'électrotechnique qui se concentre sur l'étude, la conception, le développement et la maintenance des systèmes électriques et électromagnétiques, les réseaux intelligents, les énergies renouvelables, et bien plus encore.

1.1 Définition de l'électrotechnique : C'est la branche de l'ingénierie électrique qui se concentre sur l'étude, la conception, le développement et l'utilisation des systèmes électriques et électroniques. Plus clairement, c'est le domaine qui s'intéresse aux applications techniques de l'électricité. Dans la pratique, l'électrotechnique englobe les différents processus de production, transport et production de l'énergie électrique. Elle est impliquée aussi dans la réalisation des dispositifs de conversion de l'énergie, machines électriques ainsi que le développement des réseaux électriques.

1.2 Processus de production de l'électricité :

Afin de répondre aux besoins des différents secteurs d'un pays, la production de l'énergie consiste l'une des principales préoccupations, elle est basée sur la transformation d'une forme d'énergie dite primaire (on peut citer : l'énergie cinétique, l'énergie thermique, nucléaire, solaire, éolienne, géothermique, etc...). La production du courant électrique est réalisée souvent à travers le passage d'un mouvement mécanique vers le mouvement des électrons (création de l'électricité).

On peut distinguer plusieurs types de centrales de production d'énergie en fonction de la conversion de l'énergie qu'elle constitue ou elle représente. D'une manière générale, une centrale prend l'appellation de l'énergie source en suivant certaines chaînes énergétiques comme le montre l'exemple suivant d'une centrale thermique ou l'exemple qui le suit et qui correspond à une centrale hydraulique.

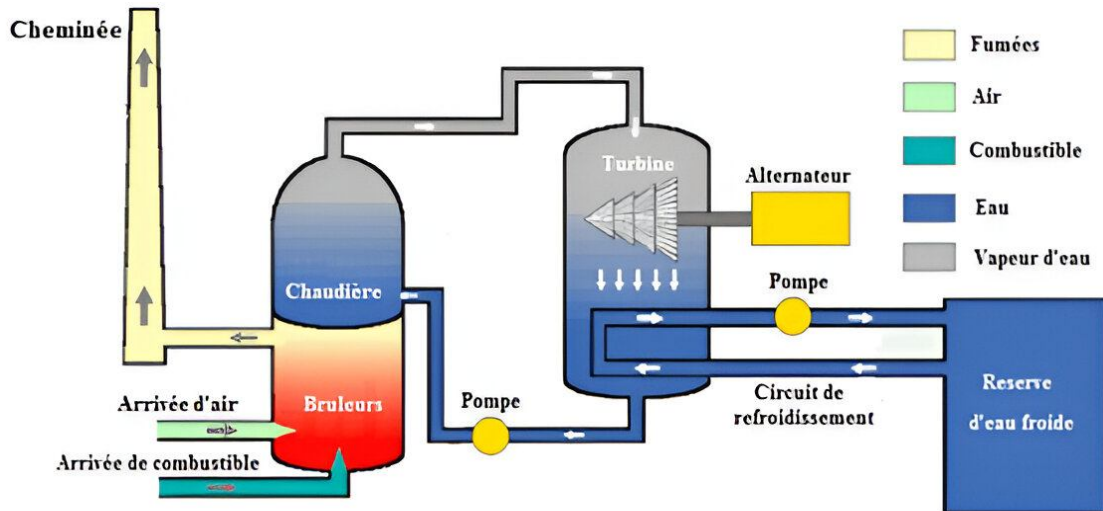


Figure 1.1 : Centrale de production de l'électricité de type thermique

Le schéma ci-dessus représente une **Turbine qui est en mouvement, elle entraine avec elle un alternateur** à travers un **Bobinage (champ magnétique : Aimant mobile ou Bobine fixe)**.

La figure suivante illustre le principe de fonctionnement d'une centrale électrique de type hydraulique :

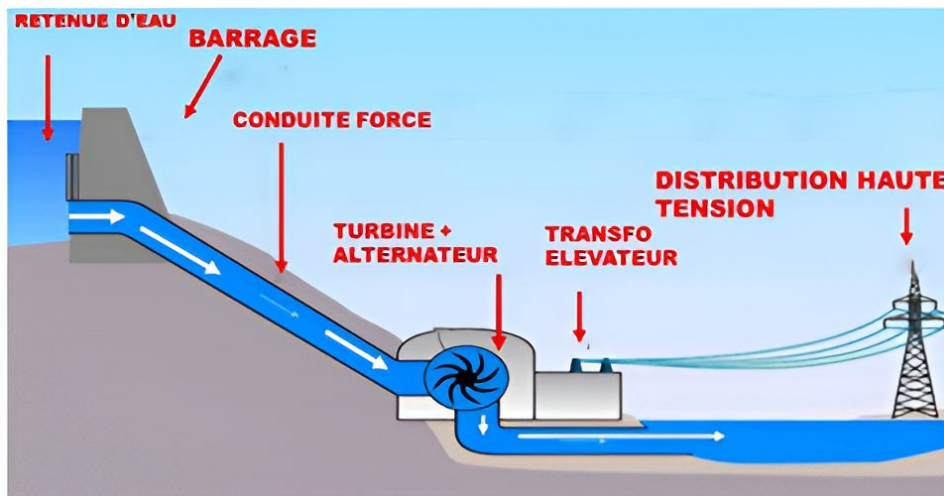


Figure 1.2 : Schéma d'une centrale de production de l'électricité de type hydraulique

La retenue d'eau est constituée notre **réservoir d'énergie**, ce dernier alimente la **Turbine** qui entraine de sa part un **Alternateur, assurant ainsi la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique (la distribution est de haute tension)**.

On peut également décrire les centrales qui exploitent des sources d'énergies renouvelables, telles que les centrales photovoltaïques ou éoliennes. Dans le cas des centrales photovoltaïques, **l'énergie solaire** est convertie en électricité par des panneaux solaires, tandis que les centrales éoliennes utilisent la **force du vent** pour faire tourner des **éoliennes** et générer de l'électricité. Ces technologies offrent une alternative propre et durable aux sources d'énergie traditionnelles.

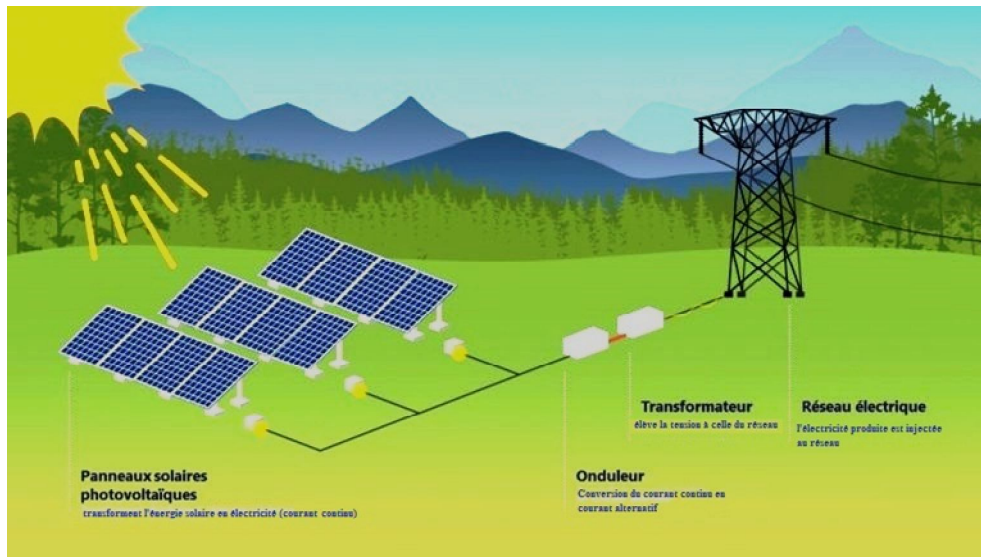


Figure 1.3 : Exemple d'une centrale de production photovoltaïque

1.3 Types de centrales électriques :

1.3.1 Centrales thermiques :

Elles utilisent une énergie primaire fossile (telles que le charbon, gaz et pétrole qui sont employés comme combustible), elles sont dites aussi **classiques** ou même **à flamme**. Le principe de fonctionnement des centrales électriques est décrit dans la figure ci-dessus (Figure 1.1). Pratiquement, **La Chaleur produite dans la chaudière grâce à la combustion du charbon, gaz ou autre combustible fait bouillir de l'eau qui passera ensuite par une étape de Vaporisation (Transport à hautes pression et température, cette condensation Fait tourner les pales de la turbine (Conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique), ainsi et par le biais d'un alternateur, on restitue l'énergie électrique.**

Remarque : Le long de cette chaîne de conversion, la vapeur est transformée en eau parallèlement (phénomène de condensation ou liquéfaction), ce qui permet un recyclage partiel de cette vapeur. Les centrales électriques thermiques représentent les particularités suivantes :

- Une production de l'énergie électrique avoisinant la moitié (50%) de la production mondiale.
- Un rendement qui varie entre 40 et 50% (vue les pertes en chaleur, vapeur et pression).

En outre, ces centrales thermiques produisent de l'énergie mais avec un effet néfaste sur l'environnement, elles sont à l'origine de la pollution, qui à travers l'émission du dioxyde de carbone (CO_2), d'oxyde d'azote (NO , NO_2) et de soufre, causent les pluies acides et augmente la présence des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. L'émission de trop de ces gaz accroît la température de la planète et provoque les catastrophes naturelles telles que les inondations et les ouragans.

1.3.2 Centrales nucléaires :

Elles sont considérées comme une centrale thermique, la différence subsiste dans le mode de production de la chaleur qui fait vaporiser l'eau.

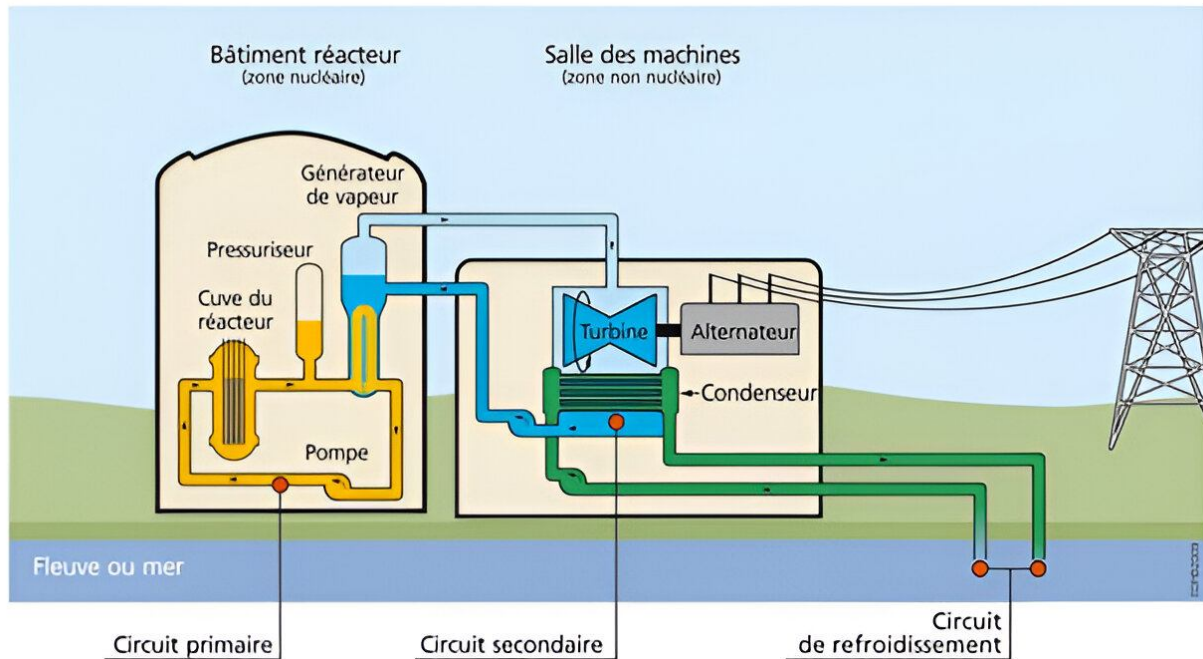


Figure 1.4 : Exemple d'une centrale de production de l'électricité de type nucléaire

a. Principe de fonctionnement : Le réacteur de la centrale est composé de barres d'uranium (on peut trouver aussi à la place de l'uranium du plutonium). Ces barres sont bombardées à travers des neutrons, et comme effet immédiat, les atomes d'uranium se cassent. On appelle cette action: **La fission** qui prend sa définition de la projection d'un neutron sur un atome lourd instable car rajouter des neutrons déstabilise l'atome (à ce titre, le premier producteur de l'uranium est le Kazakhstan, suivi du Canada, Australie et la Namibie,...). Lors de la fission, la radioactivité générée produit une chaleur énorme. Cette chaleur est maintenue dans un circuit fermé et elle fait chauffer de l'eau, qui sera par la suite vaporisée et reconduit dans une canalisation à haute pression, faisant ainsi tourner l'alternateur qui permet à son tour de produire l'électricité.

b. Avantages et inconvénients : - Actuellement les centrales nucléaires garantissent à peu près 10% de la production mondiale en électricité.

- Ces centrales présentent des risques d'installations et demandent forcément une grande capacité en énergie pour refroidir le cœur du réacteur (ne cesse pas de produire même en état d'arrêt).

Le coté sombre de l'utilisation de ces centrales nucléaires réside dans le fait qu'elles dégagent un niveau important et incontrôlable de la radioactivité, qui malgré ça elle diminue mais légèrement avec le temps.

1.3.3 Centrales hydrauliques :

Appelés aussi hydroélectriques, Elles sont situées à la tête des centrales dites en énergies renouvelables, ces dernières qui nous parviennent de sources naturelles inépuisables, durables et respectueuses de l'environnement. Ces centrales sont basées sur la force de l'eau en mouvement, couramment, les cours d'eau, les rivières, les lacs, les barrages ou les chutes d'eau.

Le fonctionnement d'une centrale hydroélectrique commence avec **la rétention ou la captation de l'eau** par le biais de barrages, permettant d'accumuler de grandes quantités d'eau. Ensuite, cette eau retenue est dirigée vers des conduites forcées où son énergie potentielle est convertie en énergie cinétique grâce aux chutes. **Les vannes installées contrôlent le flux d'eau**, tandis que les tuyaux et canalisations longs et étroits garantissent un écoulement sous pression. **L'électricité est ainsi produite** par l'écoulement de l'eau, faisant tourner une turbine qui entraîne un alternateur. **La tension électrique est ensuite adaptée au niveau d'un transformateur**, augmentant sa valeur pour faciliter son transport à travers les lignes à haute tension.

Remarques : Selon les statistiques, les centrales hydrauliques représentent une production de l'électricité d'environ les 20% de la production globale de l'électricité dans le monde. Elles sont classées dans le deuxième rang à l'échelle planétaire (soit plus de la moitié que produisent les sources d'énergies renouvelables).

