



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique**

**Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen
Faculté de Technologie**



Département du Génie Electrique et Electronique

Domaine : Sciences et Technologies

Licence : 2^{ème} Année - Semestre 1

Filière : Electrotechnique, Electronique, Automatique

Etat de l'art du Génie électrique

Cours

Dr. Abdelkader Mechernene

mechernene_awk@hotmail.com

Année universitaire 2025 / 2026

Avant-propos

Le présent polycopié de cours est consacré à la matière intitulée « *Etat de l'art du génie électrique* », destinée aux étudiants des filières du Génie Electrique, plus spécialement des sections de 2^{ème} année de Licence LMD et aux sections élèves-ingénieurs du Département de Génie Électrique et Electronique, de la Faculté de Technologie, de l'Université Abou Bekr Belkaïd.

Le génie électrique représente aujourd'hui un champ incontournable de l'ingénierie et constitue une branche de la technologie en perpétuelle mutation, pivot des avancées technologiques actuelles, regroupant les savoirs et méthodes associés à l'électricité. Il englobe la génération, la transformation, le transport, la répartition, le conditionnement, l'emploi de l'énergie électrique. Ses domaines spécialisés variés vont de l'électrotechnique à l'intelligence artificielle, incluant l'électronique, l'automatique et les télécommunications. Son développement s'illustre par des percées scientifiques capitales, des innovations techniques déterminantes et des usages industriels qui ont métamorphosé les civilisations humaines. Ses retombées socioéconomiques imprègnent l'ensemble des sphères : industrie, agriculture, santé, transports, communications, environnement, éducation.

Ce polycopié constitue un support pédagogique essentiel pour la connaissance des différentes filières et disciplines principales des systèmes électriques modernes, il s'inscrit dans une logique de formation avancée, visant à doter les étudiants d'une culture générale qui leur permettra de posséder une vision globale de leur domaine d'étude. Ce document se veut un outil pédagogique structuré et accessible, conçu pour accompagner les étudiants dans leur parcours académique en intégrant la définition de chacune des filières du génie électrique et de nombreuses informations concernant leurs historiques, leurs principales applications, leurs avancées récentes, leurs perspectives. Enfin, les théories fondamentales et outils mathématiques nécessaires à l'analyse et la conception des systèmes électriques, sont citées.

Nous espérons que ce polycopié contribuera à renforcer l'intérêt des étudiants pour le génie électrique et qu'il constituera une référence utile dans leur cheminement vers l'excellence académique et professionnelle.

Dr. Abdelkader Mechernene

Table des matières

Chapitre I : Les familles du génie électrique	01
1. Introduction	01
2. Histoire des découvertes en génie électrique	01
2.1. Premiers phénomènes et expérimentations : Antiquité - XVIIIe siècle	01
2.2. Fondation du génie électrique : XIXe siècle	02
2.3. Naissance de l'électronique et télécommunications : 1900-1950	02
2.4. Semi-conducteurs, microprocesseurs et automatisation : 1950-2000	03
2.5. Technologies avancées, durables et connectées : 2000-2025	04
3. Electrotechnique	05
3.1. Généralités	05
3.2. Courant et tension continus	07
3.3. Courant et tension monophasés	07
3.4. Courants et tensions triphasés	08
3.5. Transformateurs monophasés et triphasés	09
3.6. Machines à courant continu	09
3.7. Machines synchrones	10
3.8. Machines asynchrones	11
3.9. Production de l'énergie électrique	12
3.10. Transport et distribution de l'énergie électrique	14
3.11. Filières de l'électrotechnique	15
4. Electronique	19
4.1. Généralités	19
4.2. Electronique analogique et électronique numérique	37
4.3. Matériaux semiconducteurs	38
4.4. La diode à jonction	38
4.5. Transistor bipolaire	39
4.6. Transistor FET et MOSFET	39
4.7. Les principales fonctions de l'électronique	40
4.8. Filières de l'électronique	41
5. Automatique	48
5.1. Généralités	48
5.2. Systèmes dynamiques linéaires et systèmes non-linéaires	51

5.3 Systèmes continus et systèmes discrets	51
5.4. Commande des systèmes dynamiques	52
5.5. Commandes avancées	54
5.6. Filières de l'automatique	57
6. Télécommunications	63
6.1. Généralités	63
6.2. Ondes électromagnétiques	65
6.3 Théorie des signaux et systèmes	67
6.4. Modulation, démodulation et chaîne de transmission	68
6.5. Supports et canaux de transmission	69
6.6 Réseaux et protocoles	70
6.7 Communications numériques et systèmes mobiles	71
6.8. Filières des télécommunications	72
7. Conclusion	72
Chapitre 2 : Impact du Génie électrique sur le développement de la société	73
1. Introduction	73
2. Approche historique du génie électrique	74
3. Spécialités du génie électrique et leurs impacts socio-économiques	76
3.1. Production, transport et distribution de l'énergie électrique	76
3.2. Machines électriques et entraînements	77
3.3. Electronique de puissance	77
3.4. Automatique et contrôle	77
3.5. Energies renouvelables et efficacité énergétique	78
3.6. Stockage énergétique moderne	78
3.7. Télécommunications et réseaux intelligents	78
3.8. Intelligence artificielle appliquée au génie électrique	79
3.9. Smart Grids et transformation socio-économique	79
4. Electromobilité et transformation de la société	79
5. Cybersécurité appliquée au génie électrique	80
6. Industrie 4.0 et impacts socio-économiques	80
7. Défis éthiques, environnementaux et sociétaux	81
8. Conclusion	81
Références bibliographiques	

Chapitre I

Les Familles du Génie Électrique

Les Familles du Génie Électrique

1. Introduction

Le génie électrique est une discipline de l'ingénierie, en constante évolution, au cœur des transformations technologiques modernes, qui regroupe les sciences et techniques liées à l'électricité et aux signaux électroniques. Il couvre la production, la conversion, la transmission, la distribution, le traitement, l'utilisation et la conversion de l'énergie électrique.

Ses disciplines spécialisées s'étendent de l'électrotechnique à l'intelligence artificielle, en passant par l'électronique, l'automatique, la et les télécommunications. Son évolution est marquée par des ruptures scientifiques majeures, des inventions techniques décisives et des applications industrielles qui ont transformé les sociétés humaines.

2. Histoire des découvertes en génie électrique

2.1 Premiers phénomènes et expérimentations : Antiquité – Début du XXe siècle

- **600 av. J-C.** : Thalès de Milet observe l'attraction de corps légers par l'ambre frotté.
- **1er siècle av. J-C.** : Utilisation de la magnétite en Chine pour l'orientation (boussole).
- **1600** : William Gilbert publie *De Magnete*, introduit le terme « électrique ».
- **1745** : Pieter van Musschenbroek invente la bouteille de Leyde, premier condensateur.
- **1752** : Benjamin Franklin démontre que la foudre est électrique et invente le paratonnerre.
- **1785** : Charles Coulomb établit la loi de l'électrostatique.
- **1800** : Alessandro Volta invente la pile voltaïque, ouvrant l'ère de l'électrochimie.
- **1887** : Heinrich Hertz découvre l'effet photoélectrique.
- **1905** : Einstein est le premier à proposer une explication à l'effet photoélectrique en utilisant le concept de photon, et celle du quantum d'énergie initialement introduits par Max Planck en 1900. Cette explication lui valut le prix Nobel de physique en 1921.

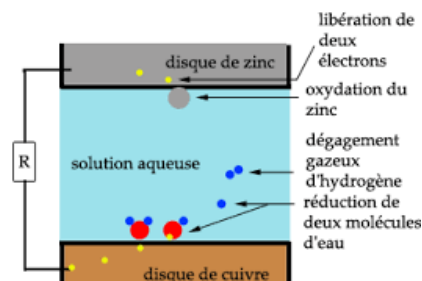


Figure I.1. Pile à colonne de Volta, ou pile voltaïque

2.2. Fondation du génie électrique : XIXe siècle

Electromagnétisme et électrodynamique

- **1820** : Ørsted découvre l'effet du courant sur une aiguille aimantée.
- **1820 - 1827** : Ampère formalise les lois de l'électrodynamique.
- **1831** : Faraday découvre l'induction électromagnétique
- **1834** : Peltier découvre l'effet thermoélectrique inverse.
- **1845** : Faraday découvre l'effet de rotation du plan de polarisation.
- **1856** : Kirchhoff établit ses lois sur les circuits.
- **1865** : Maxwell publie ses équations unifiant électricité et magnétisme.

Machines électriques

- **1832** : Pixii construit la première machine à courant continu.
- **1867** : Siemens améliore la dynamo avec auto excitation.
- **1869** : Gramme invente la dynamo industrielle.
- **1888** : Tesla invente le moteur à induction à courant alternatif.
- **1891** : Dobrovolsky développe le système triphasé.

Production et distribution

- **1882** : Edison inaugure la première centrale électrique à courant continu.
- **1895** : Tesla et Westinghouse construisent la centrale hydroélectrique de Niagara Falls.
- **1893** : Heaviside simplifie les équations de Maxwell et introduit les lignes de transmission.



Figure I.2. Maquette du premier moteur à induction de Nikola Tesla (Musée Tesla de Belgrade, Serbie)

2.3. Naissance de l'électronique et des télécommunications : 1900s-1950s

Electronique

- **1897** : Thomson découvre l'électron.
- **1925** : Invention du haut-parleur électrodynamique.
- **1930s-1940s** : Développement des tubes électroniques, oscillateurs, amplificateurs.



Figure I.3. Différents types de tubes électroniques

Télécommunications

- **1876** : Bell invente le téléphone.
- **1895** : Marconi réalise la première transmission radio.
- **1904** : Fleming invente la diode à vide.
- **1906** : De Forest invente la triode.
- **1933** : Armstrong invente la modulation de fréquence (FM).
- **1948** : Shannon publie la théorie de l'information.

2.4. Semi-conducteurs, microprocesseurs et automatisation : 1950s-2000s

Semi-conducteurs

- **1947** : John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley inventent le premier transistor fonctionnel aux laboratoires Bell, découverte qui a donné naissance à l'électronique moderne et leur a valu le Prix Nobel de physique en 1956.
- **1958** : Jack Kilby invente le circuit intégré, il réalise le premier circuit intégré fonctionnel en utilisant du germanium. Il reçoit le Prix Nobel de physique en 2000 pour cette invention.
- **1959** Robert Noyce améliore le concept en utilisant du silicium et en inventant la jonction planaire, permettant une fabrication industrielle. Il est considéré comme le co-inventeur du circuit intégré et le père fondateur d'Intel, qu'il cofonde en 1968.
- **1960s-1970s** : Développement des familles TTL et CMOS.

Microprocesseurs

- **1971** : Intel lance le 4004, il est le premier microprocesseur commercialisé au monde.
- **1974** : Intel 8080.
- **1978** : Intel 8086.
- **1980s-2000s** : Processeurs RISC, multicœurs, puces neuromorphiques.

Microcontrôleurs

- **1976** : Intel 8048.
- **1980s-1990s** : PIC, AVR, 8051.
- **2000s-2020s** : ARM Cortex-M, STM32, MSP430.

Automatique et contrôle

- **1932** : Harry Nyquist formalise le critère de stabilité en automatique.
- **1950s** : Régulateurs PID (*Proportionnel-Intégral-Dérivé*).
- **1968** : Morley invente le PLC (*Programmable Logic Controller*) ou (Automate Programmable Industriel), une avancée majeure dans l'histoire de l'automatisation industrielle.
- **1980s-2000s** : Systèmes embarqués, commande numérique, robotique.



Figure I.4. Circuits intégrés

2.5. Technologies avancées, durables et connectées : 2000-2025

Energies renouvelables

- **1800** : William Nicholson et Sir Anthony Carlisle réalisent la première électrolyse de l'eau.
- **1839** : Sir William Grove invente la pile à combustible qui convertit l'hydrogène et l'oxygène en électricité et eau, sans combustion.
- **Fin du XIXe siècle-début XXe** : Utilisation de l'hydrogène dans les ballons dirigeables.
- **1925** : Développement des premiers onduleurs à tubes.
- **1950s-1970s** : Développement des piles à combustible pour les missions spatiales Apollo.
- **1954** : Invention de la première cellule photovoltaïque au silicium par Bell Labs.
- **1970s** : Développement accéléré des technologies solaires suite à la crise pétrolière.
- **1970s** : Premiers supercondensateurs commerciaux, utilisés pour la sauvegarde de mémoire informatique lors de coupures de courant.
- **1980** : Début de l'intégration des convertisseurs MPPT dans les systèmes photovoltaïques.
- **1980** : Premiers parcs éoliens commerciaux en Californie.
- **1990** : Onduleurs à découpage MLI pour le solaire.
- **1990s-2000s** : Développement de supercondensateurs de puissance, capables de stocker plusieurs centaines à milliers de Farads, avec des courants de charge/décharge élevés.
- **1991** : Stockage Lithium-ion commercialisé en 1991 par Sony.
- **2000** : Concept popularisé avec les smart grids et les énergies distribuées
- **Fin du XIXe siècle** : Premiers moulins électriques aux États-Unis éolien.
- **XXIe siècle** : Les piles à combustible sont au cœur des stratégies de décarbonation dans les transports, l'industrie et le bâtiment.

Réseaux intelligents (Smart Grids)

- **2000s** : Développement de capteurs IoT intégrés dans les réseaux, compteurs intelligents.
- **2008** : Intégration des véhicules électriques, lancement de la Tesla Roadster.
- **2010** : Développement de la recharge bidirectionnelle (V2G).

Internet des objets (IoT)

- **1999** : Internet of Things, terme introduit en 1999 par Kevin Ashton au MIT.
- **2004** : ZigBee, protocole de communication sans fil, permet de connecter des objets intelligents dans un réseau domotique, domestique ou professionnel.