Deux facteurs sont essentiels pour augmenter le rendement d'une centrale hydroélectrique :

1. Hauteur de la chute
2. Débit d'eau de la chute

Principaux producteurs d'hydroélectricité dans le monde en 2021 :

Chine (31.5 %), Canada (8.9 %), Brésil (8.0 %), U.S.A (6.1 %)

Principaux producteurs d'hydroélectricité dans le monde en 2021 :

Norvège atteint (93.4 %), Brésil (63.5 %), Canada (58.8 %)

1.3.3.1 Puissance d'une chute d'eau :

L'énergie potentielle est définie comme suit :

$$E_p = M \cdot g \cdot h$$

Avec :

E_p : énergie potentielle en Joules,

M : masse de l'eau en Kg,

g : accélération de la pesanteur ($g = 9,81$),

h : hauteur de la chute d'eau en m,

D'autres part, la puissance est exprimée comme étant la variation de l'énergie potentielle de la chute

de l'eau par rapport au temps (t), alors : $P = \frac{E_p}{t}$

Ainsi, il est possible de déterminer la puissance générée par une chute d'eau en utilisant sa hauteur et son débit.

$$P = \frac{M \cdot g \cdot h}{t} \text{ et } \rho = \frac{M}{V}, \text{ ce qui donne } P = \frac{\rho \cdot V \cdot g \cdot h}{t}$$

En effet, le débit (Q) peut être défini comme la quantité d'eau traversant une section par unité de temps. Lorsqu'on associe cette relation à la formule de puissance hydraulique, on obtient ainsi la formule fondamentale qui permet de calculer la puissance générée par une chute d'eau en watts (W) :

$$P = \rho \cdot g \cdot h \cdot Q$$

Il est nécessaire pour optimiser la puissance, de faire accroître le produit du débit (Q) par la hauteur de chute (h). Toutefois, il est peu fréquent d'avoir simultanément un débit élevé et une grande hauteur de chute, ce qui restreint souvent cette potentialité.

1.3.3.2 Classification des turbines hydrauliques :

Il existe plusieurs types de turbines hydrauliques, chacune est conçue pour fonctionner efficacement dans différentes conditions de débit et de hauteur de chute. Voici les principaux types de turbines hydrauliques :

1. Turbine Pelton : convient aux chutes d'eau élevées et à faible débit. Elle a des pales en forme de cuillère qui captent l'énergie cinétique de l'eau tombant à grande vitesse.

2. Turbine Francis : appropriée pour les chutes d'eau de moyenne à haute hauteur et pour une large plage de débits. Elle a des pales courbées pour permettre à l'eau de circuler autour d'elles tout en maintenant une pression constante.

3. Turbine Kaplan : adaptée aux faibles hauteurs de chute et aux débits élevés. Elle a des pales réglables pour optimiser le rendement en fonction des variations du débit.

1.3.3.3 Différents types de centrales hydrauliques :

En se basant sur la puissance produite et la situation géographique du barrage, on peut distinguer plusieurs types de centrales hydrauliques,

a. Grande centrale hydraulique : Ces installations génèrent une quantité importante d'électricité, typiquement de l'ordre de plusieurs centaines de mégawatts, en exploitant un barrage et un réservoir de grande taille pour contrôler le flux d'eau.

b. Centrale hydraulique moyenne : La production se situe à un niveau intermédiaire, en moyenne, variant de quelques dizaines à quelques centaines de mégawatts. Ces installations sont fréquemment construites le long de rivières de taille moyenne.

c. Microcentrale hydraulique : Ces centrales sont de petite taille et produisent généralement moins de quelques mégawatts d'électricité. Elles sont souvent utilisées pour fournir de l'énergie aux collectivités locales ou à des installations industrielles.

1.3.4 Centrales de production à base d'énergies renouvelables :

1.3.4.1 Centrale photovoltaïque :

Une centrale photovoltaïque est une installation qui fonctionne grâce au principe de la transformation de la lumière du soleil en électricité. Elle est constituée de panneaux solaires qui captent la lumière solaire et la convertissent en courant électrique. Ce courant est ensuite converti en électricité utilisable par les onduleurs. Les centrales photovoltaïques conservent l'environnement, produisant de l'énergie propre sans émissions nocives. L'utilisation de ces centrales varie de la simple alimentation des foyers et des entreprises au soutien des réseaux électriques plus larges.

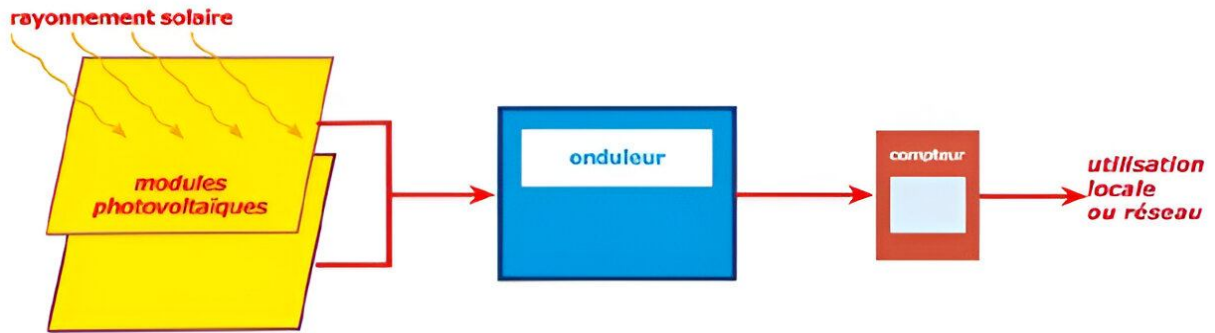


Figure 1.5 : Chaîne de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque

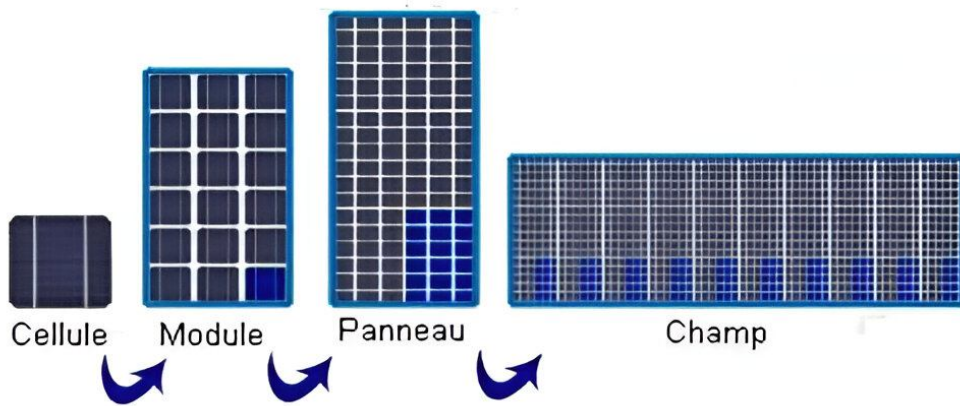


Figure 1.6 : Classement des éléments photovoltaïques

1.3.4.2 Centrale éolienne :

Une centrale éolienne est une installation qui utilise la force du vent pour générer de l'électricité. Elle se compose de grandes éoliennes, également appelées turbines éoliennes, qui sont équipées de pales qui tournent lorsque le vent souffle. A ce moment, elles activent un générateur qui produit de l'électricité. Les centrales éoliennes exploitent une source d'énergie renouvelable qui respecte l'environnement, se distinguant ainsi des centrales thermiques qui engendrent des émissions excessives de gaz à effet de serre. Tout comme les centrales photovoltaïques, les centrales éoliennes alimentent les foyers, les entreprises et les réseaux électriques étendus, jouant un rôle crucial dans la transition vers des sources d'énergie plus durables, elles comportent les éléments suivants :

Mât : La partie verticale en acier qui soutient l'éolienne, la plaçant en hauteur pour capturer le vent.

Moyeu : Élément central de rotation où les pales sont fixées, permettant de transmettre leur mouvement au système de transmission.

Pales : Les pales sont les grandes structures aérodynamiques attachées au moyeu. Elles récupèrent l'énergie cinétique du vent et la transforment en mouvement rotatif.

Nacelle : La nacelle est le boîtier situé en haut du mât. Elle contient les composants principaux de l'éolienne, y compris le générateur et le système de transmission.

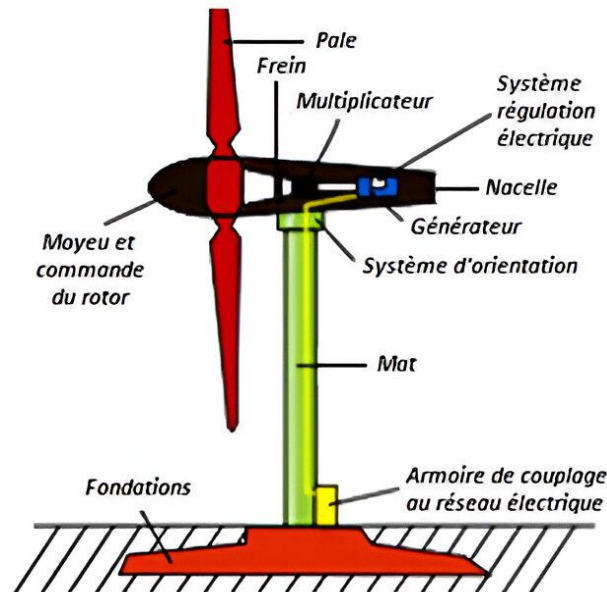


Figure 1.7 : Éléments constituant une éolienne

En plus de ces éléments, trois systèmes clés sont intégrés : un système de transmission (contenant des engrenages pour contrôler la vitesse), un système de contrôle (comportant des capteurs pour ajuster les pales en fonction du vent) et un système de freinage (pour ralentir ou stopper les pales en cas de vents forts ou pour la maintenance).

1.3.5 Réseaux électriques :

Le réseau électrique, connu également sous le nom de réseau d'électricité, se présente comme un système complexe composé d'un ensemble d'infrastructures. Son rôle fondamental est de fournir l'énergie électrique, depuis les centres de production, en passant par les parties de distribution et de transmission, jusqu'aux utilisateurs finaux.

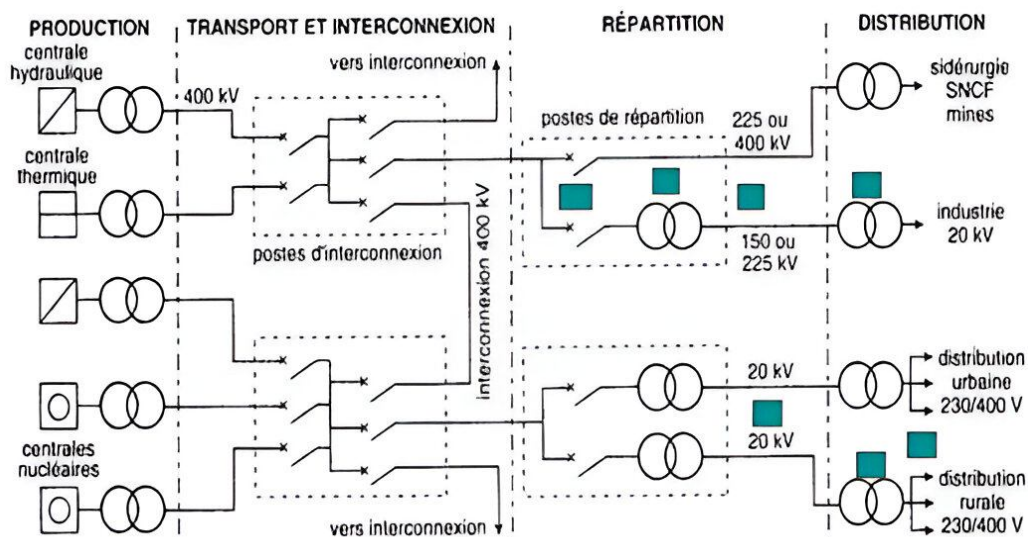


Figure 1.8 : Vue d'ensemble d'un réseau électrique avec plusieurs sources d'énergies

Remarques : Cet ensemble repose sur des éléments clés tels que les lignes électriques à différents niveaux de tension, interconnectées via les postes électriques, le passage entre les divers niveaux de tension est assuré grâce aux transformateurs. Tout ceci est régi par un système de gestion de

l'ensemble production-transport-consommation qui permet d'assurer le bon fonctionnement et la stabilité de l'ensemble du système intégré au sein du réseau électrique.

1.3.5.1 Différents types de réseaux électriques :

Selon le rôle de chaque type, on peut distinguer les trois types de réseaux suivants:

a. Réseaux d'interconnexion et de transport :

Les réseaux de transport et d'interconnexion à très haute tension permettent l'acheminement de l'énergie vers les zones de consommation éloignées. Cette énergie provient principalement des centres de production, en assurant toutefois, les échanges avec les réseaux voisins pour maintenir un équilibre constant entre l'offre disponible et la demande potentielle. Cela garantit la stabilité des paramètres de fréquence et de tension, assurant ainsi un approvisionnement électrique fiable et continu.

b. Réseaux de répartition :

Ces réseaux intègrent des lignes de transport et des postes de transformation qui agissent comme des passerelles entre les réseaux de transport et de distribution. Ils opèrent à des tensions élevées et assurent la distribution régionale de l'énergie électrique (Par exemple, les zones de forte concentration industrielle ainsi que les grandes agglomérations). Ils peuvent être aériens ou souterrains, jouant un rôle clé dans la répartition efficace de l'électricité.

c. Réseaux de distribution :

L'électricité est distribuée via des lignes de moyenne tension (MT), alimentées par des postes à haute tension HT/MT. Ces postes fournissent de l'énergie soit directement aux gros consommateurs, soit aux postes de moyenne tension MT/ BT. En fin de chaîne, les lignes de basse tension (BT) alimentent les utilisateurs, qu'ils soient en monophasé ou en triphasé.

1.3.5.2 Principaux éléments constituant un réseau électrique :

Dans la suite, nous allons étudier de près les éléments clés qui constituent un réseau électrique, depuis la production jusqu'à la distribution de l'énergie aux utilisateurs.

a. Postes électrique :

Un poste électrique est une installation de composants de liaison et/ou de manœuvre où l'électricité change de niveau de tension pour être acheminée de manière efficace à travers le réseau électrique. Il existe trois catégories de postes électriques, à savoir :

- **Les postes de transformation** : les postes de transformation permettent de convertir un niveau de tension d'entrée en un niveau de tension de sortie, qui peut être soit plus élevé (*transformateurs élévateurs*) soit plus bas (*transformateurs abaisseurs*).
- **Les postes mixtes** : les postes mixtes, les plus fréquents, qui assurent une fonction dans le réseau d'interconnexion et qui comportent en outre un ou plusieurs étages de transformation.
- **Les postes d'interconnexion** : Ces installations incluent plusieurs points communs triphasés, appelés jeux de barres, sur lesquels divers départs (comme des lignes ou des transformateurs) de même tension peuvent être connectés.
- **Les postes de distribution** : Ils ont pour objectif de réduire le niveau de tension afin de fournir l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels.

Pour garantir la sécurité, la fiabilité et le bon fonctionnement des systèmes électriques, il est essentiel d'utiliser certains composants clés dans les **systèmes de protection et de contrôle**. On peut citer :

b. Les jeux de barres : appelés aussi barres omnibus, sont des composants essentiels dans les installations électriques. Ils servent de points de connexion communs pour distribuer l'énergie électrique au sein d'un poste de transformation ou d'une sous-station (permettent de relier et de distribuer l'électricité entre différents équipements comme les lignes électriques, les transformateurs, et les disjoncteurs).