- **2006** : Cloud computing (popularisé avec Amazon Web Services) fourniture à la demande, via Internet, de ressources informatiques telles que serveurs, stockage, logiciels et analyses.
- **2009** : LoRa, technologie de communication sans fil basée sur le protocole LoRaWAN, conçue pour des réseaux IoT de longue portée et à faible consommation d'énergie.
- **2016** : NB-IoT, (Narrowband Internet of things), aussi appelé LTE-M2 est un protocole de communication radio, offre une connectivité à longue portée dédié aux réseaux étendus à faible consommation même dans des zones difficiles d'accès, permet une grande autonomie de batterie et une efficacité accrue pour un grand nombre d'appareils.

Microélectronique et nanotechnologies

- **2018** : CMOS avancé, évolution des technologies de circuits intégrés à base de semi-conducteurs (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), permet de créer des puces plus performantes et de réduire la consommation d'énergie.
- **2011** : FinFET (*Fin Field-Effect Transistor*), inventé en 1999 à l'Université de Berkeley, commercialisé par Intel en 2011, est un type de transistor « 3D », base de la fabrication moderne de dispositifs semi-conducteurs nanoélectroniques.
- **1980** : MEMS (*Micro-Electro-Mechanical-Systems*).
- **1980** : Photonique intégrée, déploiement industriel depuis les années 2010 (ex. communications optiques).
- **1988** : Spintronique¹, utilisée dans de nombreux dispositifs numériques comme les mémoires MRAM dans les ordinateurs depuis les années 2000.
- **1990** : Circuits quantiques, premiers qubits² dans les années 1990.
- **2010** : Processeurs quantiques expérimentaux.

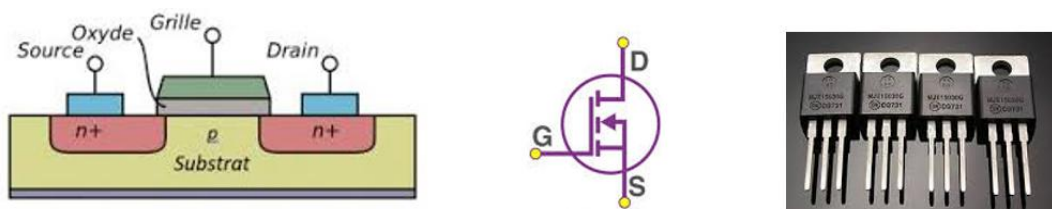


Figure I.5. Transistor MOS (Métal-Oxyde-Semi-conducteur)

3. Electrotechnique

3.1. Généralités

- **Définition**

L'électrotechnique est une branche de la physique appliquée et de l'ingénierie qui étudie les technologies liées à la production, la conversion, le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique. Elle regroupe l'ensemble des techniques et des connaissances permettant de concevoir, d'analyser et de mettre en œuvre des systèmes électriques, qu'ils soient industriels, domestiques ou institutionnels.

¹ Association entre électronique et magnétisme, elle utilise le spin (moment magnétique) des électrons pour les manipuler dans les circuits.

² Bit quantique, unité fondamentale de l'information dans l'informatique quantique, analogue au bit classique, un qubit peut exister dans une superposition des deux états binaires, c.à.d. à la fois 0 et 1.

- **Historique**

L'électrotechnique s'est développée au XIXe siècle avec les travaux de pionniers comme Michael Faraday, Nikola Tesla, et Thomas Edison. A cette époque, l'électrification des villes et des industries marque son essor.

Elle traite des technologies électriques associées aux courants forts, par opposition à celles traitant plutôt des courants faibles et des composants semi-conducteurs qui relèvent de l'électronique.

- **Applications**

- Machines électriques : Moteurs, générateurs, transformateurs ;
- Installations électriques : Bâtiments, domotique, éclairage ;
- Sécurité et appareillage électrique ;
- Conversion de l'énergie : Electromécanique, électrothermique, électrochimique ;
- Energies renouvelables : Solaire photovoltaïque, solaire thermique, éoliens ;
- Commande et entraînements électriques : Automatismes, variateurs de vitesse ;
- Smart-Grids : Réseaux électriques intelligents ;
- Transport de l'énergie électrique : Réseaux BT, MT, HT, THT ;
- Automatisation et robotique ;
- Mobilité électrique : Véhicules électriques, transports ferroviaires).

- **Avancées récentes**

- Efficacité énergétique ; Intégration de capteurs IoT dans les équipements de moteurs, transformateurs et disjoncteurs ;
- Mobilité électrique et infrastructures de recharge (déploiement de stations de recharge rapide avec gestion intelligente de la charge, Intégration de systèmes V2G (Vehicle-to-Grid) ;
- Electrification rurale et solaire PV : Déploiement de micro-réseaux autonomes dans les zones isolées, utilisation de convertisseurs hybrides pour coupler solaire PV, batteries et groupes électrogènes.

- **Perspectives**

- Convertisseurs compacts et performants grâce aux semi-conducteurs SiC et GaN³ ;
- IA intégrée aux systèmes électriques pour la maintenance prédictive, la commande des machines et les réseaux intelligents) ;
- Réseaux HVDC⁴ pour un transport d'énergie longue distance avec faibles pertes ;
- Stockage innovant : supercondensateurs, batteries Lithium-Soufre) ;
- Matériaux nanostructurés pour transformateurs et composants magnétiques) ;
- Intégration massive des énergies renouvelables dans les réseaux électriques ;
- Conception de dispositifs visant à réduire l'empreinte carbone et améliorer l'efficacité énergétique.

³ Semi-conducteurs qui remplacent le silicium pour des performances supérieures dans l'électronique de puissance, le SiC (Silicium (Si) et de Carbone (C)) est privilégié pour les applications de haute puissance et haute tension, tandis que le GaN (Gallium (Ga) et d'Azote (N)) est idéal pour les applications haute fréquence et basse puissance.

⁴ High Voltage Direct Current: Technologie éprouvée de transmission de l'énergie électrique en courant continu à haute tension, permet de transporter de grandes quantités d'énergie sur de longues distances avec des pertes minimales et est utilisé pour interconnecter des réseaux électriques et stabiliser les réseaux AC.



Figure I.6. Surveillance dans un système industriel

3.2. Courant et tension continus

- **Définition**

Le courant continu (DC)⁵ est défini comme un flux unidirectionnel de charges électriques, caractérisé par une intensité constante dans le temps. Il est généré par des sources électrochimiques (piles, batteries), des génératrices à courant continu ou des dispositifs de conversion tels que les redresseurs. La tension et le courant ne varient pas, ce qui permet une alimentation stable et précise des équipements électroniques et des systèmes embarqués.

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Lois de l'électrocinétique ; Loi d'Ohm ; Lois de Kirchhoff (Loi des mailles et loi des nœuds) ; Théorème de Thévenin ; Théorème de Norton ; Théorème de Millman, ...etc.

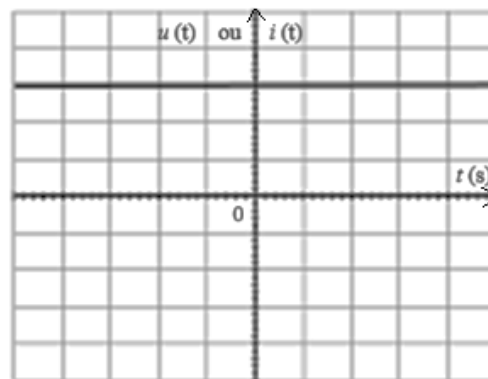


Figure I.7. Oscillogramme d'une tension ou d'un courant continu

3.3. Courant et tension monophasés

- **Définition**

Le régime monophasé est un système de distribution électrique dans lequel la tension est fournie par une seule phase alternative, généralement à une fréquence de 50 Hz. Il repose sur une tension sinusoïdale entre une phase et un neutre. Ce régime est utilisé dans les installations domestiques et les petits équipements industriels caractérisés par des puissances limitées.

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Trigonométrie ; Fonctions sinusoïdales ; Nombres complexes et représentation des tensions et courants ; vecteurs de Fresnel ; les valeurs efficaces (RMS), Calcul vectoriel ; Déphasages et calcul des puissances (active, réactive, apparente).

⁵ DC (Direct current) en anglais.

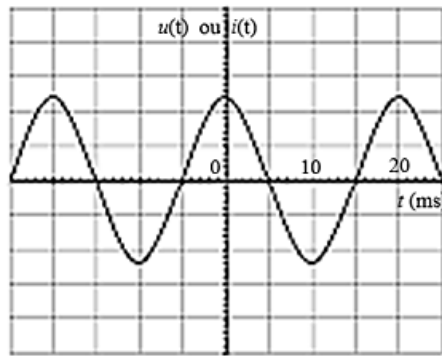


Figure I.8. Oscillogramme d'une tension ou d'un courant sinusoïdal

3.4. Courants et tensions triphasés

- **Définition**

Le régime triphasé est un système électrique composé de trois tensions sinusoïdales de même fréquence, décalées de 120° dans le temps. Il est utilisé pour le transport efficace de l'énergie électrique et l'alimentation des machines industrielles. Ce système permet une meilleure répartition des charges et une réduction des pertes par effet Joule.

Un système triphasé de tension est constitué de trois ou quatre conducteurs véhiculant les tensions sinusoïdales dites simples ou composées selon qu'elles soient mesurées respectivement entre les phases ou entre phases et neutre :

- avec 3 fils, on obtient un réseau à trois phases utilisées pour des charges équilibrées,
- avec 4 fils, le conducteur supplémentaire sert de neutre (N), permettant l'alimentation de charges déséquilibrées ou monophasées, ce conducteur garantit la présence des tensions simples en cas de déséquilibre.

Un cinquième conducteur est souvent ajouté, c'est le conducteur de terre (PE), sa fonction est alors de garantir la sécurité des personnes contre les contacts indirects⁶.

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Théorie des circuits alternatifs monophasés (pour chaque phase) ; Nombres complexes et représentation des tensions et courants ; Calcul vectoriel ; Calcul des puissances triphasées (active, réactive, apparente).

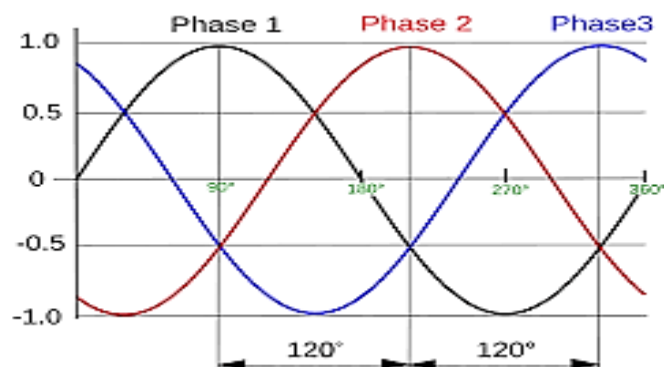


Figure I.9. Oscillogramme d'un système de tensions triphasées

⁶ Les contacts indirects en électricité désignent les situations où une personne touche une masse métallique (carcasses d'appareils, châssis, enveloppes) devenue accidentellement conductrice à la suite d'un défaut d'isolement. La protection repose sur la mise à la terre et les dispositifs différentiels pour éviter l'électrocution.

3.5. Transformateurs monophasés et triphasés

- **Définition**

Un transformateur est une machine électromagnétique statique, permettant de modifier les niveaux de tension et de courant dans un circuit alternatif, sans changer la fréquence. Il fonctionne selon le principe de l'induction mutuelle entre deux enroulements bobinés autour d'un noyau magnétique. Les transformateurs sont essentiels pour le transport et la distribution de l'énergie électrique.

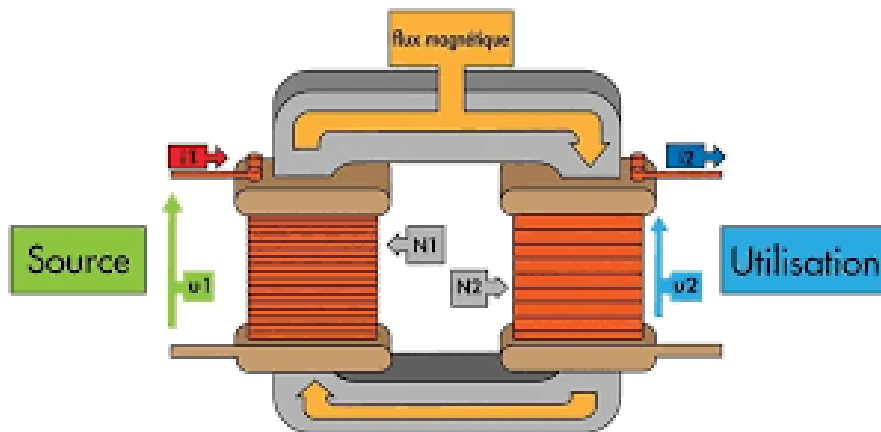


Figure I.10. Constitution d'un transformateur monophasé

- **Théories fondamentales et outils mathématique**

Lois fondamentales de l'électricité (tension, courant, puissance) ; Induction électromagnétique ; Modélisations équivalentes basés sur des impédances et des circuits électriques ; Théorie de Kapp pour les transformateurs ; Analyse des systèmes triphasés ; Analyse des charges électriques équilibrées et déséquilibrées dans les réseaux triphasés.



Figure I.11. Transformateurs triphasés à cuve

3.6. Machines à courant continu

- **Définition**

Les machines à courant continu sont des dispositifs électromécaniques qui convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique (moteur) ou inversement l'énergie mécanique en énergie électrique (générateur). Elles sont constituées d'un stator, d'un rotor, de balais et d'un collecteur. Elles permettent un contrôle précis de la vitesse et du couple, ce qui les rend utiles dans les systèmes de traction, les robots et les équipements de laboratoire. Elles ne sont presque exclusivement utilisées qu'en mode moteur dans les applications industrielles actuelles.