Figure 1.9 : Jeux de barres d'un poste 380KV

c. Le disjoncteur est un dispositif de protection électrique utilisé dans les installations électriques pour éviter les surcharges, les courts-circuits ou même les surintensités. Ce dispositif possède le pouvoir de coupure (c'est-à-dire il travaille en charge). Plusieurs types de disjoncteurs se présentent et permettent l'atténuation des arcs électriques, à savoir: Disjoncteur à l'huile, disjoncteur à air, disjoncteur à vide, disjoncteur à gaz d'hexafluorure de soufre (SF6).



Figure 1.10 : Disjoncteur haute tension

d. Le sectionneur : c'est un dispositif qui permet une isolation manuelle ou motorisée d'une installation électrique ou une partie d'un réseau électrique afin de garantir des travaux de maintenance ou de réparation en toute sécurité. Pas de protection contre les défauts électriques (ne possèdent aucun pouvoir de coupure).



Figure 1.11 : Photo d'un sectionneur haute tension

e. Transformateurs : On peut les classer en deux grandes catégories :

- ✓ **Transformateur de puissance :** Ils se divisent en deux types à savoir, les transformateurs **élevateurs**, qui augmentent la tension pour diminuer les pertes d'énergie lors de la transmission sur de longues distances, et les **abaisseurs**, qui réduisent la tension pour rendre l'énergie électrique appropriée et sûre pour les équipements résidentiels et industriels.
- ✓ **Transformateur de mesure :** Ils peuvent être de mesure **de courant** (tout en fournissant une isolation galvanique, utilisés dans les systèmes de protection et de comptage) ou bien de mesure **de tension** (offrent également une isolation galvanique, essentiels pour les mesures de tension et les systèmes de protection).

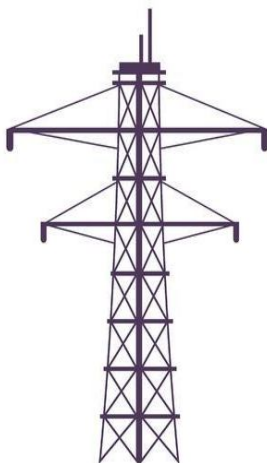


Figure 1.12 : Transformateur de puissance

f. Les pylônes :

Les pylônes électriques sont des structures métalliques conçues pour soutenir les lignes aériennes. Ils résistent aux conditions météorologiques, aux risques sismiques et à la foudre, assurant ainsi la transmission et la distribution de l'électricité entre les centrales et les réseaux de distribution.

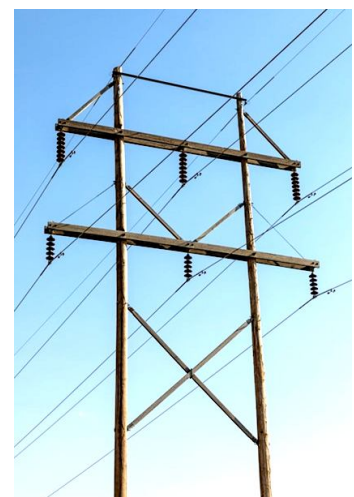
Ci-après, on donne des exemples de certaines formes de pylônes, les plus répandues :



Pylône en Treillis



Pylône Tubulaire



Pylône en H

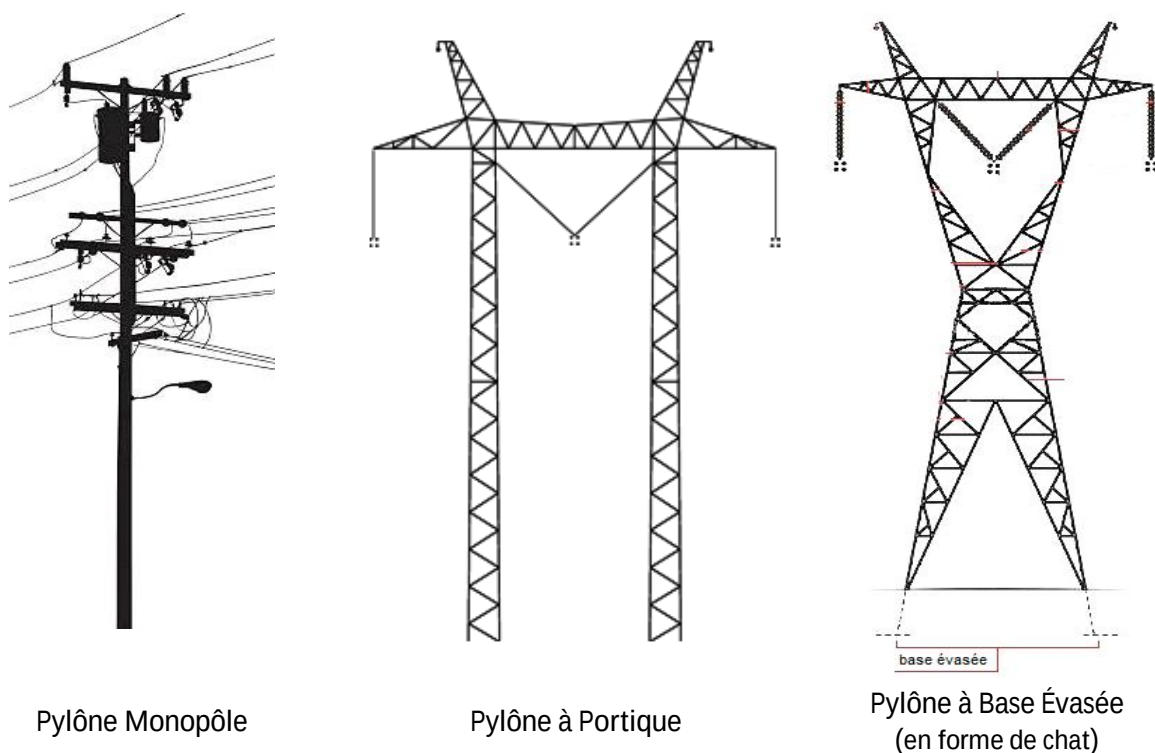


Figure 1.13 : Formes courantes de pylônes

■ **Placement de deux pylônes :**

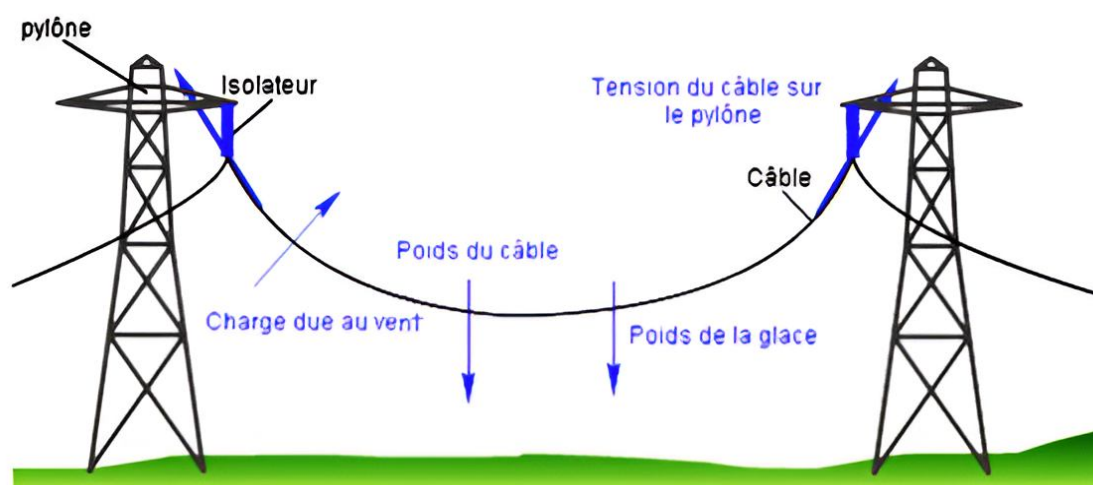


Figure 1.14 : Efforts mécaniques appliqués et influence de la température sur le câble

1.3.6 Les niveaux de tension :

Suivant la norme NFC 18-510		Courant alternatif	Courant continu
Haute tension (HT)	HTA	$1\,000\text{V} < U_n \leq 50\,000\text{V}$	$1\,500\text{V} < U_n \leq 75\,000\text{V}$
	HTB	$U_n > 50\,000\text{V}$	$U_n > 75\,000\text{V}$
Basse tension	BT	$50\text{V} < U_n \leq 1\,000\text{V}$	$120\text{V} < U_n \leq 1\,500\text{V}$
Très basse tension	TBT	$U_n \leq 50\text{V}$	$U_n \leq 120\text{V}$

La norme **NFC 18-510** définit les classifications des ouvrages et installations électriques en fonction des niveaux de tension, elle est utilisée principalement pour garantir la sécurité, la fiabilité et l'efficacité des systèmes électriques.

1.3.7 Distribution & dispatching :

La distribution électrique est le processus de livraison de l'électricité des postes de transformation aux utilisateurs finaux, comme les foyers, les entreprises et les industries. C'est la dernière étape de la chaîne d'approvisionnement après la transmission. Le réseau de distribution, semblable à une toile couvrant le territoire, utilise les infrastructures routières comme repères : les lignes THT (400 000 volts) pour les autoroutes, les lignes HT (63 000 ou 90 000 volts) pour les routes nationales, les lignes MT (20 000 volts) entre départements, et les lignes à basse tension (220 volts) pour les zones urbaines. En raison de la difficulté de stocker l'électricité, un système de dispatching est utilisé pour optimiser la gestion de l'énergie, en contrôlant en permanence la production et la demande à travers la surveillance du réseau en ajustant l'offre selon les besoins réels et dictés par des programmes de prédictions temporelles de l'énergie.

1.3.8 Résistance & résistivité :

La résistance électrique mesure l'opposition au passage du courant dans un composant ou conducteur, et est calculée comme le quotient de la tension appliquée par l'intensité du courant. La résistivité, quant à elle, est une propriété intrinsèque du matériau qui détermine cette opposition en fonction de la température, dépendant de la longueur du conducteur et inversement de sa section transversale, on peut écrire :

$$R = U/I \text{ en ohm } (\Omega) \quad \text{et} \quad R = \rho \cdot L/S ; \quad \rho \text{ est mesurée en ohm} \times \text{mètre } (\Omega.m)$$

1.3.9 Matériaux électriques :

Les matériaux électriques jouent un rôle crucial dans la transmission, la distribution et le stockage de l'énergie électrique, ils se classifient principalement en trois catégories :

1.3.9.1 Les conducteurs :

Ces matériaux permettent le passage facile du courant électrique. Ils possèdent une très faible résistivité ($\rho < 10^{-5} \Omega \cdot cm$). Les métaux comme le cuivre et l'aluminium sont des conducteurs courants en raison de leur faible résistance et de leur bonne conductivité. Le cuivre est souvent utilisé dans les fils électriques, tandis que l'aluminium est utilisé dans les lignes de haute tension.

1.3.9.2 Les isolants (diélectriques) :

Les isolants empêchent le passage du courant électrique grâce à leur haute résistivité ($\rho > 10^8 \Omega.cm$). Utilisés pour protéger les conducteurs et prévenir les courts-circuits, ils incluent des matériaux comme le plastique, le caoutchouc, la céramique et le verre. Par exemple, le plastique sert souvent de gaine autour des fils pour assurer une protection et une sécurité accrues.

1.3.9.3 Les semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs ont une conductivité intermédiaire variable à cause des impuretés ou des conditions spécifiques (comme la température). Ils sont indispensables pour la conception des composants électroniques tels que les transistors et les diodes. Le silicium et le germanium sont les exemples les plus courants, largement utilisés dans les circuits intégrés et les dispositifs de commutation.

La résistivité d'un semi-conducteur varie entre : $10^{-3} \Omega.cm < \rho < 10^4 \Omega.cm$

1.3.10 Généralités sur l'électronique de puissance :

L'électronique de puissance vise à optimiser l'utilisation de l'énergie électrique en modifiant sa forme pour l'amélioration de l'efficacité énergétique, le contrôle des moteurs et la gestion des systèmes de distribution d'énergie. Les systèmes d'électronique de puissance couvrent une large gamme de puissances, allant de quelques watts (variateur de vitesse pour les petits moteurs) à plusieurs gigawatts (lors de l'interconnexion à courant continu des réseaux électriques pour des très hautes tensions).

1.3.11 Les convertisseurs statiques :

1.3.11.1 Définition :

Un convertisseur statique est un dispositif électronique conçu pour transformer un type de signal ou d'énergie en un autre, facilitant ainsi l'adaptation de la source d'énergie électrique au récepteur donné.

1.3.11.2 Types de convertisseurs statiques :

- a. Hacheur : Continu-continu (avec rapport cyclique α réglable)** : Ce sont des convertisseurs continu-continu qui ajustent une tension continue pour l'adapter à une charge spécifique, comme la variation de la vitesse d'un moteur à courant continu ou le réglage de la luminosité d'une lampe.
- b. Onduleur: Continu-alternatif (valeur moyenne = 0)** : L'onduleur est un convertisseur de courant continu (DC) en courant alternatif (AC), utilisé pour alimenter des charges en AC à partir d'une source DC, comme des batteries. Il est employé par exemple pour injecter l'énergie des panneaux photovoltaïques dans le réseau.
- c. Redresseur: Alternatif-continu (valeur moyenne réglable)** : Il s'agit d'un type de convertisseur qui joue un rôle clé dans la régulation et le contrôle de la tension de sortie. Il est principalement utilisé pour alimenter des appareils en courant continu ou pour recharger des batteries, comme dans les chargeurs de PC et de téléphones portables.
- d. Gradateur: Alternatif-alternatif (avec rapport cyclique α réglable)** : C'est un convertisseur alternatif-alternatif qui ajuste de manière continue la valeur efficace de la tension de sortie, tout en conservant la même fréquence que la tension d'entrée. Il est principalement utilisé pour varier la vitesse des moteurs alternatifs, tels que les moteurs asynchrones ou synchrones, en modifiant leur tension d'alimentation.

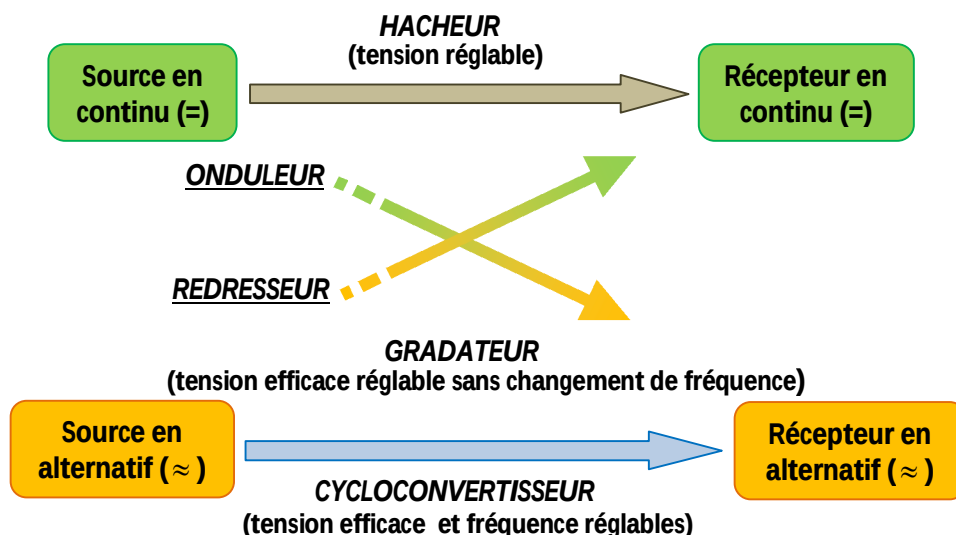


Figure 1.15 : Schéma représentant les différents types de convertisseurs statiques

CHAPITRE 2: *Electronique*

Introduction :

L'électronique est une branche de la science et de l'ingénierie qui traite le contrôle et la manipulation des électrons pour créer des dispositifs et des systèmes qui jouent un rôle essentiel dans notre vie quotidienne. Des téléphones portables aux ordinateurs en passant par les systèmes de communication avancés, l'électronique est omniprésente et continue de façonner notre monde moderne. Dans ce chapitre, nous explorerons les concepts fondamentaux de l'électronique, les composants clés et leurs applications.