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Lois fondamentales de l'électricité (tension, courant, puissance); théorie de l'électromagnétisme ; loi de l'induction électromagnétique Faraday, Lenz, ...); force de Laplace ; lois fondamentales de la mécanique (couple, vitesse, puissance).

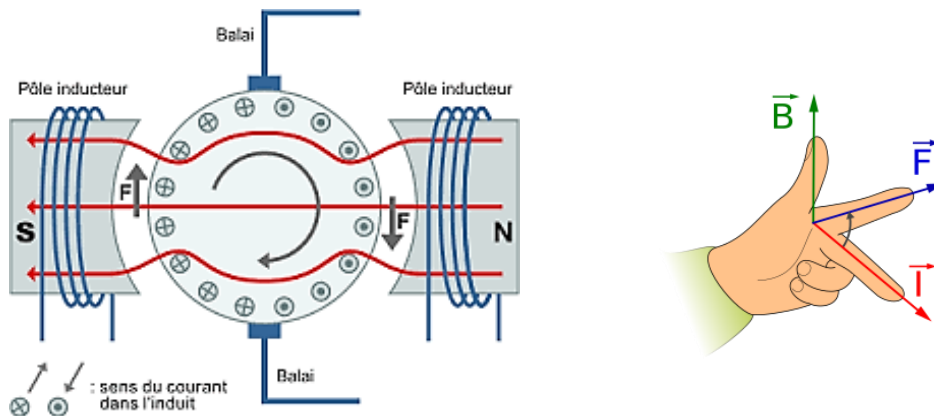


Figure I.12. Fonctionnement en générateur de la machine à courant continu

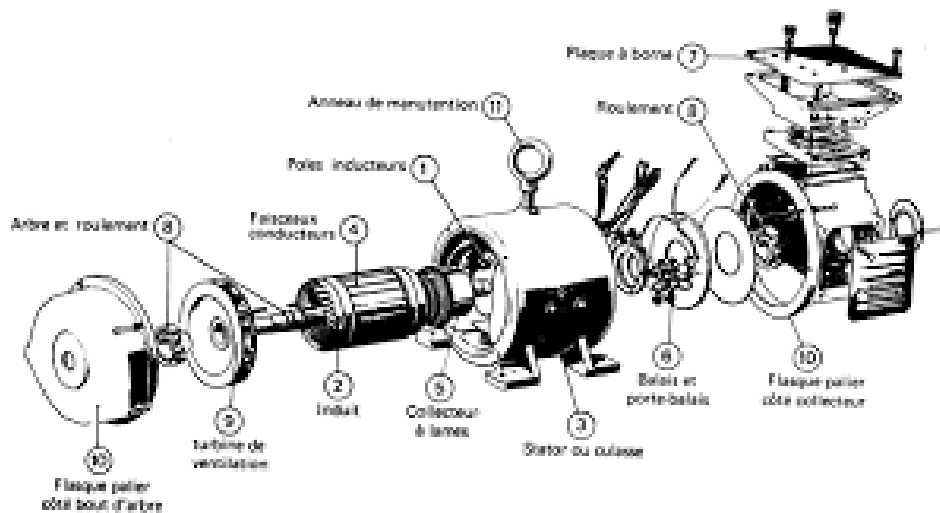


Figure I.13. Vue éclatée d'une machine à courant continu

3.7. Machines synchrones

- **Définition**

Les machines synchrones sont des machines électriques dans lesquelles le rotor tourne à la même vitesse que le champ magnétique tournant du stator. Cette vitesse dépend de la fréquence du réseau et du nombre de pôles. Elles sont principalement utilisées comme générateurs (alternateurs) dans les centrales électriques et comme moteurs dans les applications nécessitant une vitesse constante.

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Théorie du champ tournant ; Interaction entre le champ magnétique statorique et le champ magnétique rotorique créé par des aimants permanents ou un circuit d'excitation (alimenté en courant continu) ; modélisations équivalentes basées sur les théories de Behn-Eschenburg (Rotor à pôles lisses et circuit magnétique linéaire) ; de Potier (Rotor à pôles lisses et circuit magnétique saturé) et de Blondel (Rotor à pôles saillants et circuit magnétique saturé) ...etc.

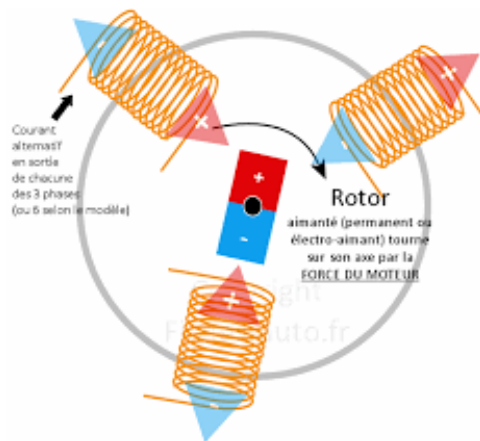


Figure I.14. Principe de fonctionnement d'une machine synchrone en mode générateur

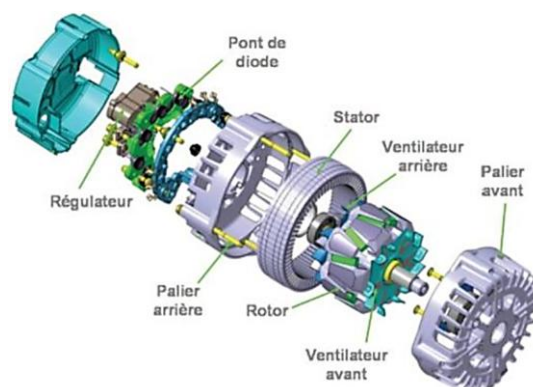


Figure I.15. Vue éclatée de l'alternateur à griffes avec aimants

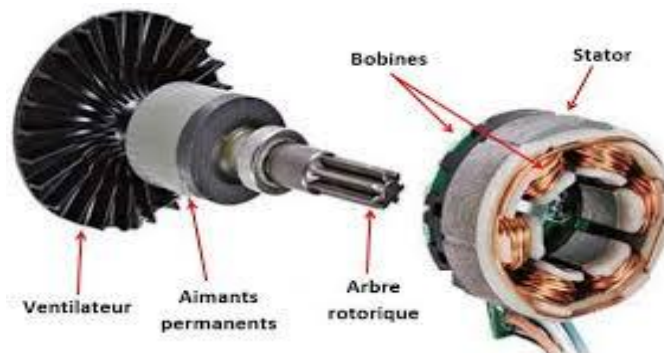


Figure I.16. Vue éclatée d'une machine synchrone à aimants permanents

3.8. Machines asynchrones

- **Définition**

La machine asynchrone, connue également sous le terme de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Le plus souvent utilisée en fonctionnement moteur, la machine asynchrone est la plus utilisée dans l'industrie en raison de sa robustesse, sa simplicité et son faible coût.

Son rotor tourne à une vitesse légèrement inférieure à celle du champ statorique produit par son enroulement statorique, ce décalage est appelé glissement. Elles sont idéales pour les applications continues comme les ventilateurs, pompes et compresseurs. Deux types de machines asynchrones existent, la machine à cage d'écureuil et à rotor bobiné (à bagues).

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Analyse du principe du champ magnétique rotatif ; relations entre puissance, couple et vitesse, et des concepts de glissement ; lois des circuits électriques pour modéliser le comportement des enroulements ; équations différentielles pour décrire la dynamique ; concept d'équivalent électrique pour simplifier l'analyse du circuit magnétique et des bobinages du rotor.

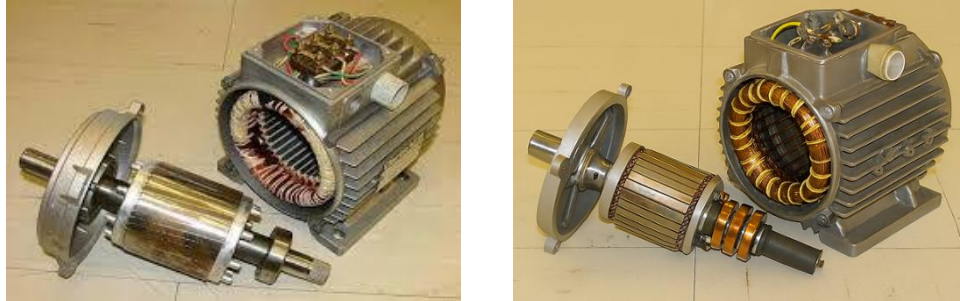


Figure I.17. Moteur asynchrone à cage d'écureuil et à rotor bobiné (à bagues)

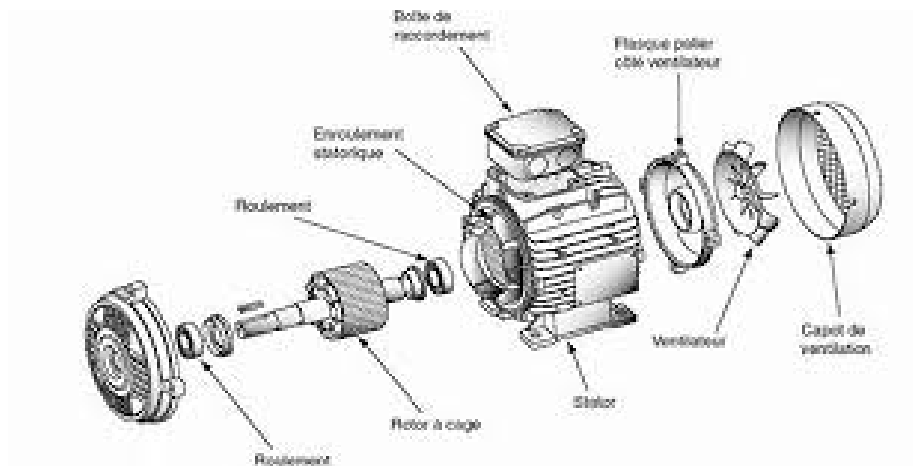


Figure I.18. Vue éclatée d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

3.9. Production de l'énergie électrique

- **Définition** : La production d'énergie électrique consiste à convertir une forme d'énergie primaire (mécanique, thermique, solaire, chimique) en énergie électrique utilisable. Cette conversion se fait principalement via des générateurs couplés à des turbines ou des dispositifs photovoltaïques.

Les principales sources sont :

- Hydraulique : énergie cinétique de l'eau → turbine → alternateur ;
- Thermique : vapeur ou gaz sous pression → turbine → alternateur ;
- Éolienne : énergie du vent → rotor → générateur ;
- Solaire photovoltaïque : conversion directe de la lumière en courant continu ;
- Solaire thermique : concentration de chaleur → fluide → turbine.

- **Caractéristiques principales**

- Diversité des sources : renouvelables et non renouvelables ;
- Rendement variable : selon la technologie ;
- Impact environnemental : à optimiser selon le mix énergétique.

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Thermodynamique ; mécanique analytique ; équations différentielles ; transformées de Laplace et de Fourier ; méthodes numériques et statistique pour modéliser et optimiser les processus énergétiques ; calcul des puissances triphasées (active, réactive, apparente) ...etc.

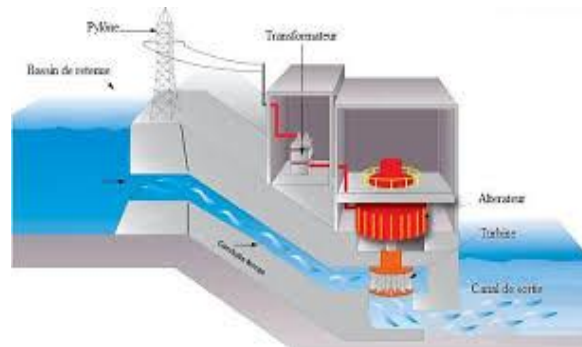


Figure I.19. Vue globale d'une centrale hydraulique

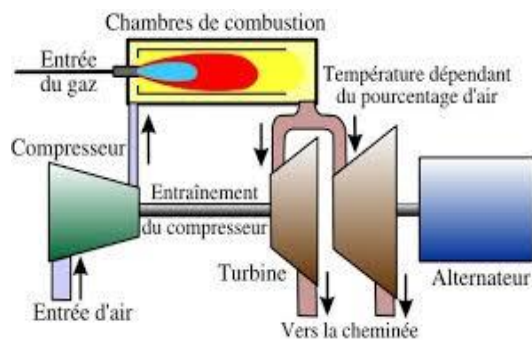


Figure I.20. Turbine à gaz pour centrale électrique



Figure I.21. Centrales solaires thermiques à concentrateur et à tour centrale



Figure I.22. Centrales solaires photovoltaïques fixes et avec suivi du soleil

3.10. Transport et distribution de l'énergie électrique

- **Définition**

Le transport et la distribution de l'énergie électrique désignent l'ensemble des infrastructures et des processus permettant d'acheminer l'électricité depuis les centrales de production jusqu'aux utilisateurs finaux. Cela inclut les lignes haute et moyenne tension, les postes de transformation, les réseaux moyenne et basse tension. Le transport se fait à très haute et/ou haute tension pour minimiser les pertes par effet Joule, tandis que la distribution adapte la tension aux besoins des consommateurs. Ce système repose sur une coordination complexe entre les producteurs, les gestionnaires de réseau et les distributeurs.

- **Caractéristiques principales**

- Lignes haute tension : pour le transport longue distance :
- Lignes moyenne tension : pour le transport à moyenne distance :
- Transformateurs : pour adapter les niveaux de tension :
- Réseaux intelligents (Smart Grids) : pour optimiser la gestion de l'énergie.

- **Classification des domaines de tension normalisés (Selon la CEI/IEC)**

La classification se fait généralement en quatre domaines principaux (TBT, MT, HT, THT).