2.1 Notions de base**2.1.1 Électrons et charges**

L'électron, une particule subatomique portant une charge négative, est au cœur de la technologie électronique. Comprendre le comportement des électrons dans les matériaux est essentiel pour concevoir des dispositifs électroniques fonctionnels.

2.1.2 Courant électrique

Le courant électrique est le mouvement ordonné d'électrons à travers un matériau conducteur. Il est mesuré en ampères (A) et joue un rôle crucial dans le fonctionnement de tous les dispositifs électroniques. Pratiquement, ce courant est contrôlé, dirigé ou modifié par les composants électroniques présents dans un circuit.

2.2 Composants électroniques :**2.2.1 Résistances :****a. Définition des résistances :**

Une résistance électrique est un composant électronique passif conçu pour limiter le flux de courant électrique dans un circuit. Elle est caractérisée par sa capacité à s'opposer au passage du courant électrique en dissipant une partie de l'énergie électrique sous forme de chaleur. Les résistances sont généralement fabriquées à partir de matériaux résistifs spécifiques qui présentent une résistance électrique déterminée. L'unité de mesure de la résistance électrique est l'Ohm (symbole : Ω), en l'honneur du physicien allemand Georg Simon Ohm, qui a établi la loi fondamentale régissant le comportement des résistances dans un circuit. Les résistances sont utilisées dans une variété d'applications électroniques, allant des circuits simples aux systèmes plus complexes. Elles servent à contrôler le courant électrique, à diviser la tension, à ajuster les niveaux de signal et à réaliser des opérations spécifiques qui nécessitent une résistance précise.

Dans les schémas électriques, les résistances sont généralement représentées par un symbole graphique, qui est un rectangle vertical avec des connexions à ses extrémités.

Ce symbole permet de visualiser leur emplacement et leur rôle dans le circuit.

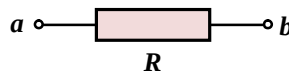


Figure 2.1 : Représentation d'une résistance sous forme de rectangle

b. Caractéristiques fondamentales des résistances :

• Valeur nominale d'une résistance (Ohms) :

La valeur nominale d'une résistance électrique, exprimée en Ohms (Ω), indique la quantité de résistance qu'elle offre au passage du courant électrique. Cette valeur est généralement marquée sur la résistance elle-même à l'aide de codes de couleurs ou de chiffres. Par exemple, une résistance avec une valeur nominale de 100Ω limite le courant de manière à ce que la tension à ses bornes soit de 100 volts pour un courant de 1 ampère, selon la loi d'Ohm.

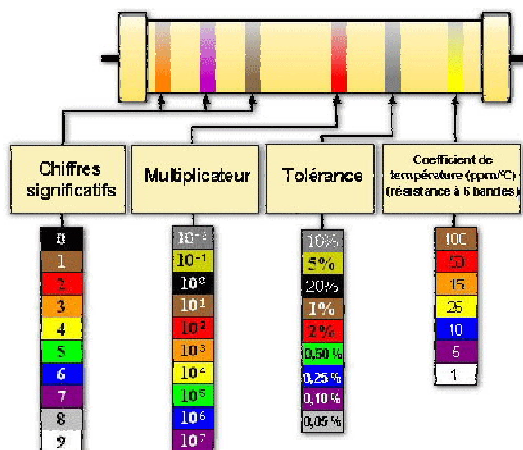


Figure 2.2 : Code couleur des résistances

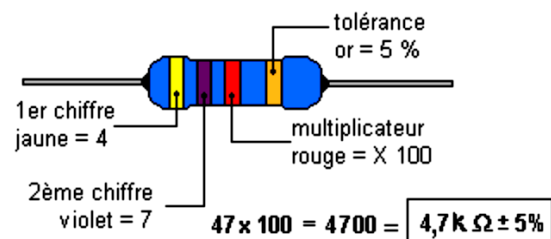


Figure 2.3 : Code couleur d'une résistance de **4,7 k Ω**

• Tolérance et précision :

La tolérance d'une résistance est la marge d'erreur acceptable par rapport à sa valeur nominale. Elle est généralement exprimée en pourcentage. Par exemple, une résistance de 100Ω avec une tolérance de $\pm 5 \%$ peut avoir une valeur réelle comprise entre 95Ω et 105Ω . Une tolérance plus faible indique une plus grande précision. La tolérance est importante car elle a un impact sur les performances globales d'un circuit électrique. Des applications nécessitant une grande précision, comme les équipements de mesure, exigent des résistances avec une faible tolérance.

• Puissance nominale :

La puissance nominale (ou capacité de dissipation) d'une résistance indique la quantité d'énergie thermique qu'elle peut dissiper en toute sécurité sans subir de dommages. Elle est mesurée en watts (W). Les résistances sont fabriquées pour différentes puissances nominales, allant de quelques fractions de watt à plusieurs watts. Lorsque le courant traverse une résistance, une partie de l'énergie électrique est convertie en chaleur. Si cette chaleur n'est pas dissipée efficacement, elle peut

provoquer une surchauffe et endommager la résistance ainsi que les composants environnants. Il est donc important de choisir une résistance dont la puissance nominale est adaptée à l'application.

c. Loi d'Ohm et relations fondamentales

- **Résistance équivalente dans les circuits montés en Série/Parallèle :**

Lorsqu'on travaille avec des circuits comportant plusieurs résistances, il est souvent nécessaire de déterminer une résistance équivalente unique qui pourrait remplacer l'ensemble de ces résistances sans altérer le comportement du circuit. On trouve deux configurations courantes, à savoir : circuits en série et circuits en parallèle.

- **Circuits en série :**

Dans un circuit en série, les résistances sont connectées bout à bout, de sorte que le courant qui traverse chacune d'entre elles est le même. Pour calculer la résistance équivalente (R_e) de plusieurs résistances en série, il suffit de les additionner :

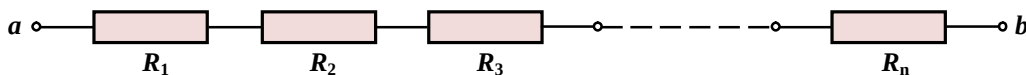


Figure 2.4 : Schéma d'un circuit de résistances connectées en série

La résistance équivalente est égale à : $R_e = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$

- **Circuits en parallèle :**

Dans un circuit en parallèle, les bornes de toutes les résistances sont connectées ensemble, créant plusieurs chemins possibles pour le courant. Pour calculer la résistance équivalente (R_e) de plusieurs résistances en parallèle, utilisez la formule inverse de la somme des inverses des résistances individuelles :

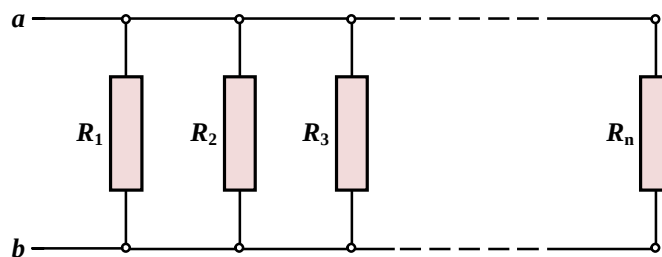


Figure 2.5 : Schéma d'un circuit de résistances connectées en parallèle

La résistance équivalente est égale à : $R_e = \frac{R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots \times R_n}{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n}$

d. Types de résistances :

- **Résistances fixes vs variables :**

Les résistances peuvent être classées en deux catégories principales : résistances fixes et résistances variables.

- **Résistances fixes** : Les résistances fixes ont une valeur de résistance constante qui ne peut pas être modifiée une fois qu'elles sont fabriquées. Elles sont utilisées dans des applications où une valeur de résistance constante est nécessaire, comme dans les diviseurs de tension, les filtres et les circuits de limitation de courant.
- **Résistances variables (potentiomètres)** : Les résistances variables, également appelées potentiomètres, permettent de modifier manuellement la valeur de la résistance dans une plage donnée. Elles sont souvent utilisées pour le réglage de niveaux de signal, le contrôle de volume, le réglage de la luminosité, etc. Un potentiomètre comprend trois bornes : deux bornes fixes et une borne mobile (curseur) qui peut être ajustée pour modifier la résistance entre les bornes fixes.

e. Différents types de résistances :

Il existe plusieurs types de résistances avec des caractéristiques spécifiques adaptées à différentes applications. Voici quelques exemples :

- **Résistances à couche de Carbone** : Ces résistances utilisent une couche de carbone pour obtenir la valeur de résistance souhaitée. Elles sont couramment utilisées dans des applications basse puissance et sont économiques, mais leur précision peut être limitée.
- **Résistances à couche métallique** : Ces résistances utilisent une fine couche de métal comme élément résistif. Elles offrent une meilleure stabilité de la valeur nominale et une plus grande précision par rapport aux résistances à couche de carbone.
- **Résistances à film métallique** : Ces résistances possèdent un film de matériau résistif (généralement du métal) appliqué sur un substrat en céramique. Elles sont largement utilisées en raison de leur précision, de leur stabilité à long terme et de leur capacité à dissiper la chaleur.
- **Thermistances (CTN et CTP)** : Les thermistances sont des résistances dont la valeur varie avec la température. Les thermistances CTN diminuent en résistance à mesure que la température augmente, tandis que les thermistances CTP augmentent en résistance avec la température. Elles sont principalement utilisées pour le contrôle de la température.
- **Résistances dépendantes de la lumière (LDR)** : Aussi appelées cellules photoconductrices, les LDR ont une résistance qui varie en fonction de l'intensité lumineuse qui les frappe. Elles sont couramment utilisées dans des applications telles que les capteurs de lumière et les systèmes d'éclairage automatique.

Chaque type de résistance a ses avantages et ses limitations, et le choix dépendra des besoins spécifiques de l'application.

f. Applications des résistances :

- **Diviseurs de tension et de courant :**

Les diviseurs de tension et de courant sont des circuits utilisés pour obtenir des tensions ou des courants réduits à partir d'une source d'entrée, en utilisant des résistances.

- ✓ **Diviseur de tension :** Un diviseur de tension est constitué de deux résistances en série. La tension de sortie est prise à la jonction des deux résistances. La tension de sortie est proportionnelle à la résistance du composant de sortie par rapport à la somme des résistances du diviseur. Cela permet d'obtenir une tension réduite par rapport à la tension d'entrée.

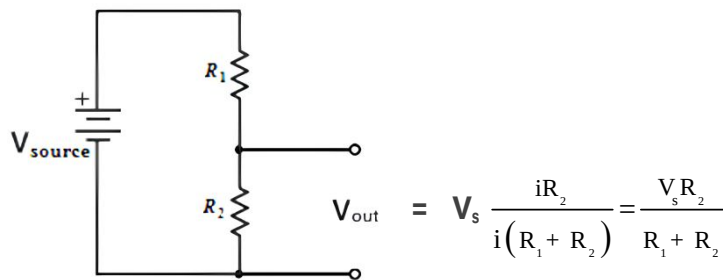


Figure 2.6 : Schéma d'un diviseur de tension

- ✓ **Diviseur de courant :** Un diviseur de courant est formé en plaçant deux résistances en parallèle. Le courant total fourni par la source d'entrée se divise entre les deux résistances. Le courant qui traverse le composant de sortie est proportionnel à la résistance du composant par rapport à la somme des résistances du diviseur. Cela permet d'obtenir un courant réduit par rapport au courant d'entrée.

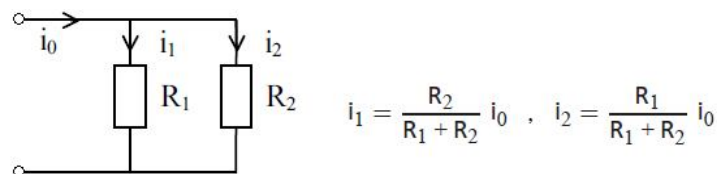


Figure 2.7 : Schéma d'un diviseur de courant

- **Filtres passe-bas et passe-haut :**

- ✓ Les filtres passe-bas et passe-haut sont des circuits qui permettent le passage de certaines fréquences tout en atténuant les autres. Les résistances sont utilisées en combinaison avec des condensateurs ou des bobines pour créer ces filtres.
- ✓ **Filtre passe-bas :** Ce filtre laisse passer les fréquences plus basses tout en atténuant les fréquences plus élevées. Il est réalisé en plaçant une résistance en série avec un condensateur. Les basses fréquences passent facilement à travers le condensateur, tandis que les hautes fréquences sont bloquées.

- ✓ **Filtre passe-haut** : Ce filtre laisse passer les fréquences plus élevées tout en atténuant les basses fréquences. Il est réalisé en plaçant une résistance en parallèle avec un condensateur. Les hautes fréquences sont capables de contourner la résistance via le condensateur, tandis que les basses fréquences rencontrent une plus grande impédance.
- ✓ **Limitation de courant et de tension** : Les résistances peuvent être utilisées pour limiter le courant et la tension dans un circuit en agissant comme des éléments de limitation. En plaçant une résistance en série avec une charge, le courant qui circule dans le circuit est limité en fonction de la valeur de la résistance.
- ✓ **Réglage de gain dans les amplificateurs** : Dans les amplificateurs, les résistances sont utilisées pour ajuster le gain du circuit. En configurant des réseaux de résistances spécifiques dans les étages d'amplification, on peut contrôler la quantité d'amplification appliquée au signal d'entrée.
- ✓ **Utilisation dans les capteurs et les transducteurs** : Les résistances sont souvent utilisées dans les capteurs pour mesurer des phénomènes physiques tels que la température, la lumière, la pression, etc. Les variations physiques entraînent des variations de résistance, qui sont ensuite converties en signaux électriques pour l'analyse et le traitement. Par exemple, les thermistances sont des capteurs de température basés sur des variations de résistance en fonction de la température ambiante.

2.2.2 Condensateurs :

a. Rôle d'un condensateur dans les circuits électroniques :

Un condensateur est un composant électronique passif largement utilisé dans les circuits électroniques pour stocker et libérer de l'énergie électrique sous forme de champ électrique. Il est constitué de deux plaques conductrices séparées par un matériau isolant appelé diélectrique. Lorsqu'une tension est appliquée aux plaques, des charges électriques s'accumulent sur les plaques, créant un champ électrique entre elles. Ce champ électrique stocke de l'énergie potentielle électrique.

b. Structure d'un condensateur :

Un condensateur se compose principalement de deux éléments clés :

- ✓ **Plaques conductrices** : Ce sont deux surfaces métalliques, généralement en aluminium ou en tantale, qui sont placées parallèlement à une certaine distance l'une de l'autre. L'une de ces plaques est chargée positivement tandis que l'autre est chargée négativement lorsque le condensateur est soumis à une tension.