Domaine de Tension	Courant Alternatif (AC - Valeur Efficace)	Courant Continu (DC)	Applications Typiques
Très Basse Tension (TBT)	$U \leq 50 \text{ V}$	$U \leq 120 \text{ V}$	Sécurité, circuits électroniques Systèmes alimentés par batterie
Moyenne Tension (MT)	$1 \text{ kV} < U \leq 50 \text{ kV}$	$1.5 \text{ kV} < U \leq 75 \text{ kV}$	Distribution primaire (réseaux HTA/MV) Grandes usines, parcs éoliens
Haute Tension (HTA ou HT)	$50 \text{ kV} < U \leq 100 \text{ kV}$	$75 \text{ kV} < U \leq 150 \text{ kV}$	Lignes de transport régionales
Très Haute Tension (THT ou HTB)	$U > 100 \text{ kV}$	$U > 150 \text{ kV}$	Grand transport interrégional et interconnexion (225 kV, 400 kV, 765 kV)

Pour les réseaux Basse Tension, les tensions normalisées les plus utilisées dans le monde sont :

- Europe (CEI) et autres : monophasé : 230 V (Phase-Neutre), triphasé : 400 V (entre phases) ;
- Amérique du Nord (ANSI) : monophasé/Biphasé : 120 V / 240 V ; triphasé : 208 V ou 480 V.

- **Application dans le transport (HT et THT)**

Les niveaux de Haute Tension (HT) et Très Haute Tension (THT) sont vitaux pour la production, le transport et la distribution. Plus la tension est élevée (par exemple, 225 kV, 400 kV, ou même 800 kV en DC pour le HVDC), plus les pertes par effet Joule sont réduites sur de longues distances.

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Lois fondamentales de l'électricité (tension, courant, puissance) ; Représentation et nombres complexes ; Calcul vectoriel et calcul des puissances triphasées ; Théorie des réseaux ; Analyse des circuits et des réseaux électriques (lignes, câbles, transformateurs) ; Algèbre linéaire (calcul matriciel) ; Calcul des puissances triphasées ; Méthodes d'optimisation ; Analyse de Fourier...etc



Figure 1.23. Vue générale d'un réseau électrique et de lignes de transport

3.11. Filières de l'électrotechnique

3.11.1 Electronique de puissance

- **Définition**

Branche de l'électronique désignant l'ensemble des techniques permettant de modifier la forme, la tension, le courant ou la fréquence de l'énergie électrique, principalement dans des systèmes à fortes puissances, pour l'adapter aux besoins des charges ou des systèmes à l'aide de composants électroniques de puissance (diodes, transistors, thyristors, IGBT, MOSFET) associés à des circuits de commande et de protection.

- **Historique**

L'électronique de puissance est née au début du XXe siècle avec les redresseurs à vapeur de mercure, puis a évolué grâce aux semi-conducteurs comme les diodes, thyristors, IGBT et MOSFET, jusqu'aux matériaux avancés comme le SiC et le GaN.

- Premiers convertisseurs électromécaniques 1900-1950 : Utilisation de machines rotatives pour convertir AC/DC, Redresseurs à vapeur de mercure pour la traction électrique).
- Apparition des premiers semi-conducteurs 1956-1961 : Diodes de puissance au silicium (1956), Thyristors (SCR) (1961).
- Début des convertisseurs statiques 1970-1980 : Hacheurs, onduleurs, gradateurs, Contrôle moteurs et variation de vitesse, Transistors bipolaires puissance.
- Avènement des IGBT et MOSFET 1985-2010 : IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) : commande facile, forte puissance, MOSFET de puissance (rapide, idéal pour les faibles puissances, GTO (Gate Turn-Off Thyristor), IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) : tensions > 6 kV.

- **Applications**

- Transport et mobilité : Conversion et contrôle de l'énergie pour moteurs de traction trains, métros, tramways ; Gestion des batteries ; Onduleurs pour moteurs ; Chargeurs rapides pour véhicules électriques et hybrides ;
- Industrie et automatisation : Variateurs de vitesse pour moteurs ; Redresseurs ; Onduleurs ; Convertisseurs DC/DC, DC/AC pour alimentations industrielles ;
- Energies renouvelables : Solaire photovoltaïque : convertisseurs DC/DC, onduleurs pour injection réseau ; Eolien : convertisseurs AC/DC, AC/AC et DC/AC ;

- Habitat et bâtiments intelligents : Domotique : régulation de l'éclairage, ventilation, chauffage, alimentations à découpage pour appareils électroniques ; Systèmes de secours et autoconsommation solaire à base d'onduleurs domestiques ;
- Réseaux électriques intelligents (Smart Grids) : Convertisseurs statiques (STATCOM) pour compensation de l'énergie réactive, filtres actifs et régulateurs dédiés à la qualité de l'énergie, gestion multisources.

- **Avancées récentes**

- Onduleurs multi-niveaux ;
- Convertisseurs bidirectionnels pour le stockage d'énergie et les systèmes de recharge V2G ;
- Participation active à l'exploitation des réseaux ;
- Mobilité électrique et infrastructures de recharge (Chargeurs ultra-rapides basés sur SiC/GaN, Convertisseurs embarqués) ;
- Convertisseurs avec MPPT avancé pour le solaire photovoltaïque et l'éolien ;
- Gestion intelligente du stockage de l'énergie avec intégration de batteries Li-ion, de supercondensateurs) ;
- Convertisseurs bidirectionnels, multi-niveaux, commutation douce, Intelligence artificielle embarquée et intégration dans les smart grids ;
- Modélisation multi-domaine avec intégration de la thermique, électromagnétique et commande dans les simulations ;
- IA et réseaux de neurones pour la prédiction de défaillances ;
- Optimisation des topologies et la maintenance prédictive.

- **Perspectives**

- Matériaux semiconducteurs avancés : Utilisation des SiC et GaN pour applications haute tension (>1200 Volts) ; Réduction des pertes de commutation et conduction ; Intégration dans les convertisseurs compacts et rapides ;
- Topologies de convertisseurs innovantes : convertisseurs multi-niveaux, techniques de commutation (ZVS/ZCS) ;
- Commande numérique et intelligence embarquée : DSP, FPGA, microcontrôleurs avancés pour la commande temps réel, diagnostic, maintenance prédictive, optimisation dynamique basée sur l'IA embarquée.

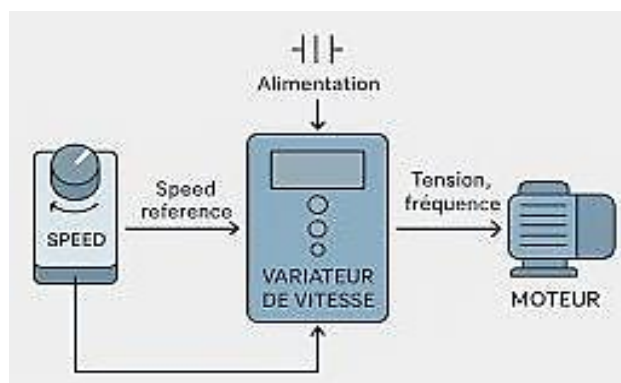


Figure I.24. Variateur de vitesse industriels

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Les principales théories fondamentales nécessaires à l'étude, l'analyse et la conception en électronique de puissance sont la théorie de la conversion statique de l'énergie ; la théorie de la commutation ; la théorie des circuits en régime haché ; la théorie de la modulation ; la théorie des filtres et de la qualité de l'énergie ; la théorie de la commande des convertisseurs ; ...etc.

Les outils mathématiques indispensables incluent essentiellement les équations différentielles ordinaires ; les transformées de Laplace et de Fourier ; l'algèbre linéaire et le calcul matriciel ; la méthode de l'état moyen (Average State Modeling) ; les transformations de Clarke et Park ; l'analyse spectrale et le filtrage numérique, les méthodes numériques, ...etc.

- **Les différents types de convertisseur**

Les convertisseurs se divisent principalement en quatre types selon la nature des conversions électriques qu'ils réalisent :

- Convertisseurs alternatif-continu (AC-DC) : appelés redresseurs. Ils transforment la tension alternative en tension continue, utilisés pour alimentation de moteurs à courant continu, la charge de batteries comme alimentation embarquée ;
- Convertisseurs continu-continu (DC-DC) : appelés hacheurs. Ils permettent de modifier la valeur d'une tension continue, avec un rendement élevé, servant notamment pour la commande de moteurs à courant continu, comme chargeurs de batterie, alimentation embarquée ou pour la régulation de tension ;
- Convertisseurs continu-alternatif (DC-AC) : ou onduleurs. Ils convertissent la tension continue en tension alternative à fréquence et amplitude désirées, utiles pour alimenter des machines AC, créer des alimentations autonomes ou sans interruption (UPS), l'injection réseau-PV ;
- Convertisseurs alternatif-alternatif (AC-AC) : ils modifient la tension alternative sans la transformer en continu, et sont utilisés pour réaliser des variateurs de vitesse, des transformateurs électroniques ou des régulateurs de puissance. Ils incluent les gradateurs (qui varient la tension en gardant la fréquence constante), et les cyclo-convertisseurs (qui changent à la fois fréquence et amplitude) ;
- Convertisseurs bidirectionnels : ils permettent le flux d'énergie dans les deux sens et sont utilisés pour le stockage de l'énergie, le V2G ou les systèmes hybrides. On trouve ainsi les convertisseurs DC/DC bidirectionnel (batteries, supercondensateurs), DC/AC bidirectionnel (onduleurs interactifs réseau) et AC/AC bidirectionnel (régulation dynamique dans les réseaux).

3.11.2 Energies renouvelables

- **Définition**

Les énergies renouvelables sont des formes d'énergie issues de sources naturelles qui se renouvellent en permanence ou à l'échelle humaine, et qui peuvent être exploitées sans compromettre leur disponibilité future, contrairement aux énergies fossiles qui s'épuisent avec le temps. Elles sont généralement propres, durables et faiblement émettrices de gaz à effet de serre. Principales énergies : Solaire, éolienne, hydroélectrique, géothermique, biomasse.

- **Historique**

Remonte à l'Antiquité, mais leur développement moderne est lié aux chocs pétroliers des années 1970 et aux préoccupations croissantes liées au changement climatique depuis les années 1990.

- **Applications**

- Centrales solaires, Parcs éoliens, Production d'hydrogène vert par électrolyse alimentée par des sources renouvelables ;
- Utilisation de l'hydrogène vert comme carburant propre pour l'industrie, les transports et le stockage d'énergie ; Energie houlomotrice (vagues) ;
- Valorisation des déchets et biomasse (transformation des déchets organiques en biogaz ou chaleur) ; chauffage géothermique.

- **Avancées récentes**

- Intégration de la conversion photovoltaïque dans les matériaux de construction ;
- Cellules photovoltaïques à haut rendement ; Panneaux bifaciaux ; Tuiles solaires intégrées ;
- Panneaux transparents ;
- Optimisation de la production des turbines éoliennes à axe vertical pour zones urbaines ou faibles vents ; Valorisation des déchets agricoles et urbains par pyrolyse⁷ ou gazéification⁸ ;
- Eoliennes flottantes.

- **Perspectives**

- Cellules solaire photovoltaïque de nouvelle génération (cellules à structure perovskite⁹ : rendement supérieur, même par faible ensoleillement) ;
- Nouvelles frontières technologiques pour l'éolien offshore flottant ;
- Intégration des capteurs embarqués et de IA (optimisation de l'orientation des pales et de la production en temps réel) ;
- Digesteurs intelligents avec capteurs IoT pour optimiser la fermentation des systèmes à base de biomasse.



Figure I.25. Exemples d'énergies renouvelables (Energies Solaire, éolienne et hydraulique)

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Les principales théories fondamentales nécessaires à l'étude, l'analyse et la conception en électronique de puissance sont la théorie de la conversion statique de l'énergie ; la théorie de la commutation ; la théorie des circuits en régime haché ; la théorie de la modulation ; la théorie des filtres et de la qualité de l'énergie ; la théorie de la commande des convertisseurs, ...etc.

⁷ Décomposition chimique de la matière organique par la chaleur, en l'absence d'oxygène, pour produire des sous-produits comme des gaz, des huiles, des solides carbonés, des plastiques, des pneus, ...

⁸ Procédé thermochimique qui transforme une matière carbonée solide (comme la biomasse ou le charbon) en un gaz combustible appelé gaz de synthèse (ou syngas), contenant principalement de l'hydrogène et du monoxyde de carbone.

⁹ Technologie photovoltaïque utilisant des matériaux à structure de pérovskite (réseau cristallin cubique de formule générale ABX_3 ou ABO_3) comme couche active pour convertir la lumière du soleil en électricité, se distinguent par leur potentiel de rendement élevé, leur transparence et un coût de production plus bas que les panneaux solaires traditionnels au silicium.

Les outils mathématiques indispensables incluent essentiellement les équations différentielles ordinaires ; les transformées de Laplace et de Fourier ; l'algèbre linéaire et le calcul matriciel ; la méthode de l'état moyen (Average State Modeling) ; les transformations de Clarke et Park ; l'analyse spectrale et filtrage numérique ; les méthodes numériques, ...etc.

3.11.3 Autres filières de l'électrotechnique

- **Construction machines** : Conception, dimensionnement, fabrication optimisation des moteurs, générateurs et transformateurs destinés à la conversion et à l'utilisation de l'énergie électrique.
- **Commandes électriques** : Automatisation et contrôle des systèmes électrotechniques, incluant la régulation des machines et des procédés industriels.
- **Électrotechnique industrielle** : Application des systèmes électriques dans les environnements industriels, intégrant maintenance, optimisation et sécurité.
- **Appareillage électrique** : Conception, fabrication maintenance des dispositifs de protection, de commande et de coupure des circuits électriques afin d'assurer la sécurité et la fiabilité des installations.
- **Haute tension et maîtrise des risques** : Étude des phénomènes liés aux hautes tensions et gestion des risques industriels et environnementaux.