✓ **Diélectrique** : C'est le matériau isolant qui sépare les plaques conductrices. Il peut être en plastique, en céramique, en mica ou dans d'autres matériaux isolants. Le diélectrique détermine la capacité du condensateur et influence sa performance.

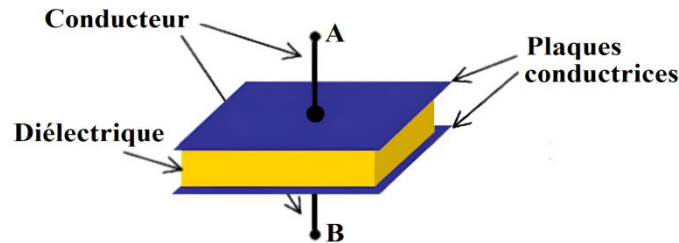


Figure 2.8 : Type de Condensateurs à plaques parallèles

c. Mesure de la capacité d'un condensateur :

La capacité d'un condensateur à stocker des charges électriques, est mesurée en unités appelées farads (F). Cependant, en électronique, les condensateurs sont généralement de petites capacités, donc les sous-multiples du farad sont plus couramment utilisés :

Microfarad (μF) : 1 μF équivaut à 10^{-6} farads.

Nanofarad (nF) : 1 nF équivaut à 10^{-9} farads.

Picofarad (pF) : 1 pF équivaut à 10^{-12} farads.

Les valeurs de capacité des condensateurs varient considérablement, allant de quelques picofarads à plusieurs milliers de microfarads. Les condensateurs de grande capacité sont principalement utilisés pour stocker de l'énergie dans les circuits d'alimentation, tandis que les condensateurs de faible capacité servent souvent au découplage, à la filtration et au réglage de temporisation dans les circuits électroniques.

d. La loi de l'accumulation de charge :

La loi de l'accumulation de charge explique comment les condensateurs stockent la charge électrique. Lorsque vous appliquez une tension à travers les plaques d'un condensateur, des charges positives s'accumulent sur une plaque et des charges négatives sur l'autre. Cette accumulation de charges crée un champ électrique entre les plaques et génère une différence de potentiel (tension) entre elles.

Relation entre la tension, la charge et la capacité d'un condensateur :

La relation fondamentale entre la tension (V), la charge (Q) et la capacité (C) d'un condensateur est donnée par la formule : $Q = C \cdot V$

Q : représente la charge en coulombs (C) stockée sur les plaques du condensateur.

C : est la capacité en farads (F), qui mesure la capacité du condensateur à stocker des charges à une certaine tension.

V : est la tension en volts (V) appliquée entre les plaques du condensateur.

Cette formule montre que la charge stockée sur un condensateur est directement proportionnelle à la capacité du condensateur et à la tension appliquée.

e. La constante de temps d'un condensateur :

La constante de temps (τ) d'un condensateur est une mesure du temps nécessaire pour que le condensateur se charge où se décharge d'environ 63,2 % de la tension totale appliquée. Elle est calculée en multipliant la résistance (R) en série avec le condensateur par la capacité (C) du condensateur :

$$\tau = R * C$$

τ : est la constante de temps en secondes (s).

R : est la résistance en ohms (Ω) connectée en série avec le condensateur.

C : est la capacité en farads (F) du condensateur.

Une plus grande constante de temps signifie que le condensateur se charge ou se décharge plus lentement. Cette constante de temps est utilisée pour déterminer la vitesse à laquelle un condensateur réagit aux changements de tension ou aux signaux électriques dans un circuit. Plus la résistance est élevée ou la capacité est grande, plus la constante de temps sera importante, ce qui peut influencer la réactivité du condensateur dans différents types de circuits.

f. Types de condensateurs :

- ✓ **Condensateurs à plaques parallèles** : utilisation plus courante à cause de la simplicité dans la conception et le fonctionnement
- ✓ **Condensateurs à électrolyte** : utilisation de solutions électrolytiques pour augmenter la capacité.
- ✓ **Condensateurs à film plastique** : utilisation de films de plastique comme diélectrique.
- ✓ **Condensateurs céramiques** : utilisés pour des applications hautes fréquence.
- ✓ **Condensateurs à tantale** : haute capacité et stabilité.

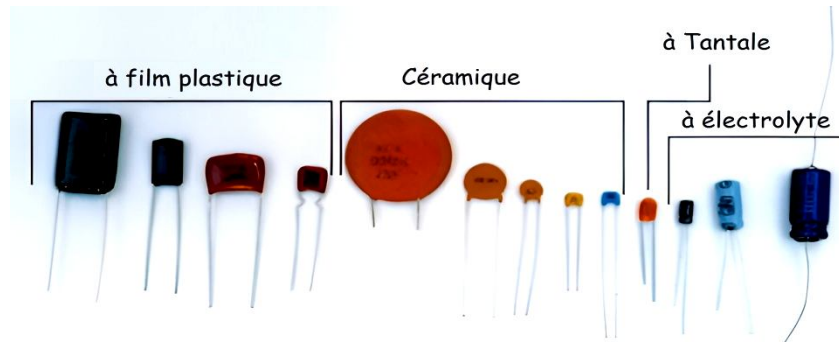


Figure 2.9 : Différents types de Condensateurs

g. Applications des condensateurs :

- **Temporisation** : utilisation des condensateurs pour créer des retards dans les circuits.
- **Filtrage** : rôle des condensateurs dans les circuits passe-haut et passe-bas.
- **Découplage** : réduction du bruit électrique à l'aide de condensateurs de découplage.
- **Stockage d'énergie** : capacités limitées, mais utilité dans certaines applications.
- **Résonance** : utilisation de condensateurs dans les circuits résonants.

h. Caractéristiques des condensateurs :

Lors de la sélection d'un condensateur pour une application spécifique, plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour garantir son bon fonctionnement et sa durabilité. Voici quelques-uns des principaux critères à considérer :

- **Capacité (valeur en farads)** : La capacité d'un condensateur détermine la quantité de charge qu'il peut stocker. Pour choisir une capacité appropriée à une application, il est important d'éviter une capacité trop faible, qui pourrait être insuffisante, ainsi qu'une capacité trop élevée, qui pourrait être coûteuse et encombrante.
- **Tension nominale (tension de service)** : On doit s'assurer que la tension nominale du condensateur est supérieure à la tension maximale à laquelle il sera soumis dans le circuit. Une tension excessive peut provoquer une défaillance du condensateur.
- **Fréquence de fonctionnement** : Certains condensateurs sont plus adaptés aux hautes fréquences que d'autres.
- **Température de fonctionnement** : Les condensateurs ont des performances différentes à différentes températures.
- **Type de diélectrique** : Les condensateurs utilisent différents types de diélectriques (matériaux isolants) qui affectent leurs performances. Par exemple, les condensateurs électrolytiques conviennent aux applications nécessitant de grandes capacités, tandis que les condensateurs en céramique sont adaptés aux hautes fréquences.

- **Tolérance** : La tolérance indique la marge d'erreur par rapport à la valeur nominale du condensateur. Par exemple, un condensateur de 10 μF avec une tolérance de $\pm 10\%$ peut avoir une capacité réelle comprise entre 9 μF et 11 μF .
- **Stabilité** : Certains condensateurs sont conçus pour avoir une stabilité de valeur à travers le temps et les variations de température. Cela est particulièrement important dans les applications nécessitant une performance stable à long terme.
- **Facteurs physiques** : La taille et la forme du condensateur peuvent être importantes en fonction des contraintes d'espace de votre circuit.

2.2.3 Diodes

Les diodes sont des dispositifs électroniques fondamentaux qui appartiennent à la famille des composants semi-conducteurs. Elles sont largement utilisées dans l'électronique pour leurs propriétés de conduction unidirectionnelle du courant électrique. Les diodes jouent un rôle essentiel dans la conversion du courant alternatif en courant continu, la protection contre les surtensions et bien d'autres applications.

a. Fonctionnement d'une diode :

Une diode est constituée de deux régions semi-conductrices, l'anode (région P-dopée) et la cathode (région N-dopée), formant une jonction PN. Elle permet le passage du courant dans une direction (polarisation directe) tout en le bloquant dans l'autre (polarisation inverse). En polarisation directe, la diode présente une faible résistance et laisse le courant circuler facilement, tandis qu'en polarisation inverse, elle bloque le courant et offre une résistance élevée.

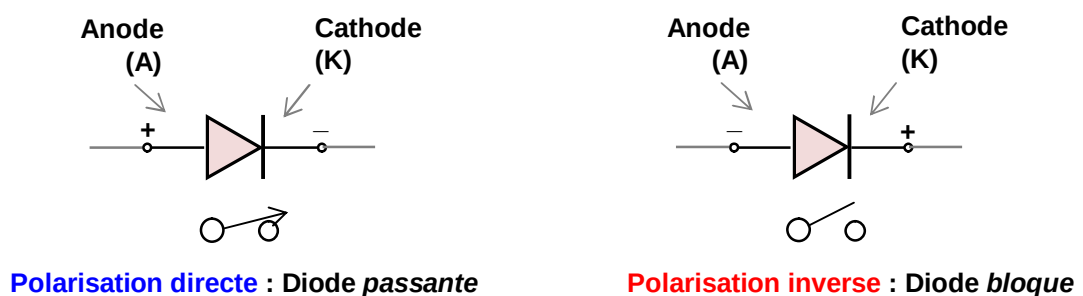


Figure 2.10 : Fonctionnement d'une diode

b. Applications des diodes :

- ✓ **Redressement** : L'une des applications les plus courantes des diodes est le redressement, où elles sont utilisées pour convertir le courant alternatif en courant continu. Les diodes permettent au courant de circuler uniquement dans une direction, supprimant ainsi l'alternance négative du courant alternatif.

- ✓ **Protection contre les surtensions** : Les diodes sont utilisées dans les circuits de protection contre les surtensions. Une diode en inverse peut empêcher les tensions excédentaires de dépasser un certain seuil, protégeant ainsi les composants sensibles.
- ✓ **Éclairage** : Les diodes électroluminescentes (LED) sont des diodes spéciales qui émettent de la lumière lorsqu'elles sont polarisées en direct. Elles sont largement utilisées dans l'éclairage, les écrans et les indicateurs lumineux.
- ✓ **Détecteurs** : Les diodes peuvent être utilisées comme détecteurs de signaux. Par exemple, dans les radios à diode, la diode est utilisée pour extraire les signaux audio à partir d'une modulation d'amplitude (AM).
- ✓ **Circuits de protection** : Les diodes Zener sont des types spéciaux de diodes conçues pour fonctionner en inverse dans la région de la tension Zener, ce qui les rend utiles pour réguler la tension dans les circuits.

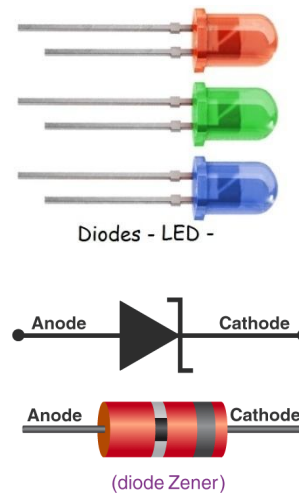
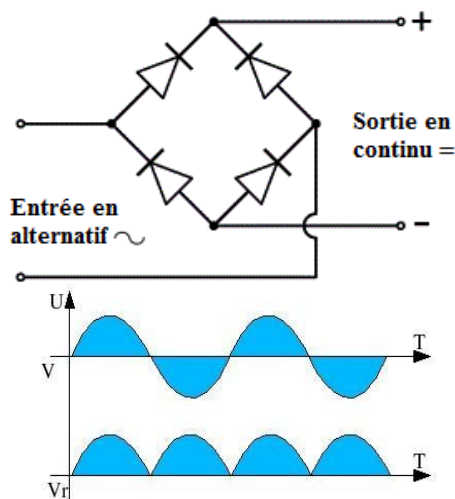


Figure 2.11.a : Redressement en pont de diodes Figure 2.11.b : Diodes - LED et diode Zener

2.2.4 Transistors

Les transistors sont des composants électroniques fondamentaux qui ont révolutionné le domaine de l'électronique. Ils sont utilisés comme des interrupteurs contrôlés électroniquement et comme des amplificateurs de courant. Les transistors sont essentiels pour le fonctionnement des circuits intégrés, qu'ils soient utilisés en électronique analogique ou numérique.

a. Fonctionnement des transistors :

Un transistor est un dispositif à semi-conducteur doté de trois couches de matériau : la base, l'émetteur et le collecteur. Il existe deux principaux types de transistors : les transistors bipolaires et les transistors à effet de champ (FET). Chaque type a des modes de fonctionnement spécifiques, mais en général, les transistors agissent comme des amplificateurs de courant ou des interrupteurs contrôlés par un signal d'entrée.

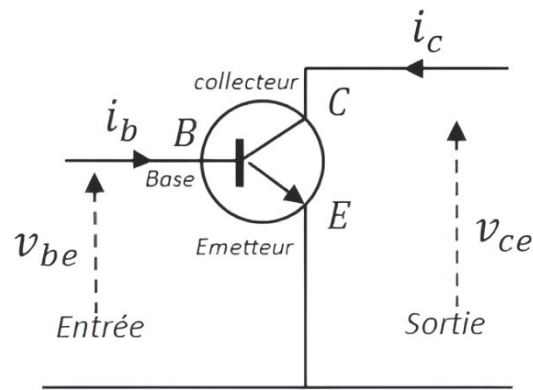


Figure 2.12 : Schéma fonctionnel d'un transistor

a.1 Type de transistors bipolaires :

Les transistors bipolaires comprennent les transistors NPN et PNP. Dans un transistor NPN, le courant circule du collecteur vers l'émetteur lorsque le transistor est polarisé correctement. Dans un transistor PNP, le courant circule du collecteur vers l'émetteur dans la direction opposée.

a.2 Type de transistors à effet de champ (FET) :

Les transistors FET comprennent les transistors à effet de champ à jonction (JFET) et les transistors à effet de champ à grille isolée (IGFET), également appelés transistors MOSFET. Les transistors FET sont contrôlés par une tension appliquée à la grille. Ils sont largement utilisés dans les applications de haute fréquence et à faible consommation d'énergie.