4. Electronique

4.1. Généralités

- **Définition**

L'électronique est la branche de la physique appliquée et de l'ingénierie qui étudie et exploite le comportement des électrons dans les matériaux conducteurs, semi-conducteurs ou isolants, afin de concevoir des systèmes capables de traiter, transmettre, stocker ou contrôler l'information et l'énergie.

- **Historique**

L'électronique est née à la fin du XIX^e siècle avec la découverte de l'électron par J.J. Thomson en 1897 et l'apparition des premières lampes à vide. Dans les années 1920 à 1940, elle s'est développée grâce à la radio, au radar et aux amplificateurs à tubes électroniques.

En 1947, l'invention du transistor a marqué une révolution permettant la miniaturisation des circuits. Durant les années 60 à 80, les circuits intégrés et les microprocesseurs ont ouvert l'ère de l'informatique moderne.

Au XXI^e siècle, l'électronique est devenue omniprésente dans les télécommunications, l'énergie, la santé, l'automobile et l'Internet des objets... etc.

- **Applications**

L'électronique commerciale vise le confort et la connectivité pour le grand public, tandis que l'électronique industrielle est tournée vers la productivité et l'automatisation.

-  **Applications commerciales**

- Électronique grand public (Smartphones, ordinateurs, téléviseurs, appareils audio/vidéo, électroménagers intelligents) ;

- Électronique médicale et biomédicale (ECG¹⁰, IRM¹¹, scanners¹²), prothèses électroniques, dispositifs connectés de santé ;
- Électronique des télécommunications (Réseaux mobiles, Internet, satellites, équipements de transmission et réception) ;
- Électronique bancaire et commerciale (Terminaux de paiement, cartes à puce, systèmes de sécurité et d'authentification) ;
- Électronique de sécurité (Alarmes, systèmes de vidéosurveillance, contrôle d'accès biométrique) ;
- Électronique domotique et IoT (Maisons intelligentes, capteurs connectés, gestion énergétique et confort domestique), ... etc.

Applications industrielles

- Instrumentation et mesure (Capteurs de température, pression et systèmes de monitoring) ;
- Contrôle des procédés (Utilisation de capteurs, automates programmables (PLC) et systèmes de supervision pour piloter les chaînes de production) ;
- Robotique industrielle (Systèmes embarqués, cartes de commande et capteurs) ;
- Electronique embarquée (Véhicules automobiles, ferroviaires, aéronautiques pour la gestion moteur, la sécurité (ABS, airbags), la navigation, l'avionique et le contrôle de vol) ; Maintenance prédictive (Utilisation de capteurs et d'algorithmes pour anticiper les pannes et optimiser la durée de vie des équipements) ...etc.

• Avancées récentes

Ces dernières années, l'électronique a connu des avancées majeures avec la miniaturisation des composants grâce aux nanotechnologies, permettant des circuits toujours plus puissants et compacts. Elle s'est enrichie par le développement de l'électronique flexible et imprimée, ouvrant la voie aux écrans pliables et aux textiles intelligents. Les progrès en microélectronique ont permis l'émergence de processeurs ultra-rapides et de puces spécialisées pour l'intelligence artificielle. Enfin, l'essor de IoT et de l'électronique embarquée a rendu possible une connectivité omniprésente dans l'industrie, la santé et le quotidien.

Perspectives

L'électronique du futur s'orientera vers une miniaturisation encore plus poussée, grâce aux nanotechnologies et aux matériaux avancés. L'électronique évoluera vers des technologies sub-nanométriques, avec des transistors FinFET¹³ et GAAFET¹⁴) permettant des densités de circuits et des vitesses de commutation inédites.

¹⁰ Électrocardiogramme : Examen médical non invasif qui enregistre l'activité électrique du cœur au moyen d'électrodes placées sur la peau.

¹¹ Imagerie par Résonance Magnétique : Technique d'imagerie médicale non invasive qui permet de visualiser avec une grande précision les tissus mous du corps humain, sans utiliser de rayons X.

¹² Scanner médical (ou CT scan) : Technique d'imagerie médicale qui utilise des rayons X associés à un traitement informatique pour obtenir des images détaillées de l'intérieur du corps.

¹³ Fin Field-Effect Transistor : Architecture avancée de transistor à effet de champ, dont le canal est en forme d'ailette verticale (Fin), utilisée pour dépasser les limites des transistors planaires classiques.

¹⁴ Gate-All-Around Field-Effect Transistor : Nouvelle architecture de transistor où la grille entoure complètement le canal conducteur, il représente l'évolution des FinFET et constitue la technologie clé des procédés de fabrication sub-5 nm.

Les circuits flexibles et organiques basés sur des semi-conducteurs imprimés et des matériaux 2D (graphène, MoS₂) ouvriront la voie à des dispositifs transparents, portables et intégrés dans les textiles intelligents. Les architectures neuromorphiques et quantiques transformeront le traitement de l'information, en imitant les réseaux neuronaux biologiques ou en exploitant la superposition et l'intrication pour des calculs massivement parallèles.

Enfin, l'essor de l'IoT et de l'intelligence artificielle embarquée favorisera des systèmes autonomes, connectés et énergétiquement optimisés, capables de fonctionner en edge computing¹⁵ avec une faible consommation et une haute fiabilité.

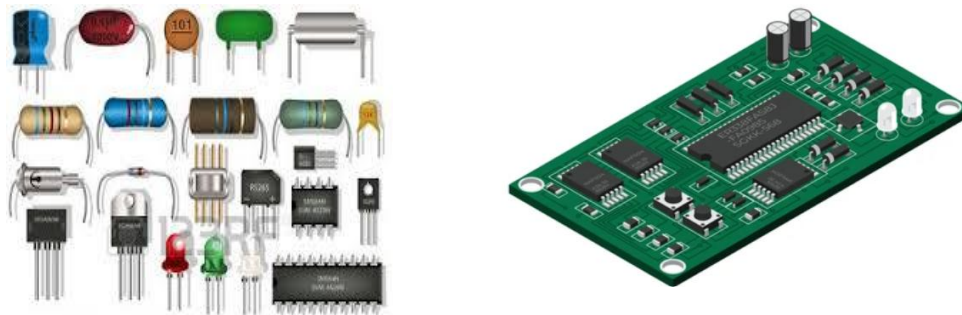


Figure I.26. Composants électroniques et circuit imprimé d'une carte électronique

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Les théories fondamentales indispensables à l'étude, l'analyse et la conception en électronique sont principalement les lois de Kirchhoff ; la loi d'Ohm ; les théorèmes de Thévenin et de Norton ; la théorie des semi-conducteurs (conduction, jonctions PN, transistors bipolaires et MOSFET) ; la théorie des signaux et systèmes (analyse temporelle et fréquentielle des signaux analogiques et numériques) ; la théorie de la conversion et du filtrage (redressement, amplification, modulation et filtrage des signaux) ; la théorie de la commande et de la régulation (systèmes linéaires, stabilité et rétroaction).

Les outils mathématiques nécessaires sont essentiellement les équations différentielles ordinaires ; les transformées de Laplace et de Fourier ; l'algèbre linéaire et le calcul matriciel ; les probabilités et statistiques ; l'analyse spectrale et filtrage numérique ; les méthodes numériques.

4.2. Electronique analogique et électronique numérique

Il existe deux branches de l'électronique : l'électronique analogique et l'électronique numérique. L'électronique analogique traite des signaux continus prenant une infinité de valeurs. Par exemple, la tension variant de manière progressive, comme une onde sinusoïdale. Elle est utilisée dans les applications d'audio, d'instrumentation et la radio analogique...etc. Les amplificateurs, filtres RC, oscillateurs sont des circuits analogiques typiques.

L'électronique numérique manipule des signaux discrets, généralement binaires (0 et 1). Par exemple, une tension qui ne prend que deux niveaux (0 V et 5 V). Elle est utilisée dans le domaine des ordinateurs, des microcontrôleurs, en télécommunications numériques ou dans les applications de l'IoT. Les portes logiques, les compteurs et registres, les mémoires et les microprocesseurs sont des circuits numériques typiques.

¹⁵ Approche consistant à traiter les données directement à la périphérie du réseau, au plus près de leur source (capteurs, objets connectés, terminaux), plutôt que de les envoyer vers des centres de données distants.

4.3. Matériaux semiconducteurs

Les matériaux semiconducteurs sont des matériaux dont la conductivité électrique se situe entre celle d'un conducteur et d'un isolant et peut être modulée par le dopage, la température ou la lumière pour contrôler le flux de courant, ce qui les rend essentiels dans les composants électroniques comme les diodes et les transistors.

Les matériaux typiques sont le Silicium (Si), le plus utilisé, abondant et stable, le Germanium (Ge), premier utilisé historiquement, sensible à la température, l'Arséniure de gallium (GaAs), utilisé en HF et optoélectronique, le Carbure de silicium (SiC), très utilisé en électronique de puissance, le Nitrure de gallium (GaN), employé dans les LED bleues et blanches.

Les deux types de dopage sont :

- Dopage type N : dopé avec des éléments donneurs (ex. Phosphore) → excès d'électrons.
- Dopage type P : dopé avec des éléments accepteurs (ex. bore) → création de trous.

Les propriétés que l'on retrouve dans les semiconducteurs sont effet de seuil (tension minimale pour conduire), l'effet photoélectrique (génération de courant sous lumière) et l'effet Hall (mesure de champ magnétique).

4.4. La diode à jonction

La diode à jonction est un composant électronique semiconducteur constitué de deux zones dopées : une zone P (positive) et une zone N (négative), formant une jonction PN. Elle permet le passage du courant dans un seul sens (polarisation directe) et bloque dans l'autre (polarisation inverse). Son fonctionnement repose sur le phénomène de la barrière de potentiel et la recombinaison des porteurs de charge.

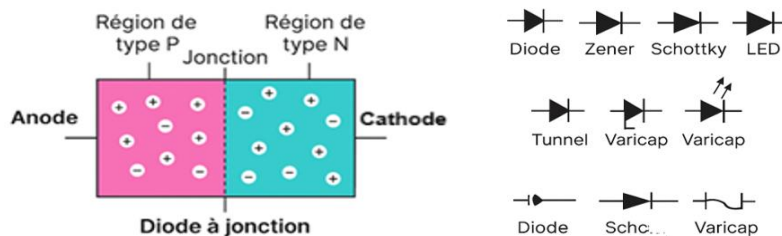


Figure I.27. Diode à jonction (Symbole et caractéristique) et différents types de diodes

Les applications sont nombreuses : redressement de courant, protection contre les surtensions, détection, commutation.

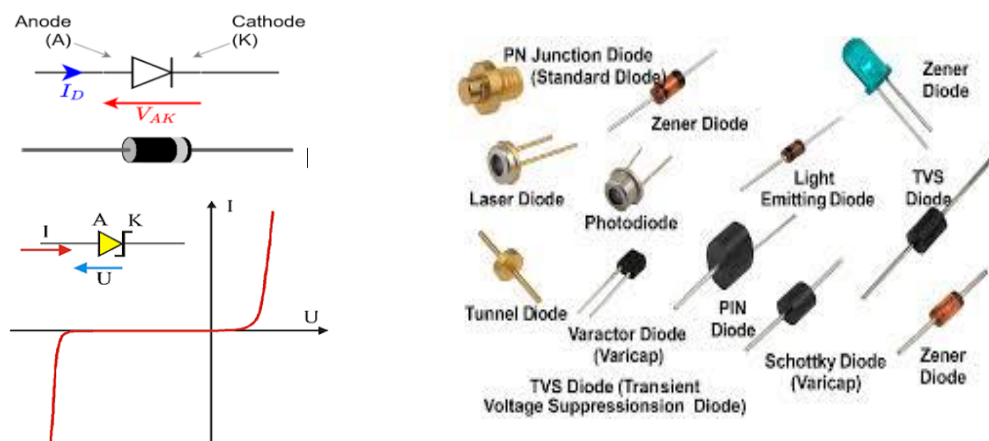


Figure I.28. Diode à jonction (Symbole et caractéristique) et différents types

Il existe d'autres types de diodes spécialisées : la diode Zener (régulation de tension en polarisation inverse), la diode Schottky (temps de commutation rapide, faible chute de tension), la diode LED (émission de lumière), la diode tunnel (effet tunnel, utilisée en hyperfréquence), et la diode varicap (diode à capacité variable pour les circuits accordés).

4.5. Transistor bipolaire

Le transistor bipolaire (ou BJT) est un composant électronique à trois couches de semi-conducteurs, formant deux jonctions PN et possédant trois bornes de connexion : l'Emetteur, la Base et le Collecteur. Il existe deux types complémentaires : NPN et PNP, selon l'ordre des couches.

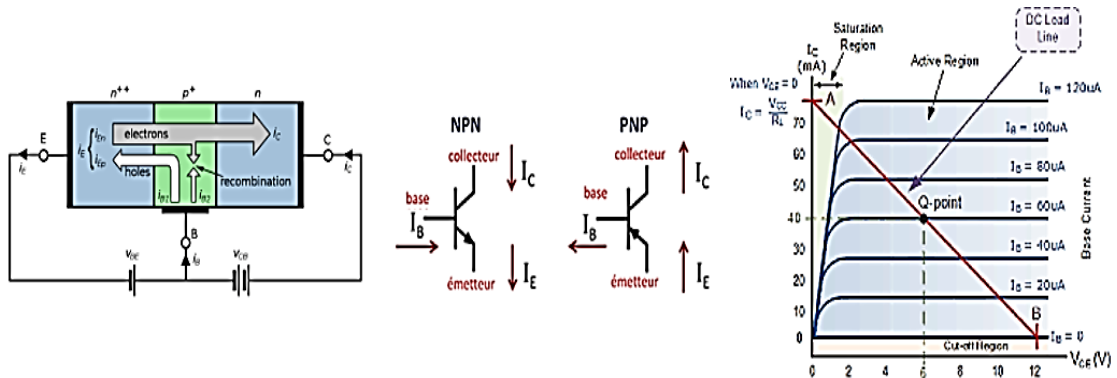


Figure 1.29. Transistor bipolaire (Effet transistor, symboles, différents types de boîtier)

Son fonctionnement repose sur l'effet transistor : un faible courant injecté dans la Base contrôle un courant beaucoup plus élevé entre le Collecteur et l'Emetteur. Ce phénomène permet le fonctionnement en amplification ou en commutation. En polarisation active, la jonction base-émetteur est directe, et base-collecteur inverse.

En pratique, l'émetteur injecte des porteurs majoritaires (électrons pour NPN, trous pour PNP) dans la base. La base étant très fine et faiblement dopée, la majorité des porteurs traverse vers le collecteur. Ainsi, une petite variation du courant de base entraîne une grande variation du courant collecteur : c'est l'amplification.

En polarisation directe (jonction base-émetteur), la barrière de potentiel est franchie, permettant l'injection des porteurs. Tandis qu'en polarisation inverse (jonction base-collecteur), le collecteur aspire les porteurs, assurant la conduction.

Les transistors bipolaires sont utilisés dans les amplificateurs, les oscillateurs, les régulateurs et les circuits logiques. Le choix entre NPN et PNP dépend du sens de polarisation et du type de circuit. Ils se distinguent des transistors à effet de champ (FET) par leur commande en courant et non en tension.

4.6. Transistor FET et MOSFET

Un transistor à effet de champ¹⁶ (TEC) est un composant électronique qui utilise un champ électrique pour contrôler la conductivité d'un canal reliant deux électrodes. Il se distingue du transistor bipolaire en ce qu'il fonctionne grâce aux porteurs majoritaires (électrons ou trous), ce qui lui confère une consommation de puissance réduite et une grande impédance d'entrée. Il existe deux types de transistors FET, le premier à canal N et le second à canal P.

¹⁶ En anglais : Field Effect Transistor (FET)

Il possède trois électrodes, la Source (S), point d'entrée des porteurs, le Drain (D) point de sortie des porteurs et la Grille (G), électrode de commande qui applique un champ électrique pour moduler la conductivité du canal.

La tension appliquée sur la Grille crée un champ électrique qui contrôle la largeur et la conductivité du canal entre la Source et le Drain. Ainsi, le courant Drain-Source est modulé par la tension appliquée entre grille-source.

Le transistor FET est un transistor commandé en tension, à haute impédance d'entrée ($M\Omega$), ce qui signifie qu'ils consomment très peu de courant d'entrée ainsi qu'une très faible puissance, la Grille ne consommant pratiquement pas de courant.

Ils sont utilisés en mode commutation, dans les applications de puissance, en entrée des circuits logiques et comme amplificateurs. Ils peuvent être sensibles à l'électricité statique et endommagés par des tensions trop élevées.

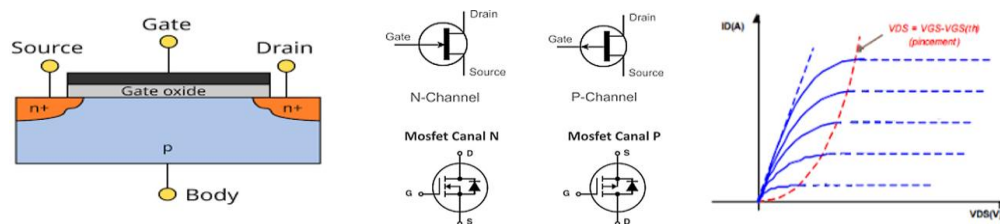


Figure I.30. Transistor FET, symboles, caractéristiques courant / Tension)

Deux familles de transistor FET sont commercialisées : le JFET (Junction FET) qui utilise une jonction PN pour contrôler le canal et le MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor FET), le plus répandu, avec une grille isolée du canal par une fine couche d'oxyde de silicium. Le transistor MOSFET, souvent appelé transistor MOS, est la catégorie de FET la plus utilisée et constitue la base des circuits intégrés actuels.

Deux types de transistor MOSFET complémentaires existent également, le MOSFET à canal N (NMOS) et le MOSFET à canal P (PMOS). Enfin, pour créer des composants et des circuits intégrés à faible consommation d'énergie, tels que les circuits logiques, les processeurs et les puces mémoire, la technique de fabrication CMOS¹⁷ (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) qui met en œuvre la combinaison NMOS et PMOS est aujourd'hui quasiment toujours utilisée.

4.7. Les principales fonctions de l'électronique

Amplification

Augmenter l'amplitude d'un signal électrique (courant ou tension).

Exemple : transistors utilisés en mode amplificateur, amplificateurs opérationnels.

Applications : Audio, instrumentation, télécommunications.

Commutation et logique

Contrôler le passage ou non d'un signal (portes logiques, interrupteurs électroniques).

Applications : Circuits numériques, microprocesseurs, automatisation.

Génération / Oscillation

Produire des signaux périodiques (sinusoïdaux, carrés, triangulaires).

Réalisée par des oscillateurs RC, LC, à quartz.

Applications : Horloges numériques, radios, systèmes de synchronisation.

¹⁷ Semi-conducteur à oxyde métallique complémentaire

Conversion

Transformer un type de signal en un autre :

Analogique → Numérique (CAN) ou Numérique → Analogique (CNA)

Applications : Electronique embarquée, alimentation, traitement numérique.

Modulation / Démodulation

Modifier un signal porteur pour transmettre de l'information (AM, FM, QAM).

La démodulation permet de récupérer l'information transmise.

Applications : Radio, télévision, téléphonie mobile.

Traitement et Filtrage des signaux

Sélectionner ou supprimer certaines fréquences (filtres passe-bas, passe-haut, passe-bande).

Applications : Audio, capteurs biomédicaux, communications.

4.8. Filières de l'électronique

4.8.1 Electronique embarquée et systèmes temps réel

- **Définition**

L'électronique embarquée (Embedded-Electronics) désigne l'ensemble des systèmes électroniques intégrés dans des équipements pour assurer des fonctions spécifiques de traitement, de commande, de communication ou de surveillance. Un système embarqué est un système électronique autonome, basé sur un microprocesseur¹⁸, le plus souvent un microcontrôleur¹⁹ ou une carte FPGA²⁰, conçu pour réaliser une tâche précise dans un environnement matériel donné.

Contrairement aux ordinateurs généraux, il est optimisé pour une fonction dédiée, avec des contraintes de taille, de consommation, de fiabilité et de réactivité.

- **Historique**

L'électronique embarquée et les systèmes temps réel sont apparus dans les années 1960 pour répondre au besoin de contrôler des procédés physiques avec des contraintes temporelles strictes, notamment dans les secteurs militaire et aérospatial. L'électronique embarquée trouve son origine avec le développement de l'*Apollo Guidance Computer*, premier système de pilotage embarqué utilisé pour les missions spatiales.

L'arrivée des microprocesseurs a permis la miniaturisation et l'intégration de ces systèmes dans divers objets et a permis à l'électronique embarquée de connaître une large diffusion dans l'automobile, l'aéronautique, l'industrie et les objets connectés. Le smartphone de 2007 illustre bien cette évolution, combinant capteurs, microprocesseurs et interfaces utilisateur. Aujourd'hui, ces systèmes sont omniprésents dans les domaines technologiques et industriels. Les systèmes temps réel se distinguent par la nécessité de fournir des réponses dans des délais stricts, garantissant la prévisibilité et la stabilité des opérations.

¹⁸ Un microprocesseur est le cœur de l'ordinateur, conçu pour exécuter des instructions logiques et arithmétiques. Il fonctionne comme une unité centrale de calcul (CPU) sans périphériques intégrés. Son rôle principal est de traiter les données et gérer le système d'exploitation et les applications.

¹⁹ Un microcontrôleur est un circuit intégré regroupant processeur, mémoire et périphériques d'entrée/sortie. Il est conçu pour piloter des systèmes embarqués et réaliser des tâches spécifiques. Compact et autonome, il est utilisé dans l'automobile, l'électroménager ou les objets connectés.

²⁰ Une carte FPGA (Field Programmable Gate Array) est un circuit logique reconfigurable par l'utilisateur, elle permet de créer des architectures matérielles sur mesure, adaptées à des besoins précis. Très flexible, elle est utilisée en prototypage, télécommunications et traitement du signal.

Les premières innovations ont porté sur la gestion des priorités des tâches. Dans les années 1980-1990, les RTOS²¹ comme *VxWorks*²² et *QNX*²³ se sont généralisés dans les télécommunications, l'automobile et l'industrie.

- **Applications**

Les principales applications de l'électronique embarquée et des systèmes temps réel sont dans l'automobile pour des systèmes d'aide à la conduite ADAS²⁴, ABS²⁵, ESP²⁶, radar de recul, caméra embarquée, GPS, véhicules autonomes et la gestion motrice. En aéronautique, ils pilotent les commandes de vol, ainsi que les systèmes de navigation et de sécurité. Dans la robotique et les drones, ils permettent le contrôle en temps réel des mouvements et la perception de l'environnement. Ces systèmes sont essentiels dans le médical pour les équipements de surveillance et de diagnostic. Ils interviennent également dans l'industrie pour l'automatisation des procédés, et dans la domotique pour gérer efficacement les bâtiments intelligents. L'intelligence artificielle embarquée y ajoute des capacités de décision autonome et d'apprentissage, rendant les applications plus adaptatives et performantes.

- **Avancées récentes**

Les avancées en électronique embarquée et systèmes temps réel sont marquées par l'intégration croissante de l'IA embarquée, permettant des traitements décisionnels autonomes et en temps réel avec une consommation énergétique réduite.

Les microprocesseurs et FPGA nouvelle génération, tels que les processeurs ARM Cortex R52, offrent une puissance accrue tout en maîtrisant la consommation, ce qui est crucial pour les applications mobiles et aéronautiques. On observe aussi de fortes avancées en miniaturisation, fiabilité renforcée et cybersécurité, notamment pour les systèmes critiques comme dans l'aéronautique. Les capteurs intelligents avec connectivité IoT avancée optimisent la collecte et le traitement des données, élargissant les possibilités dans l'industrie 4.0²⁷ et la santé connectée. Par ailleurs, des plateformes de développement modulaires facilitent la conception et les tests pour accélérer l'innovation. Ces progrès soutiennent la transition vers des dispositifs toujours plus performants, sûrs et autonomes, adaptés aux exigences industrielles.

²¹ Real-Time Operating System (Systèmes d'exploitation temps réel) : logiciel de gestion des ressources d'un dispositif embarqué, conçu pour exécuter des tâches dans des délais strictement déterminés.

²² Créé en 1987 par Wind River Systems : L'un des systèmes d'exploitation temps réel les plus répandus. Multitâche temps réel, supporte plusieurs architectures matérielles (x86, ARM, PowerPC, MIPS). Applications principales : utilisé dans des environnements critiques par la NASA dans des missions spatiales (Mars Pathfinder, Curiosity, Perseverance, Mars Reconnaissance Orbiter)

²³ Quantum's Network eXecutive : Multitâche temps réel, supporte plusieurs plateformes (x86, ARM, PowerPC), première version en 1982. Applications principales : Automobile (systèmes d'info-divertissement, contrôle embarqué), Industrie et médical (équipements hospitaliers).

²⁴ Advanced Driver Assistance Systems : ensemble de technologies électroniques et logicielles, intégrés dans les véhicules, qui assistent le conducteur dans la perception de son environnement et la prise de décision pour améliorer la sécurité et le confort du conducteur.

²⁵ Anti-lock Brake System (Système de freinage antiblocage) : système de sécurité automobile qui empêche les roues de se bloquer lors d'un freinage d'urgence, permettant de conserver le contrôle directionnel du véhicule.

²⁶ Electronic Stability Program (Programme électronique de stabilité) : système de sécurité automobile qui aide le conducteur à maintenir la trajectoire du véhicule et à éviter les dérapages en appliquant automatiquement les freins sur des roues spécifiques ou en réduisant la puissance du moteur.

²⁷ 4^{ème} révolution industrielle, caractérisée par l'intégration des technologies numériques, de l'Internet des Objets et de l'intelligence artificielle dans les systèmes de production pour créer des usines intelligentes et connectées.

- **Perspectives**

Le développement actuel de l'électronique s'oriente vers les microcontrôleurs basse consommation pour objets portables autonomes, l'électronique imprimée permettant d'intégrer des dispositifs embarqués dans des textiles, des emballages ou des implants, ainsi que vers l'apprentissage embarqué via des modèles IA optimisés pour microcontrôleurs. Le déploiement des réseaux 5G et 6G est un moteur de croissance pour l'électronique embarquée et les systèmes en temps réel, offrant une connectivité rapide et fiable. L'intelligence artificielle embarquée rendra possibles des traitements autonomes en temps réel. Dans le secteur de la mobilité, les véhicules autonomes dépendent de processeurs avancés pour la conduite et la sécurité, utilisant des systèmes de détection et de prise de décision en temps réel. En matière d'énergies renouvelables, les systèmes embarqués optimiseront la gestion des réseaux électriques, contrôlant les panneaux solaires et les éoliennes via des capteurs et des algorithmes en temps réel pour une meilleure efficacité.

En médecine, des dispositifs portables miniaturisés avec IA embarquée permettront un diagnostic précis et un suivi continu des patients. Dans l'industrie, les systèmes modulaires et interopérables favoriseront une automatisation fine dans le cadre de l'Industrie 4.0, améliorant la fiabilité et la sécurité opérationnelle.

Ces innovations technologiques, alliant puissance de calcul, faible consommation et haute fiabilité, répondront aux exigences croissantes des secteurs critiques.