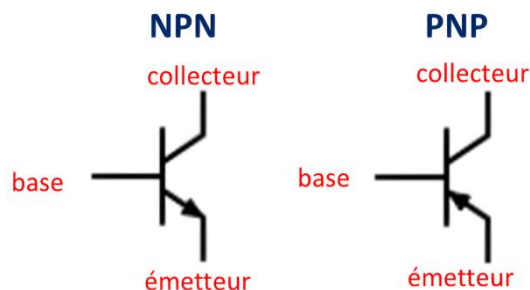


Figure 2.13.a : Transistor bipolaire avec ses deux types : NPN et PNP

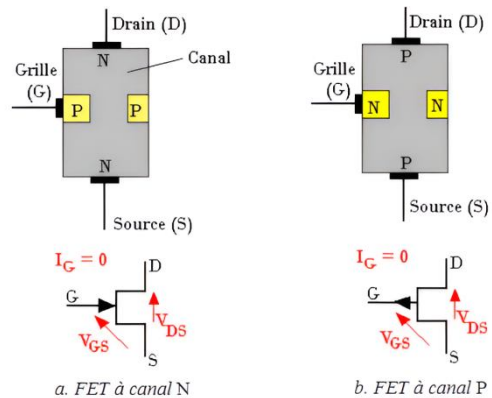


Figure 2.13.b : Transistor à effet de champ avec ses deux types : à canaux N et P

b. Applications des transistors :

- **Amplification** : L'une des applications principales des transistors est l'amplification de signaux. En utilisant un petit signal d'entrée, un transistor peut contrôler un courant plus important à sa sortie, ce qui permet d'amplifier le signal.
- **Commutation** : Les transistors peuvent agir comme des interrupteurs électroniques. En contrôlant la tension appliquée à la base (pour les transistors bipolaires) ou à la grille (pour les transistors FET), on peut ouvrir ou fermer le chemin du courant entre le collecteur et l'émetteur.

➤ **Circuits logiques** : Les transistors sont à la base des circuits logiques utilisés en électronique numérique. Ils sont utilisés pour créer des portes logiques comme les portes AND, OR et NOT, qui forment la base de la manipulation des signaux binaires (0 et 1).

➤ **Circuits intégrés** : Les transistors sont au centre de la conception des circuits intégrés (puces électroniques). Des millions voire des milliards de transistors sont intégrés sur une seule puce, permettant ainsi la création de microprocesseurs, de mémoires et d'autres composants essentiels à l'électronique moderne.

2.3 Circuits électroniques

2.3.1 Circuits analogiques

Les circuits analogiques sont des ensembles de composants électroniques conçus pour manipuler et traiter des signaux électriques continus, tels que les tensions et les courants variables en fonction du temps. Contrairement aux signaux numériques, qui sont discrétisés en valeurs binaires (0 et 1), les signaux analogiques varient en continu et peuvent prendre une gamme infinie de valeurs.

a. Fonctionnement des circuits analogiques :

Les circuits analogiques sont conçus pour conserver les caractéristiques des signaux analogiques en les amplifiant, en filtrant, en modulant, en démodulant, en mélangeant, etc. Ces circuits utilisent généralement des composants tels que les résistances, les condensateurs, les inductances et les amplificateurs opérationnels pour réaliser diverses opérations sur les signaux analogiques.

b. Applications des circuits analogiques :

- ✓ **Amplification audio** : Les circuits analogiques sont largement utilisés dans l'amplification audio. Les signaux audio, tels que ceux provenant d'un microphone ou d'une source musicale, sont amplifiés par des amplificateurs analogiques pour être diffusés via des haut-parleurs.
- ✓ **Capteurs et mesures** : Les circuits analogiques sont utilisés dans les capteurs et les instruments de mesure pour convertir des grandeurs physiques (comme la température, la pression, la lumière, etc.) en signaux électriques analogiques, qui peuvent ensuite être traités pour obtenir des mesures précises.
- ✓ **Filtrage** : Les circuits analogiques sont utilisés pour filtrer les signaux, en supprimant certaines fréquences ou en les laissant passer en fonction des besoins. Cela peut être utilisé dans la correction d'égalisation audio ou dans le filtrage des interférences.
- ✓ **Synthèse de signaux** : Les circuits analogiques sont utilisés dans la synthèse sonore pour créer des formes d'onde audio complexes à partir de signaux simples. Cela est fréquemment utilisé dans la musique électronique et les instruments de musique électroniques.

- ✓ **Radio et télévision analogiques** : Avant l'ère numérique, les signaux radio et télévision étaient diffusés sous forme analogique. Les circuits analogiques étaient utilisés pour la réception, la modulation et la démodulation de ces signaux.

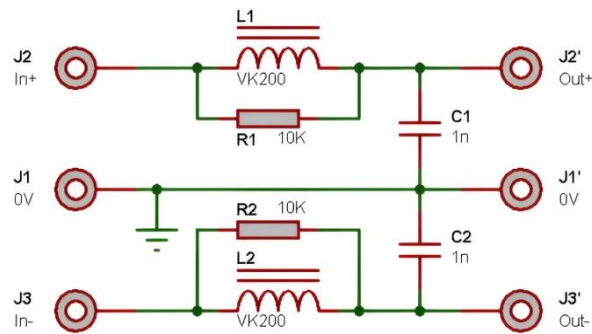


Figure 2.14 : Schéma d'un circuit analogique représentant un filtre radiofréquence (RF)

c. Avantages et limitations des circuits analogiques :

Les circuits analogiques sont souvent appréciés pour leur traitement en temps réel et leur nature continue, ce qui les rend appropriés pour certaines applications audio et de mesure. Cependant, ils sont également sujets aux interférences et à la dégradation du signal sur de longues distances. Avec l'avènement de l'électronique numérique, de nombreuses applications ont migré vers des solutions numériques offrant une meilleure précision et une meilleure immunité aux interférences.

2.3.2 Circuits numériques

Les circuits numériques sont des ensembles de composants électroniques conçus pour manipuler des signaux discrets, souvent représentés par des valeurs binaires de 0 et de 1. Contrairement aux circuits analogiques qui traitent des signaux continus, les circuits numériques utilisent des états discrets pour représenter l'information et effectuer des opérations logiques et arithmétiques.

a. Fonctionnement des circuits numériques :

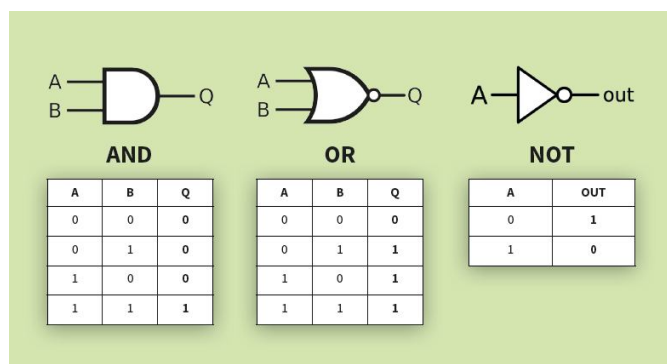


Figure 2.15.a : Table de vérité pour portes logiques AND, OR, NOT

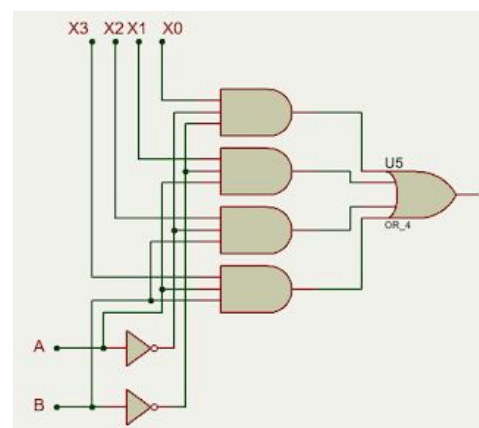


Figure 2.15.b : Réalisation d'un multiplexeur 4x1 à partir de portes logiques

Les circuits numériques utilisent des portes logiques (AND, OR, NOT, etc.), des bascules, des registres et d'autres composants pour effectuer des opérations logiques et arithmétiques sur les signaux binaires. Ces opérations sont définies par la logique booléenne, qui est la base de la manipulation de l'information numérique.

b. Applications des circuits numériques :

- ✓ **Systèmes informatiques** : Les circuits numériques sont à la base des systèmes informatiques modernes. Les processeurs, les mémoires et les unités de traitement des données fonctionnent tous en utilisant des circuits numériques pour exécuter des instructions, effectuer des calculs et stocker des données.
- ✓ **Communications numériques** : Les signaux numériques sont utilisés dans les communications modernes, y compris les réseaux de données, la téléphonie mobile et les transmissions par satellite. Les circuits numériques sont essentiels pour la compression, la modulation et la démodulation des données.
- ✓ **Stockage de données** : Les mémoires numériques, comme les disques durs, les SSD et les cartes mémoire, utilisent des circuits numériques pour stocker et récupérer des données. Les données sont souvent codées sous forme binaire pour un stockage efficace.
- ✓ **Cryptographie** : Les circuits numériques sont utilisés pour implémenter des algorithmes de chiffrement et de déchiffrement, ce qui est essentiel pour sécuriser les données et les communications dans les applications en ligne et hors ligne.

c. Avantages et limitations des circuits numériques :

Les circuits numériques offrent une grande précision, une immunité aux interférences et la possibilité de stocker et de manipuler des informations de manière efficace. Cependant, ils peuvent nécessiter davantage de ressources que les circuits analogiques pour réaliser certaines opérations, et la conversion entre signaux analogiques et numériques peuvent introduire des erreurs.

2.4 Applications de l'électronique**2.4.1 Électronique grand public**

L'électronique grand public transforme notre quotidien en rendant la technologie plus pratique, connectée et agréable, avec des innovations allant des smartphones aux appareils ménagers intelligents et dispositifs de divertissement.

- **Smartphones** : essentiels dans la vie moderne, combinent processeurs, écrans tactiles, capteurs et appareils photo pour offrir des fonctionnalités variées comme les appels, Internet, les médias sociaux, et la photographie.
- **Téléviseurs intelligents** : ils se connectent à Internet, diffusent des contenus en continu, exécutent des applications et offrent une expérience de visionnage améliorée grâce à des écrans haute résolution et des technologies d'affichage avancées.

- **Appareils ménagers intelligents** : comme les réfrigérateurs et thermostats, ils intègrent des fonctionnalités connectées et peuvent être contrôlés à distance pour faciliter la gestion de la maison.
- **Dispositifs de santé et de remise en forme** : les montres connectées et les trackers, surveillent l'activité physique, le rythme cardiaque et d'autres paramètres de santé pour améliorer notre bien-être.
- **Divertissement électronique** : incluant les consoles de jeu, lecteurs multimédias, et systèmes audio, ils offrent des expériences de divertissement à domicile de haute qualité.
- **Sécurité résidentielle intelligente** : les systèmes de sécurité résidentielle intelligente utilisent des capteurs et des caméras connectées pour surveiller les maisons en temps réel et permettent un contrôle à distance des dispositifs de sécurité.

2.4.2 Communication

La communication électronique consiste à transmettre des informations (voix, données, vidéos, etc.) entre dispositifs distants grâce à des émetteurs, canaux de transmission, et récepteurs. Les progrès en électronique ont amélioré la vitesse, la fiabilité et l'efficacité des transmissions.

- **Téléphonie Mobile** : Les réseaux 4G et 5G utilisent des technologies avancées comme les antennes intelligentes et les modems pour des transmissions rapides et stables.
- **Internet** : Repose sur une infrastructure complexe avec routeurs, commutateurs et modems, facilitant divers services en ligne tels que le courrier électronique et le streaming vidéo.
- **Communications sans Fil** : Technologies comme Bluetooth et Wi-Fi permettent des communications à courte portée et la création de réseaux locaux entre appareils.
- **Satellites de communication** : Essentiels pour la communication mondiale, les satellites utilisent l'électronique pour relayer des signaux et fournir des services de navigation.
- **Fibre optique** : Utilise l'électronique pour créer et recevoir des signaux optiques, offrant des débits de données élevés nécessaires pour l'Internet à haut débit et le streaming.
- **Codage et compression de données** : Permettent de transmettre plus d'informations en réduisant la bande passante nécessaire, crucial pour les communications à haut débit.
- **Sécurité et cryptographie** : Assurent la confidentialité et l'intégrité des informations transmises grâce à des techniques de cryptage et d'authentification.

2.4.3 Médecine

L'électronique médicale a révolutionné les soins de santé en transformant les méthodes archaïques du diagnostic, traitement et la surveillance des patients. Dans le domaine du **diagnostic**, les équipements tels que les rayons X, les scanners CT et les IRM utilisent aujourd'hui les principes de l'électronique pour fournir des images détaillées permettant aux médecins de poser des diagnostics précis. Les échographes, qui produisent des images en temps réel des organes internes à l'aide d'ondes sonores, dépendent également de technologies électroniques pour la génération et le traitement des signaux ultrasonores. En ce qui concerne la **surveillance des patients**, les moniteurs médicaux affichent en temps réel des signes vitaux cruciaux, tandis que les implants médicaux comme les stimulateurs cardiaques et défibrillateurs régulent automatiquement les fonctions corporelles et traitent les anomalies détectées. Enfin, dans le domaine des **thérapies médicales**, l'électronique permet des interventions plus précises avec la chirurgie assistée par robot, administre des traitements de stimulation électrique pour des affections comme la maladie de Parkinson, et utilise la thérapie par laser et radiofréquence pour traiter diverses conditions médicales.

2.5 Conclusion

L'électronique est une discipline vaste et complexe, qui englobe l'étude, la conception et l'application de circuits et dispositifs électroniques. C'est un domaine en constante évolution, où les avancées technologiques se succèdent à un rythme accéléré, modifiant continuellement les possibilités offertes par l'électronique. Cette discipline a un impact profond sur de nombreux secteurs, tels que les communications, l'informatique, la médecine, l'industrie et bien d'autres.

Ce chapitre, bien qu'introductif, vise à offrir un aperçu des concepts fondamentaux de l'électronique. Il aborde les principes de base qui sous-tendent le fonctionnement des circuits électroniques, ainsi que les composants essentiels tels que les résistances, les condensateurs, les diodes et les transistors. Ces éléments, bien que simples en apparence, constituent les blocs de construction de systèmes électroniques plus complexes, comme les ordinateurs, les téléphones mobiles et les dispositifs médicaux.

L'importance de l'électronique dans notre société ne peut être sous-estimée. Elle est au cœur des innovations qui transforment notre quotidien, des objets connectés aux voitures autonomes, en passant par les énergies renouvelables et les technologies médicales de pointe. Ce chapitre espère non seulement fournir une base solide pour comprendre ces technologies, mais aussi inspirer une curiosité et un intérêt pour les évolutions futures de ce domaine.

CHAPITRE 3: *Automatique*

Introduction :

L'automatique est une discipline qui englobe l'étude, la conception et le contrôle des systèmes dynamiques, avec l'objectif de les rendre autonomes et capables de prendre des décisions en fonction des données et des conditions environnementales. Ce chapitre explorera les fondements de l'automatique, son importance dans différents domaines de la vie quotidienne et de l'industrie, ainsi que son évolution historique.

3.1 Définition de l'automatique

L'automatique est la branche de l'ingénierie qui se consacre à la conception, à l'analyse et à la mise en œuvre de systèmes qui fonctionnent de manière autonome, en ajustant leurs comportements en fonction des entrées et des informations reçues (association d'une chaîne d'information et autre de l'énergie). Ces systèmes, appelés « systèmes automatiques » ou « systèmes automatisés », sont conçus pour réagir de manière appropriée aux changements de leur environnement et pour effectuer des tâches spécifiques sans intervention humaine constante. L'automatique englobe des concepts provenant de domaines tels que le contrôle, l'électronique, l'informatique et les mathématiques.

Remarques : On appelle **un actionneur**, la partie opérative responsable à toute action physique tel qu'un déplacement, un dégagement de chaleur, une émission de lumière ou de son à partir de l'énergie qu'il a reçu. Par ailleurs, **Un capteur** est un élément de la partie opérative qui permet de recueillir des informations et de les transmettre à la partie commande. Les capteurs sont choisis en fonction des informations qui doivent être recueillies (température, son, lumière, déplacement, position).