Figure I.31. Quelques applications des systèmes embarqués



Figure I.32. Drone hexacoptère pour la surveillance environnementale et applications agricoles

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Les systèmes embarqués reposent sur un socle de théories fondamentales telles que la théorie des systèmes dynamiques (Stabilité, contrôlabilité, observabilité), l'automatique et contrôle optimal (PID, commande robuste, commande prédictive), théorie du signal et de l'information, codage et compression), complexité algorithmique et architecture (Analyse de temps d'exécution, partitionnement matériel/logiciel, ordonnancement temps réel).

Les outils mathématiques indispensables à l'étude et l'analyse incluent essentiellement l'algèbre linéaire (matrices, vecteurs, valeurs propres pour la modélisation d'états), le calcul différentiel et intégral (Equations différentielles), les probabilités et statistiques (Modélisation des incertitudes, fiabilité, analyse de performance), l'optimisation (Programmation linéaire et quadratique, heuristiques), les transformées et l'analyse fréquentielle (Transformées de Fourier, de Laplace et en Z pour filtrage et stabilité), les méthodes numériques (Discrétisation, simulation, résolution d'équations), la logique booléenne et algèbre de Boole (Conception des circuits numériques), Théorie des automates (Modélisation des comportements séquentiels).

Les outils nécessaires à la conception et modélisation étant les langages de description matériel (HDL, VHDL, Verilog, SystemC), les langages de modélisation (UML, SysML pour la conception logicielle), Outils de simulation (MATLAB/Simulink, Scilab/Xcos pour la validation), le partitionnement matériel/logiciel (Optimiser des performances et de la consommation).

4.8.2 Microélectronique et Nanotechnologies

- **Définition**

La microélectronique est une branche de l'électronique qui s'intéresse à la conception, la fabrication et l'intégration de dispositifs électroniques à l'échelle micrométrique et nanométrique. Elle repose sur l'utilisation de semi-conducteurs, principalement le silicium, pour réaliser des composants tels que les transistors, les diodes et les circuits intégrés. Son émergence est liée aux progrès de la physique du solide et des technologies de fabrication, notamment la photolithographie et la miniaturisation.

La microélectronique constitue le socle des systèmes numériques modernes, elle permet la réalisation de processeurs, mémoires et capteurs hautement intégrés. Elle est indissociable des nanotechnologies, qui prolongent la logique de miniaturisation vers des dimensions Sub-10 nanomètres²⁸. La microélectronique joue un rôle stratégique dans l'innovation industrielle et la souveraineté technologique des nations.

- **Historique**

La microélectronique naît au milieu du XXe siècle avec l'invention du transistor au Bell Labs, ouvrant la voie à la miniaturisation des circuits. Dans les années 1960, l'apparition des circuits intégrés marque une étape décisive, permettant l'intégration de milliers de composants sur une seule puce. La loi de Moore, formulée en 1965, illustre l'évolution de la microélectronique en prédisant le doublement du nombre de transistors tous les 18 à 24 mois.

A partir des années 1980, les procédés de photolithographie²⁹ avancée et la montée en puissance des microprocesseurs renforcent son rôle stratégique. La nanotechnologie émerge dans les années 1990, avec la maîtrise des dimensions sub-100 nm. Aujourd'hui, la convergence microélectronique–nanotechnologie se traduit par des technologies sub-10 nm, les transistors FinFET et les dispositifs à base de nanofils³⁰ ou de graphène.

²⁸ Technologie dont les dimensions critiques sont inférieures à 10 nm (10^{-9} m).

²⁹ Technique fondamentale de la microélectronique utilisée pour transférer des motifs extrêmement fins sur un substrat, généralement de silicium, afin de fabriquer des circuits intégrés.

³⁰ Matériau bidimensionnel constitué d'une feuille monoatomique de carbone, arrangées selon une structure en réseau hexagonal, isolé en 2004 par Andre Geim et Konstantin Novoselov, Prix Nobel de physique en 2010.

- **Applications**

Les applications en microélectronique et nanotechnologies couvrent l'automobile (ADAS, systèmes de freinage ABS, MEMS, systèmes d'assistance et de conduite autonome), l'aéronautique et le spatial (capteurs physiologiques et calculateurs embarqués), le biomédical (implants intelligents, diagnostic miniaturisé), les ordinateurs, les microprocesseurs et mémoires, ainsi que les téléphones mobiles, les cartes bancaires, les cartes SIM, les circuits de communication (Wi-Fi, Bluetooth, 4G/5G), les objets connectés.

Elles interviennent également dans le domaine énergétique, avec des électrodes nanostructurées pour batteries et cellules photovoltaïques plus efficaces. Enfin, la convergence de ces disciplines favorise l'émergence de matériaux innovants, tels que le graphène et les nanofils, ouvrant des perspectives inédites pour l'électronique flexible, les capteurs ultrasensibles et les technologies de l'Internet des objets.

- **Avancées récentes**

Les avancées récentes en microélectronique et nanotechnologies se caractérisent par une miniaturisation extrême des dispositifs, atteignant des nœuds technologiques inférieurs à 10 nanomètres. L'introduction de nouveaux matériaux, tels que le graphène, les nanotubes de carbone et les nanofils, ouvre la voie à des dispositifs plus rapides, flexibles et résistants.

Ces progrès avec la miniaturisation des circuits intégrés, trouvent des applications dans des domaines variés tels que la médecine, avec des nanocapteurs pour le diagnostic, la délivrance ciblée de médicaments et des implants intelligents ; l'énergie, grâce à des électrodes nanostructurées pour batteries à haute capacité, supercondensateurs, cellules solaires avancées et membranes de filtration de l'eau ; la photonique, avec des lasers et dispositifs de communication optique plus performants, les centrales inertielles miniatures (basées sur les MEMS/NEMS³¹, avec des applications en robotique et drones.

Enfin, l'intégration de ces technologies dans l'Internet des objets favorise le développement de systèmes embarqués à faible consommation, consolidant le rôle stratégique de la microélectronique et des nanotechnologies dans l'innovation contemporaine.

- **Perspectives**

- Transistors de nouvelle génération (Passage des FinFET aux GAAFET (Gate-All-Around FET) ; Transistors tunnel (TFET) et les spintronic FET (pour réduire la consommation) ;
- Matériaux émergents (Graphène et autres matériaux 2D (MoS₂, WS₂, Phosphorène) pour transistors ultra-rapides et flexibles) ;
- Mémoire et stockage avancés (ReRAM, MRAM, PCM et mémoires neuromorphiques inspirées du cerveau, memristors pour l'IA embarquée et le calcul in-memory) ;
- Énergie et durabilité (Supercondensateurs à base de graphène et matériaux poreux pour stockage rapide ; Circuits basse consommation pour l'IoT) ;
- Applications biomédicales (Nanocapteurs implantables pour le suivi en temps réel des paramètres physiologiques, Interfaces neuronales basées sur des matériaux flexibles et biocompatibles).

³¹ MEMS signifie Microsystèmes ÉlectroMécaniques, NEMS signifie Nanosystèmes ÉlectroMécaniques (ou Nanosystèmes), il s'agit de dispositifs miniaturisés combinant des fonctions mécaniques et électroniques. Les MEMS sont à l'échelle micrométrique, tandis que les NEMS sont encore plus petits, à l'échelle nanométrique.

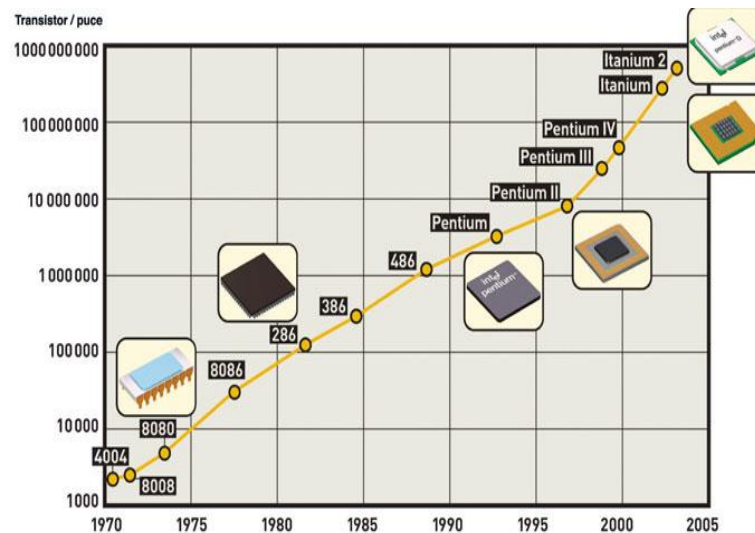


Figure 1.33. Illustration de la loi de Moore à travers l'évolution du nombre de transistors dans les microprocesseurs Intel

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Les théories fondamentales nécessaires à l'étude de la microélectronique et des nanotechnologies sont la physique du solide (Conduction électronique, bandes d'énergie, semi-conducteurs), la mécanique quantique (Effet tunnel, confinement quantique, transport balistique), l'électromagnétisme (Lois de Maxwell, propagation et interaction des champs, la théorie des dispositifs électroniques (MOSFET, FinFET, GAAFET, nanofils, graphène), la théorie de la thermodynamique et transport (Diffusion, conduction thermique, fiabilité des matériaux).

4.8.3 Electronique biomédicale

- **Définition**

Branche interdisciplinaire de l'ingénierie qui applique les principes de l'électronique à la médecine et à la biologie, dans le but de concevoir, développer et optimiser des dispositifs d'instrumentation médicale, de diagnostic, de surveillance et le traitement des patients. Elle combine l'électronique, la biologie et la médecine pour répondre aux besoins cliniques et améliorer la qualité des soins, faciliter le diagnostic, et permettre une médecine plus personnalisée et efficace.

- **Historique**

L'électronique biomédicale est passée des simples galvanomètres du XIX^e siècle aux systèmes intelligents et connectés du XXI^e siècle, devenant un domaine central du génie biomédical et de la santé moderne.

XIX^e siècle - Les origines : Premiers instruments électrophysiologiques : utilisation de galvanomètres et d'électrodes pour mesurer l'activité électrique du cœur et des muscles ; découverte de l'électrocardiogramme (ECG) par Willem Einthoven (1903).

Début du XX^e siècle - L'ère des amplificateurs : L'invention des lampes électroniques (triodes) permet d'amplifier les signaux biologiques très faibles ; développement des premiers dispositifs de monitoring médical (ECG, EEG).

Années 1950-1970 - L'essor hospitalier : Apparition des techniciens en électronique médicale dans les hôpitaux (fin des années 1950) pour entretenir et calibrer les appareils ; développement rapide de l'imagerie médicale (Echographie, rayons X, tomodensitométrie) ; la normalisation et la maintenance des équipements deviennent des enjeux majeurs.

Années 1980-2000 - La révolution numérique : Passage de l'analogique au numérique (microprocesseurs, convertisseurs A/N, systèmes embarqués) ; développement du traitement numérique du signal biomédical (Filtrage, compression, analyse spectrale) ; apparition des implants électroniques (Pacemakers³², neurostimulateurs).

XXI^e siècle - La convergence technologique : Intégration de l'informatique médicale, de la bio-informatique et des réseaux de capteurs ; miniaturisation et biocapteurs portables (wearables³³, IoT médical) ; développement de l'imagerie avancée (IRM fonctionnelle, PET scan³⁴) ; vers la médecine personnalisée et les systèmes intelligents d'aide au diagnostic.

- **Applications**

Stimulateurs cardiaques, capteurs de glycémie, IRM, prothèses intelligentes, stimulateurs cardiaques (pacemakers), neurostimulateurs, pompes à insuline, interfaces cerveau-machine.

- **Avancées récentes**

Capteurs implantables, télédiagnostic, impression 3D (prothèses, implants, os, cartilage, peau), Intelligence artificielle médicale (Diagnostic de nombreuses pathologies, méthodes d'imagerie médicale associée à l'algorithme de Deep Learning permettant de mieux détecter certaines lésions et ainsi d'améliorer leur prise en charge), Bioélectronique (Interfaces cerveau-machine, implants neuronaux), Télémedecine (Transmission électronique des données médicales pour suivi à distance).

- **Perspectives**

L'électronique biomédicale évolue vers des systèmes plus intelligents, connectés, miniaturisés et personnalisés, au service d'une médecine proactive et universelle. Ses perspectives sont essentiellement la médecine personnalisée, les nanotechnologies médicales, le diagnostic prédictif, la bioélectronique implantable (Dispositifs souples et biocompatibles pour une interaction directe avec les tissus vivants), les greffes optimisées (suivi post-transplantation assisté par algorithmes prédictifs, les patches connectés, les implants communicants, les systèmes de santé interconnectés, l'accès aux soins en zones rurales, la nanoélectronique médicale, les batteries tout-solide (alimentation rapide et durable des dispositifs implantables), l'électronique flexible et biocompatible pour les implants de longue durée et les textiles médicaux.

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Les principales théories fondamentales utiles à l'électronique biomédicale sont l'écophysiologie et bioélectricité, le Traitement du signal biomédical, la modélisation des systèmes biologiques, la théorie des systèmes dynamiques (linéaires et non linéaires), l'Instrumentation biomédicale.

Les outils mathématiques nécessaires à l'étude et l'analyse en électronique biomédicale sont l'algèbre linéaire, les équations différentielles, les probabilités et statistiques, les méthodes numériques et optimisation, les transformées et l'analyse spectrale.

³² Dispositif électronique implantable, destiné à réguler le rythme cardiaque s'il est trop lent ou irrégulier.

³³ Dispositifs électroniques miniaturisés que l'on peut porter sur soi (montres connectées, bracelets, lunettes intelligentes, capteurs biomédicaux, ... etc.), conçus pour collecter, analyser et transmettre des données utiles dans la vie quotidienne, notamment en santé et bien-être.

³⁴ Technique d'imagerie médicale, utilisant un traceur radioactif, permettant d'observer le fonctionnement des organes et des tissus en temps réel, en complément des images anatomiques fournies par le scanner ou l'IRM.