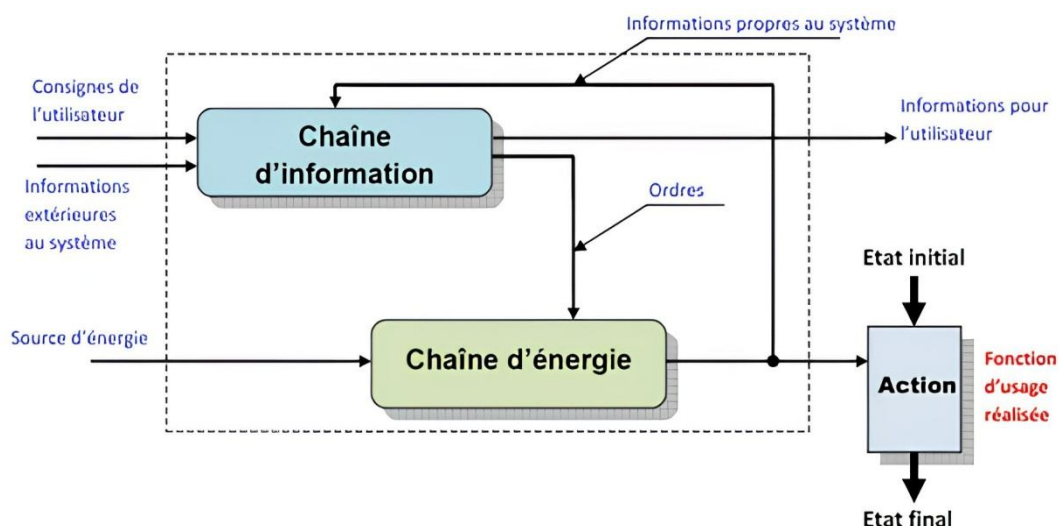


Figure 3.1 : Association des chaînes d'information et d'énergie pour un système automatisé

3.2 Importance et applications de l'automatique

L'automatique joue un rôle crucial dans notre vie quotidienne et dans de nombreuses industries. Elle permet d'améliorer l'efficacité, la précision et la sécurité des processus et des systèmes, tout en libérant les individus des tâches monotones et répétitives. Dans les industries manufacturières, l'automatisation permet d'augmenter la production, de réduire les erreurs humaines et d'améliorer la qualité des produits. Les systèmes automatiques sont également omniprésents dans les secteurs tels que les transports, la domotique, la santé, l'énergie et les télécommunications.

3.3 Bases historiques et développement de l'automatique

L'automatique puise ses racines dans l'histoire ancienne, avec des exemples tels que les horloges mécaniques et les mécanismes de contrôle des machines à vapeur. Cependant, c'est au cours du 20^e siècle que la discipline a connu des avancées significatives. Le développement de l'électronique, de l'informatique et des systèmes de communication a permis la création de systèmes de contrôle de plus en plus sophistiqués et complexes. Le concept de rétroaction (ou boucle de rétroaction), où les informations sur la sortie d'un système sont utilisées pour ajuster son comportement, a été fondamental dans le domaine de l'automatique. Au fil du temps, cette discipline a évolué pour inclure des méthodes de modélisation mathématique, de simulation, d'optimisation et d'intelligence artificielle, permettant ainsi la création de systèmes automatiques adaptatifs capables de prendre des décisions en temps réel pour améliorer les performances.

3.4 Automatique classique :

L'automatique classique est un domaine essentiel de l'automatisation industrielle. Les automates programmables, au cœur de cette discipline, exécutent des tâches spécifiques en réponse à des entrées externes. Ils automatisent des opérations, améliorent les performances et interagissent avec l'environnement via des entrées et des sorties. Leur unité de traitement analyse les entrées, effectue des calculs en fonction du programme défini et déclenche des sorties par conséquent. Cette séquence d'opérations permet de contrôler des machines, de suivre des processus et de réguler la température dans les processus industriels. Les automates programmables sont une solution fiable et efficace pour automatiser les processus industriels, augmentant la production, réduisant les erreurs humaines et améliorant la sécurité des opérations.

3.4.1 Introduction aux automates programmables :

- **Définition** : Un automate programmable industriel (API) est un dispositif électronique conçu pour automatiser des tâches industrielles en exécutant des programmes préalablement écrits. Il est utilisé pour contrôler des machines, des processus et des systèmes.
- **Historique et évolution** : Les API ont évolué à partir des relais électromécaniques utilisés pour contrôler les machines au début du 20^e siècle. Les premiers automates programmables

modernes ont été introduits dans les années 1960 pour remplacer les tableaux de câblage complexes.

- **Avantages** : Les API permettent la reconfiguration du système, offrent aussi une flexibilité et une fiabilité accrue par rapport aux systèmes de contrôle traditionnels. Ils garantissent également une meilleure surveillance, un dépannage plus facile et une réduction des temps d'arrêt dans les opérations industrielles.

3.4.2 Architecture d'un automate programmable :

- **Unité centrale** : Le cerveau de l'automate qui exécute les programmes.
- **Modules d'entrées/sorties** : Connectent l'automate aux capteurs (entrées) et aux actionneurs (sorties) du système contrôlé.
- **Alimentation** : Fournit l'alimentation électrique nécessaire à tous les composants de l'automate.
- **Interfaces utilisateur et moyens de programmation** : Écrans tactiles, claviers, logiciels de programmation, etc. permettant aux utilisateurs de créer et de modifier des programmes.

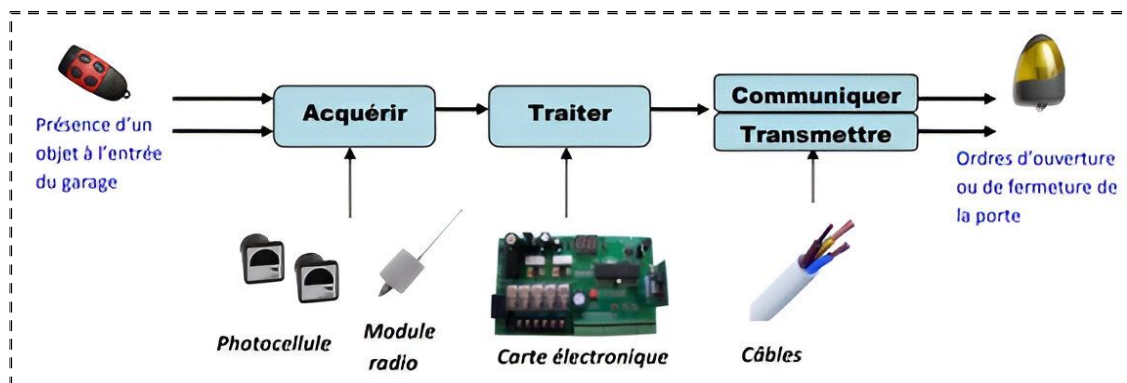


Figure 3.2 : Exemple sur l'ouverture automatisée d'une porte de garage

3.4.3 Programmation d'automates :

- **Langages de programmation** : Différents langages sont utilisés pour programmer les automates. Le Ladder Logic est similaire à un schéma électrique, Grafset (ou SFC) est basé sur des étapes et des transitions, l'Instruction List est proche d'un langage de bas niveau et le Structured Text ressemble à un langage de programmation classique.
- **Notions de base en Ladder Logic** : Contacts (entrées) et bobines (sorties), relais, timers (temporisateurs), compteurs, etc. Les programmes sont structurés en utilisant des relais logiques pour représenter le comportement du système.

3.4.4 Fonctions avancées de programmation :

- **Utilisation de timers et de compteurs** : Temporisation et comptage pour contrôler le déroulement du processus.
- **Utilisation de registres** : Stockage de données et de valeurs, permettant une manipulation plus complexe.
- **Gestion des interruptions et des événements** : Réponse à des événements inattendus ou des situations d'urgence.
- **Fonctions logiques avancées et opérations mathématiques** : Permettent des opérations complexes de traitement de signaux.

3.4.5 Communication et réseautage :

- **Protocoles de communication industrielle** : Différents protocoles comme Modbus, Profibus, Ethernet/IP permettent la communication entre automates et autres équipements.
- **Intégration d'automates dans des réseaux industriels** : Permet le contrôle et le suivi centralisés de plusieurs automates dans un système.
- **Communication avec les systèmes SCADA** : Les automates peuvent être intégrés à des systèmes SCADA pour une surveillance et un contrôle plus avancés.

3.4.6 Applications industrielles :

- **Exemples d'applications** : Contrôle de lignes de production, automatisation de machines, systèmes de contrôle d'éclairage et de climatisation dans les bâtiments, etc.
- **Considérations de sécurité** : Sécurité des opérateurs et des machines, protection contre les défaillances.

3.4.7 Dépannage et maintenance :

- **Techniques de dépannage** : Identification des problèmes, utilisation de diagnostics intégrés, remplacement de composants défectueux.
- **Sauvegarde et restauration** : Sauvegarde régulière des programmes et des configurations pour éviter la perte de données en cas de défaillance.

3.4.8 Tendances actuelles et futures :

- **Ilot et Industrie 4.0** : Intégration des automates dans l'Internet des Objets Industriels pour une gestion plus intelligente et une maintenance prédictive.
- **Intelligence artificielle** : Utilisation de l'IA pour optimiser les performances des automates et prendre des décisions basées sur les données.

3.5 Introduction aux systèmes dynamiques :

Les Systèmes Dynamiques constituent un domaine fondamental de la science qui se consacre à l'étude du comportement évolutif des systèmes au fil du temps. Ces systèmes sont présents dans une multitude de disciplines, allant de l'ingénierie à la biologie en passant par la physique et l'économie. Cette introduction vise à définir ce qu'est un système dynamique et à mettre en évidence l'importance cruciale de leur étude dans des contextes variés.

3.5.1 Définition :

Un système dynamique se réfère à un ensemble d'éléments interagissant entre eux et dont les états évoluent en fonction du temps. Ces éléments peuvent être des objets physiques, des variables mathématiques, des populations biologiques, des systèmes économiques ou même des phénomènes naturels. Ce qui caractérise un système dynamique, c'est sa capacité à évoluer dans le temps, présentant ainsi des changements, des trajectoires ou des comportements distincts à différentes étapes.

3.5.2 Importance de l'étude des systèmes dynamiques :

L'étude des systèmes dynamiques revêt une importance capitale dans une diversité de domaines. En ingénierie, elle permet de modéliser et d'analyser le comportement de systèmes complexes tels que

les circuits électriques, les machines, les processus de fabrication, et bien d'autres. Cette approche permet de mieux comprendre leurs réactions face à diverses entrées et conditions.

Les systèmes dynamiques trouvent des applications dans la modélisation de phénomènes naturels, comme le mouvement des planètes, la propagation des ondes et les réactions chimiques. Ces modèles permettent aux scientifiques de prédire et d'expliquer les comportements observés dans le monde physique.

3.5.3 Types de systèmes dynamiques :

Les systèmes dynamiques peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leurs caractéristiques et de leurs comportements. Deux distinctions importantes sont celles entre les systèmes linéaires et non linéaires, ainsi qu'entre les systèmes continus et discrets. Chacune de ces catégories présente des propriétés spécifiques et trouve des applications variées dans divers domaines.

a. Les systèmes linéaires et non linéaires :

Un système linéaire est caractérisé par le respect de la propriété de linéarité, ce qui signifie que la relation entre ses entrées et ses sorties peut être représentée par des équations linéaires. En d'autres termes, si une variation proportionnelle est appliquée à l'entrée, la variation à la sortie sera également proportionnelle. Les systèmes électriques et mécaniques simples, tels que les circuits électriques et les ressorts, sont souvent des exemples de systèmes linéaires.

En revanche, les systèmes non linéaires ne suivent pas cette propriété de linéarité. Les relations entre les entrées et les sorties de tels systèmes sont complexes et peuvent être décrites par des équations non linéaires. Les systèmes biologiques, économiques et météorologiques sont des exemples courants de systèmes non linéaires, car ils impliquent des interactions complexes et souvent imprévisibles.

b. Les systèmes continus et discrets :

Les systèmes continus sont caractérisés par des variations continues dans le temps. Dans ces systèmes, les signaux et les données évoluent de manière fluide et ininterrompue. Les systèmes physiques tels que les systèmes mécaniques et électriques en régime permanent sont souvent modélisés comme des systèmes continus.

D'un autre côté, les systèmes discrets fonctionnent avec des valeurs discrètes dans le temps. Les données et les signaux sont échantillonnés à des moments spécifiques, ce qui crée une série de points discrets. Les systèmes de traitement numérique, comme les ordinateurs et les systèmes de communication numérique, sont des exemples typiques de systèmes discrets.

3.5.4 Modélisation des systèmes dynamiques :

La modélisation des systèmes dynamiques est cruciale pour analyser et prédire le comportement de systèmes complexes dans des domaines comme l'ingénierie, la physique, l'économie, et la biologie. Elle implique l'utilisation de diverses méthodes, telles que les équations différentielles pour représenter les changements continus, et les systèmes à événements discrets pour modéliser les transitions entre états distincts. Ces approches permettent de capturer l'évolution des systèmes en temps réel, offrant une compréhension approfondie des interactions et des dynamiques sous-jacentes.

a. Utilisation d'équations différentielles pour modéliser les systèmes continus :

Les équations différentielles ordinaires (EDO) sont cruciales pour modéliser les systèmes continus variant dans le temps. Elles décrivent les changements des variables, prédisent l'évolution du système et s'appliquent à divers phénomènes physiques, chimiques et biologiques.

b. Utilisation d'équations d'état pour modéliser les systèmes discrets et continus :

Les équations d'état sont un outil puissant pour modéliser les systèmes continus et discrets, décrivant les interactions complexes entre les composantes d'un système. Elles lient les variables d'état, résumant l'état global du système, aux entrées et sorties. Ces modèles compacts aident à prédire le comportement futur de divers systèmes, tels que les systèmes de contrôle et les réseaux de neurones.

c. Introduction aux équations d'État :

Les équations d'état sont un concept plus général qui englobe à la fois les systèmes continus et discrets. Elles permettent de décrire le comportement d'un système en termes de variables d'état, d'entrées et de sorties. Les équations d'état sont couramment utilisées pour représenter des systèmes complexes tels que les systèmes de contrôle, les circuits électriques, les processus chimiques et bien d'autres. Voici un modèle courant sur les équations d'état d'un système linéaire sous sa forme matricielle : $\dot{X} = A(t) \cdot X(t) + B(t) \cdot U(t)$ et $Y = C(t) \cdot X(t) + D(t) \cdot U(t)$

Avec : $X \in \mathbb{R}^n$: vecteur représentant les n variables d'état ; $X \in \mathbb{R}^n$: vecteur représentant les q mesures

$U \in \mathbb{R}^p$: vecteur des p commandes

$A \in \mathbb{R}^{n \times n}$: Matrice de dynamique

$B \in \mathbb{R}^{n \times p}$: Matrice de commande

$C \in \mathbb{R}^{q \times n}$: Matrice d'observation

$D \in \mathbb{R}^{q \times p}$: Matrice d'action directe

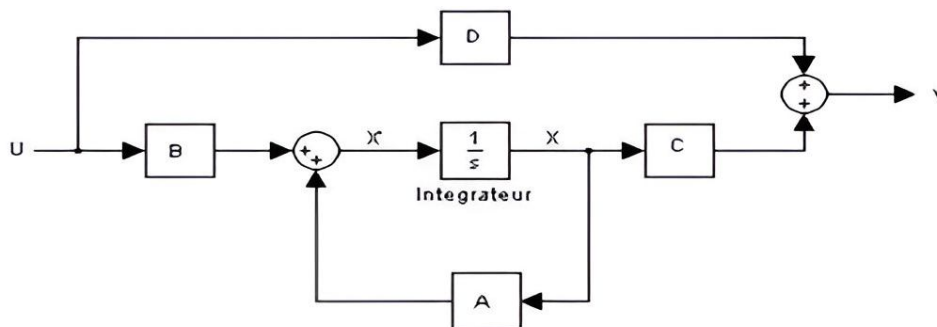


Figure 3.3 : Représentation du modèle d'état pour un système linéaire en continue

Pour les systèmes continus, les équations d'état prennent la forme de systèmes d'équations différentielles ordinaires couplées, reliant les dérivées temporelles des variables d'état aux entrées et sorties du système. Dans le cas des systèmes discrets, les équations d'état se présentent souvent sous forme de relations récurrentes, décrivant comment les variables d'état évoluent d'un pas de temps discret au suivant.

d. Exemples de modélisation de systèmes :

L'utilisation d'équations différentielles et d'état pour modéliser des systèmes permet de capturer une grande variété de comportements et de phénomènes. Par exemple, la croissance d'une population d'organismes peut être modélisée à l'aide d'une équation différentielle où le taux de croissance dépend de la taille actuelle de la population. De même, un circuit électrique peut être décrit par des équations d'état qui tiennent compte des composants électriques et de leurs interactions.

e. Représentations temporelles et fréquentielles :

Dans le domaine de l'analyse des systèmes et des signaux, les représentations temporelles et fréquentielles jouent un rôle essentiel pour comprendre le comportement et les propriétés des systèmes. Cette section se penche sur les deux principales façons de représenter ces systèmes : la représentation temporelle et la représentation fréquentielle.

✓ Représentation temporelle :

La représentation temporelle d'un système ou d'un signal permet d'observer son comportement dans le temps. Deux concepts importants dans cette représentation sont la réponse impulsionnelle et la réponse indicielle. La réponse impulsionnelle d'un système est la sortie produite lorsque celui-ci est excité par une impulsion unitaire, également connue sous le nom de "fonction delta de Dirac". Elle offre une vision claire de la manière dont un système réagit à un changement soudain ou à un stimulus bref. La réponse indicielle, quant à elle, représente la sortie d'un système lorsque celui-ci est stimulé par un signal échelon unitaire. Elle est utile pour observer comment un système atteint un état stable après un changement brusque et comment il réagit aux variations continues.

✓ Transformation de Laplace :

La transformation de Laplace est un outil mathématique puissant qui permet de passer de la représentation temporelle à la représentation fréquentielle. Elle est particulièrement utile pour analyser les systèmes linéaires invariants dans le temps. La transformation de Laplace permet de convertir des équations différentielles dans le domaine temporel en équations algébriques dans le domaine fréquentiel, facilitant ainsi l'analyse et la résolution de problèmes complexes.

✓ Analyse fréquentielle :

L'analyse fréquentielle est une méthode clé pour comprendre les caractéristiques d'un système ou d'un signal en fonction de la fréquence. Elle utilise des outils comme les diagrammes de Bode et de Nyquist pour visualiser et interpréter ces caractéristiques. Les diagrammes de **Bode** présentent l'amplitude et la phase de la réponse fréquentielle en fonction de la fréquence, facilitant l'identification des fréquences critiques, telles que celles de résonance ou d'atténuation. Ces informations sont cruciales pour la conception et l'ajustement des systèmes. Les diagrammes de **Nyquist**, quant à eux, montrent la relation entre les parties réelle et imaginaire de la fonction de transfert, ce qui aide à évaluer la stabilité du système. En observant la proximité de la courbe Nyquist avec le point critique $(-1,0)$, les ingénieurs peuvent déterminer si un système est stable ou nécessite des ajustements. Ces deux outils sont donc indispensables pour l'analyse et la conception de systèmes robustes et performants.

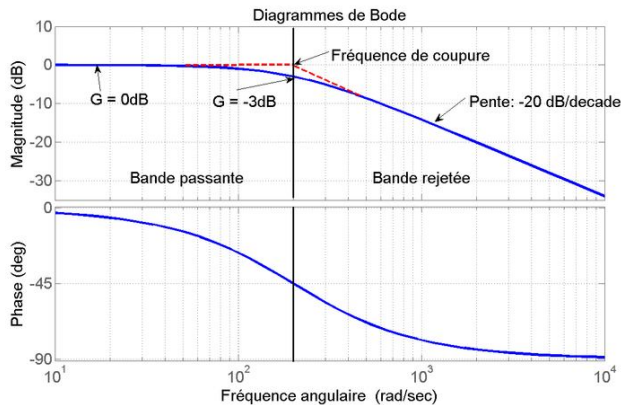


Figure 3.4.a : Diagramme de Bode d'un filtre passif de premier ordre (circuit RC)

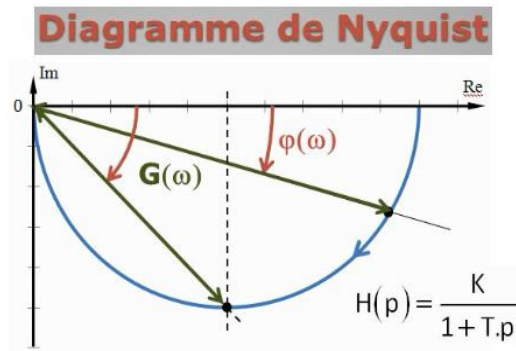


Figure 3.4.b : Diagramme de Nyquist du 1er ordre

✓ Stabilité, marges de stabilité et robustesse :

La stabilité d'un système est essentielle pour garantir sa capacité à revenir à un état stable suite à une perturbation, tandis que les marges de stabilité et la robustesse évaluent sa proximité de l'instabilité et sa capacité à maintenir sa performance face aux variations.

✓ Performance du système :

L'évaluation de la performance du système se base sur des critères comme le temps de montée, le temps de réponse et l'erreur statique, qui fournissent des indications essentielles sur son efficacité et sa réactivité par rapport aux besoins et attentes.

3.6 Automatique avancée:

L'automatique avancée est une branche de l'ingénierie qui se concentre sur la conception et la mise en œuvre de systèmes de contrôle sophistiqués pour réguler automatiquement le comportement de systèmes dynamiques. Ces systèmes peuvent être présents dans divers domaines industriels tels que l'industrie manufacturière, l'aérospatiale, l'automobile, l'énergie, etc. L'asservissement, la régulation, la commande avancée et l'automatique non linéaire sont des concepts clés abordés dans ce domaine.

3.6.1 Asservissement :

L'asservissement consiste à maintenir un système à un état souhaité en ajustant en continu les commandes en fonction de la réponse du système. Son rôle est de minimiser l'écart entre la sortie souhaitée (consigne) et la sortie réelle du système. L'erreur de consigne mesure la différence entre la valeur désirée et la valeur actuelle de la sortie. L'erreur de régulation mesure la différence entre la sortie désirée et la sortie réelle après avoir appliqué les commandes.

3.6.2 Contrôleurs PID :

Les contrôleurs PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) sont des dispositifs couramment utilisés pour l'asservissement et la régulation de systèmes. Chaque composante du contrôleur PID a un rôle spécifique :

- ✓ La composante proportionnelle agit en fonction de l'erreur actuelle et permet de réduire l'écart entre la sortie réelle et la consigne.
- ✓ La composante intégrale s'intéresse à l'historique des erreurs et contribue à éliminer l'erreur résiduelle.

- ✓ La composante dérivée prévoit la tendance future de l'erreur et peut améliorer la stabilité du système en anticipant les changements.

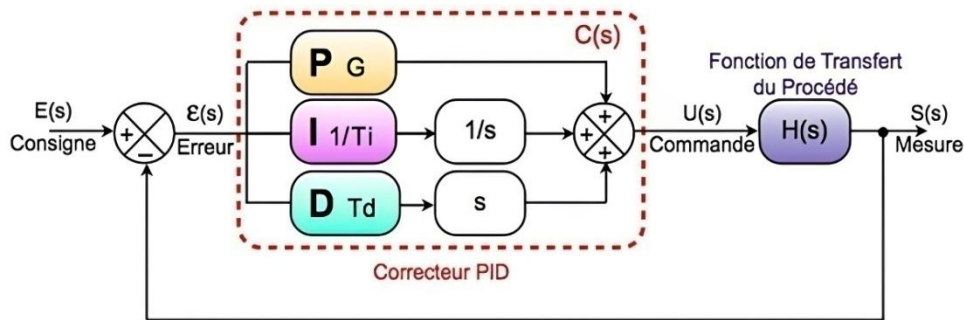


Figure 3.5 : Régulation par les trois actions PID (architecture parallèle)

3.6.3 Régulation :

La régulation va au-delà de l'asservissement en tenant compte des perturbations externes qui peuvent influencer le système. Les perturbations peuvent affecter la sortie du système même si la consigne est respectée. Les stratégies de contrôle pour minimiser l'impact des perturbations incluent l'utilisation de modèles prédictifs, de systèmes de filtrage avancés et de techniques de compensation adaptative.

3.6.4 Commandes avancées :

Les techniques de commande avancées, telles que la commande par mode glissant, la commande prédictive et la commande optimale, visent à améliorer la performance des systèmes de contrôle dans des situations complexes. Elles offrent des avantages spécifiques comme une meilleure robustesse aux perturbations, une précision accrue et une meilleure réactivité.

3.7 Automatique non linéaire :

De nombreux systèmes du monde réel présentent des comportements non linéaires, ce qui signifie que leurs réponses ne peuvent pas être modélisées de manière linéaire. La linéarisation locale est une technique qui approxime le système non linéaire par un modèle linéaire autour d'un point de fonctionnement. La commande adaptative ajuste les paramètres du contrôleur en temps réel pour s'adapter aux variations du système non linéaire.

3.8 Conclusion :

L'automatique est essentielle dans de nombreux secteurs industriels, où elle optimise les performances des systèmes en augmentant l'efficacité, la précision et la sécurité. En permettant le contrôle autonome des processus, elle réduit les erreurs humaines et améliore la productivité, que ce soit dans la fabrication, l'énergie, ou les transports. Le domaine est en perpétuelle évolution, avec des avancées technologiques comme l'intégration de l'intelligence artificielle et des systèmes adaptatifs, offrant des opportunités constantes de recherche et d'innovation. Les étudiants sont encouragés à approfondir ces concepts à travers des projets pratiques, leur permettant d'appliquer leurs connaissances et de contribuer activement à l'amélioration des technologies de contrôle automatique.

Conclusion générale

En résumé, l'électrotechnique, l'électronique et l'automatique sont des fondements cruciaux de l'ingénierie moderne, chacun apportant des contributions déterminantes au développement des technologies qui façonnent notre monde. L'électrotechnique se concentre sur la production, la distribution, et l'utilisation de l'énergie, garantissant que les infrastructures et les industries fonctionnent de manière efficace et fiable. Ce domaine est essentiel pour la gestion de l'énergie, notamment avec l'intégration des énergies renouvelables et la mise en place de réseaux intelligents (smart grids), qui visent à améliorer la durabilité énergétique.

L'électronique, de son côté, est au cœur des innovations technologiques dans les domaines des communications, de l'informatique, et des objets connectés. En permettant la conception de circuits et de dispositifs de plus en plus petits, puissants et éco-énergétiques, l'électronique joue un rôle clé dans l'évolution de la technologie numérique, influençant tout, des smartphones aux systèmes embarqués dans les véhicules.

L'automatique, quant à elle, est essentielle pour le développement de systèmes capables de fonctionner de manière autonome. Ce domaine permet d'optimiser les processus industriels, d'améliorer la sécurité des systèmes critiques, et d'accroître la productivité dans divers secteurs, allant de la production manufacturière à la gestion des réseaux de transport et d'énergie. L'intégration de l'intelligence artificielle dans les systèmes automatiques ouvre de nouvelles perspectives pour des applications avancées, telles que les véhicules autonomes et les robots intelligents.

Ces trois disciplines, bien que distinctes, sont interdépendantes et se complètent pour créer des systèmes complexes et hautement performants. Dans un contexte de numérisation croissante et de transition vers des technologies plus intelligentes et durables, leur importance continue de s'accroître. Les défis actuels, comme la transition vers des sources d'énergie plus propres, l'automatisation des processus industriels, et l'innovation constante en électronique, placent ces domaines au cœur des préoccupations mondiales. Grâce à leur capacité d'innovation et à leur intégration de nouvelles technologies, l'électrotechnique, l'électronique et l'automatique joueront un rôle décisif dans la résolution des défis technologiques, économiques et environnementaux de notre époque, tout en ouvrant la voie à un avenir plus durable et interconnecté.

Bibliographie

1. Blajikine, B. Frolov & Al, " Electrotechnique Générale " , Éditions Mir, 1977.
2. C. Palermo, " Précis d'Électrotechnique " , Dunod, 2012, corrigé en 2015.
3. Luc Lasne, " Electrotechnique et Energie Electrique " , Dunod, Paris, 2008, 201.3
4. M. Jufer, Y. Perriard, " Électrotechnique : Base de l'électricité " , EPFL Press, 3rd edition, 2023.
5. Bareille, L. Mossion, C. Garnier, " L'essentiel d'électrotechnique " , Dunod, Malakoff, 2018.
6. L. Lasne - " Électronique de puissance " , Dunod, Paris, 2011.
7. G. Rizzoni, " Fundamentals of Electrical Engineering " , 1st edition, McGraw-Hill, 2008.
8. B.L. Theraja, " Fundamentals of Electrical Engineering and Electronic " , S Chand Publishing, 2022
9. L.S. Bobrow - " Fundamentals of Electrical Engineering " , Oxford University Press; 2nd edition, 2003
10. [Site Internet : https://www.techniques-ingenieur.fr](https://www.techniques-ingenieur.fr)
11. Paul Horowitz & Winfield Hill, " Traité de l'électronique analogique et numérique " , vol.2, Publitrone-Elektor, 1996
12. B. Estibals, S. Weber, " Electronique-Tout le cours en fiche " , Dunod 2015
13. Mohamed. A Mellal, " Electronique générale " , Presses Académiques Francophones, 2015
14. C & H. Ngô, " Physique des semi-conducteurs " , Dunod, 2015
15. M. Rivoire & J.Ferrier, " Cours d'automatique Vol. 1 : Signaux et systèmes " , Paris : Éditions Eyrolles, 2005
16. P. De Larminat, Automatique : " Commande des systèmes linéaires " , Paris : Éditions Dunod, 2010.
17. C. François, Génie électrique - " Cours complet illustré " , Paris : Éditions Ellipses, 2018.
18. Norman S. Nise, " Control Systems Engineering ". 7th ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2015.
19. O. Katsuhiko, " Modern Control Engineering " , 5th ed. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2010.
20. G.F. Franklin, J. Da Powell & A.E. Naeini, " Feedback Control of Dynamic Systems ". 7th ed. Boston, MA : Pearson, 2015.