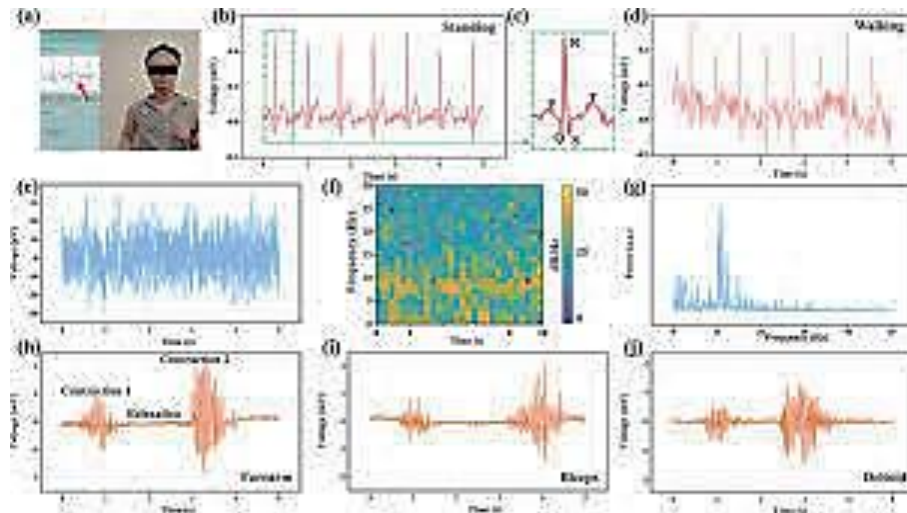


Figure I.34. Monitoring ECG, EEG et EMG

4.8.4 Autres filières de l'électronique

- **Instrumentation et mesure** : Conception de capteurs, systèmes de mesure, acquisition de données, pour applications industrielles et biomédicales.
- **Electronique quantique et spintronique** : Recherche avancée sur les dispositifs basés sur les propriétés quantiques des électrons.
- **Electronique militaire et de défense** : Radars, systèmes de communication sécurisés, électronique embarquée robuste.
- **Electronique spatiale, aéronautique et automobile** : Systèmes embarqués pour satellites, avions, drones et automobiles, capteurs, électronique de puissance pour véhicules électriques et hybrides, résistance aux radiations et conditions extrêmes.
- **Electronique flexible et organique** : Circuits imprimés sur matériaux souples, écrans OLED, capteurs portables.

5. Automatique

5.1. Généralités

• Définition

L'automatique est une branche des sciences de l'ingénieur qui étudie la modélisation, l'analyse, la commande et la régulation des systèmes dynamiques (mécaniques, électriques, biologiques, économiques), via des lois de commande capables de fonctionner, sans intervention humaine, des systèmes en respectant des objectifs de performance tels que la stabilité, la rapidité, la précision et la robustesse face aux perturbations.

• Historique

L'Automatique plonge ses racines dans l'Antiquité (~100 av. J.-C.) avec les automates d'Héron d'Alexandrie et les premières horloges hydrauliques. Au XVIIe siècle, Huygens met au point l'horloge à pendule, ouvrant la voie à une régulation précise du temps. En 1788, James Watt invente le régulateur centrifuge pour la machine à vapeur, marquant la naissance du contrôle automatique par rétroaction. Au XIXe siècle (1892), Lyapounov établit la théorie de la stabilité, donnant un cadre mathématique solide à l'étude des systèmes dynamiques. Au XXe siècle (1948-1960), Wiener fonde la cybernétique et Kalman développe la représentation d'état ainsi que le filtre de Kalman, structurant la discipline moderne.

Enfin, au XXI^e siècle, l'Automatique s'intègre à l'intelligence artificielle, à la robotique et à la biomédecine, devenant une science incontournable pour piloter les systèmes complexes contemporains.

- **Applications**

L'Automatique est une discipline scientifique et technique qui trouve des applications dans une multitude de domaines modernes. Dans l'industrie, elle est au cœur des procédés de production où les systèmes de régulation assurent le contrôle de la température, de la pression ou du débit. Dans le domaine de l'énergie, elle sert à piloter les réseaux électriques, optimise la distribution et contribue au développement des smart grids intégrant les énergies renouvelables. En robotique, elle permet la commande des bras articulés, des drones et des véhicules autonomes, en assurant précision et stabilité des mouvements. Dans les transports, elle régule la vitesse des trains, la navigation aérienne et la gestion du trafic routier. Dans l'agriculture, elle optimise l'irrigation, la fertilisation et la récolte grâce à des systèmes automatisés. En télécommunications, elle contribue à la régulation des signaux et à la gestion des réseaux complexes. Dans le bâtiment, elle est utilisée pour la domotique, le contrôle de la climatisation et de la sécurité. L'Automatique joue aussi un rôle majeur dans l'aéronautique et le spatial, où elle assure la stabilité des satellites et des engins spatiaux. Dans l'environnement, elle aide à surveiller et contrôler la pollution et la gestion des ressources naturelles. L'Automatique est également essentielle dans les chaînes logistiques, permettant une gestion fluide des flux de marchandises.

Enfin, elle s'intègre de plus en plus à l'intelligence artificielle, ouvrant la voie à des applications innovantes dans tous les secteurs de la société.

- **Avancées récentes**

Ces dernières années, l'Automatique a connu des avancées majeures grâce à l'intégration de l'intelligence artificielle et du Machine Learning³⁵, permettant des systèmes de commande prédictifs et adaptatifs. Le développement du contrôle prédictif basé sur modèles MPC³⁶ s'est imposé dans l'industrie pour optimiser en temps réel les procédés complexes. Les méthodes de commande robuste et non linéaire ont progressé afin d'assurer la stabilité même face aux incertitudes et perturbations. L'essor des systèmes cyber-physiques³⁷ (CPS) et de l'Internet des objets a élargi le champ d'application de l'Automatique aux réseaux intelligents et aux infrastructures connectées. En biomédecine, les dispositifs automatisés comme les pompes à insuline et les prothèses intelligentes bénéficient de ces innovations pour améliorer la qualité de vie des patients.

De plus en plus, l'Automatique s'oriente vers une convergence avec la robotique avancée et les véhicules autonomes, ouvrant la voie à des systèmes de contrôle toujours plus intelligents et fiables.

³⁵ (Apprentissage automatique en français) est une branche de l'intelligence artificielle qui permet à un système informatique d'apprendre automatiquement à partir de données et d'améliorer ses performances sans être explicitement programmé.

³⁶ En automatique Model Predictive Control (MPC) est traduit en français par Commande Prédictive par Modèle.

³⁷ Désigne un dispositif ou un ensemble de dispositifs où le monde physique (machines, capteurs, actionneurs) est étroitement intégré au monde numérique (logiciels, algorithmes, réseaux de communication).

- **Perspectives**

L'Automatique évolue vers une intégration profonde dans l'Industrie 4.0, où les systèmes cyber-physiques et l'IoT permettent une supervision en temps réel des procédés, par exemple dans les usines intelligentes de production pharmaceutique. Les systèmes auto-apprenants, basés sur le Machine Learning, enrichissent la commande prédictive (MPC) en adaptant les lois de régulation aux variations de paramètres. L'automatisation intelligente combine optimisation, diagnostic et prise de décision, dépassant le simple asservissement, et se traduit par des applications telles que les véhicules autonomes ou les robots chirurgicaux. Ces avancées reposent sur des outils mathématiques robustes (modèles d'état, optimisation convexe, filtrage de Kalman étendu) et sur des architectures distribuées. Elles ouvrent la voie à des systèmes résilients et adaptatifs capables de gérer incertitudes et contraintes complexes. Ainsi, l'Automatique devient une discipline stratégique pour la conception de systèmes autonomes dans l'énergie, la biomédecine et la mobilité intelligente.

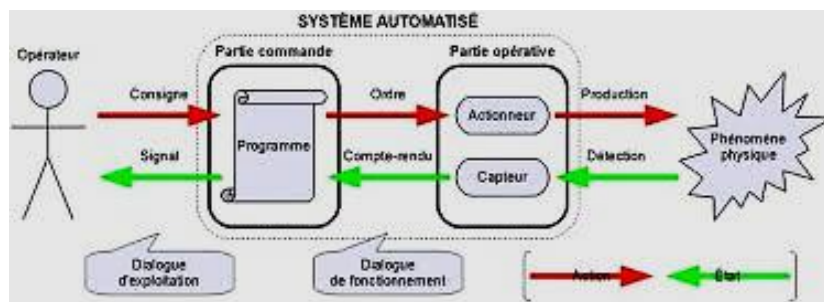


Figure I.35. Synoptique d'un système automatisé

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Les théories fondamentales indispensables à l'étude, l'analyse et la conception des systèmes automatiques sont la théorie des systèmes dynamiques (description de l'évolution des systèmes physiques) ; la théorie de la régulation et de la commande (Commande linéaire classique : régulateur PI, PID, Commande moderne : Etats, observateurs³⁸, régulateurs LQR, Commande robuste : H^∞ , μ -synthèse, Commande adaptative et prédictive) ; la théorie des automates (Modélisation des comportements discrets : automates finis, machines de Turing) ; la théorie de la stabilité (critères de Lyapounov, stabilité BIBO, marges de gain et de phase) ; la théorie de l'optimisation (optimisation convexe, programmation dynamique, contrôle optimal) ; Automatismes industriels (logiques combinatoires et séquentielles, réseaux de Petri, systèmes événementiels).

Les outils mathématiques essentiels en automatique incluent l'algèbre linéaire (Matrices, vecteurs, valeurs propres, Représentation d'état) ; l'analyse complexe (Pôles, zéros, stabilité dans le plan complexe) ; les équations différentielles et intégrales (Modélisation des systèmes continus) ; la transformée de Laplace (Résolution des équations différentielles, analyse fréquentielle) ; la transformée de Fourier (Analyse spectrale des signaux) ; la transformée en Z (Analyse des systèmes discrets et numériques) ; les méthodes numériques (Discrétisation, simulation, calcul matriciel) ; les probabilités et statistiques (Modélisation des incertitudes, filtrage de Kalman) ; la géométrie et optimisation (Trajectoires, planification en robotique).

³⁸ Algorithmes mathématiques qui estiment les variables internes non mesurables d'un système dynamique à partir des entrées et sorties disponibles.

5.2. Systèmes dynamiques linéaires et systèmes non-linéaires

En mathématiques, en chimie ou en physique, un système dynamique est un système dont l'évolution dans le temps est décrite par une loi. Un système dynamique est causal, c'est-à-dire que son avenir ne dépend que de phénomènes du passé ou du présent. Il peut être :

- Déterministe, c'est-à-dire qu'à une « condition initiale » donnée à l'instant « présent » va correspondre à chaque instant ultérieur *un et un seul* état « futur » possible. Par exemple les systèmes modélisés par des équations différentielles ordinaires dont l'existence et l'unicité des solutions est vérifiée.
- Stochastique, si son évolution est régie par une loi de probabilité. C'est le cas des systèmes décrits par des équations différentielles stochastiques.

Depuis les travaux d'Isaac Newton (1687), l'idée que l'évolution temporelle d'un système physique quelconque est bien modélisée par une équation différentielle (ou ses équations aux dérivées partielles) est admise. Cette modélisation différentielle s'est depuis étendue avec succès à d'autres disciplines comme la chimie, la biologie, l'économie...

On considère typiquement un système différentiel du premier ordre du type :

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), t)$$

où la fonction f définit le système dynamique étudié (pour un système à n degrés de liberté, il s'agit à proprement parler d'un champ de vecteurs à n dimensions, c'est-à-dire un ensemble de n fonctions scalaires). La dérivée "temporelle" est parfois notée $\dot{x}(t)$.

Nous distinguons les systèmes dynamiques linéaires des systèmes dynamiques non linéaires. Dans les premiers, le membre de droite de l'équation est une fonction dépendant linéairement de l'état x , telle que :

$$\frac{dx(t)}{dt} = A \cdot x(t) \text{ en temps continu, avec } A \in \mathbb{R}^{n \times n} \text{ une matrice réelle.}$$

La somme de deux solutions d'un système linéaire est également solution de ce système (« principe de superposition »). Si on les perturbe légèrement un système linéaire, la réponse est proportionnelle à la perturbation.

Les solutions d'une équation linéaire forment un espace vectoriel, ce qui permet l'utilisation de l'algèbre linéaire et simplifie l'analyse. Pour les systèmes à temps continu, la transformée de Laplace permet de transformer les équations différentielles en des équations algébriques.

Dans le cas de système non-linéaire, le membre de droite de l'équation n'est pas une fonction dépendant linéairement de l'état x , et on y trouve des termes au carré, des produits croisés (X), ou des fonctions trigonométriques (sin, cos), ce qui mène souvent à l'apparition de comportements chaotiques ou de bifurcations imprévisibles.

5.3. Systèmes continus et systèmes discrets

La distinction principale entre systèmes continus et discrets réside dans la manière dont le temps et les variables d'état sont modélisés.

Un système continu (ou à temps continu) est un modèle dont l'état évolue de manière fluide et ininterrompue au fil du temps (le temps est un nombre réel). Ils sont décrits par des équations différentielles. Les systèmes continus modélisent des phénomènes physiques et naturels qui évoluent sans interruption.

- Exemple : Le mouvement d'un pendule oscillant, la charge d'un condensateur ou l'écoulement de l'eau dans un tuyau.

Un système discret (ou à temps discret) est un modèle dont l'état change uniquement à des instants précis et séparés (le temps est un nombre entier, comme des "pas" ou des "sauts"). Ils sont décrits par des équations aux différences finies (relations de récurrence). Les systèmes discrets sont omniprésents dans le monde numérique et les processus par étapes.

- Exemple : La mise à jour du solde d'un compte bancaire chaque fin de mois, l'évolution d'une population mesurée chaque année, ou les étapes d'exécution d'un programme informatique.

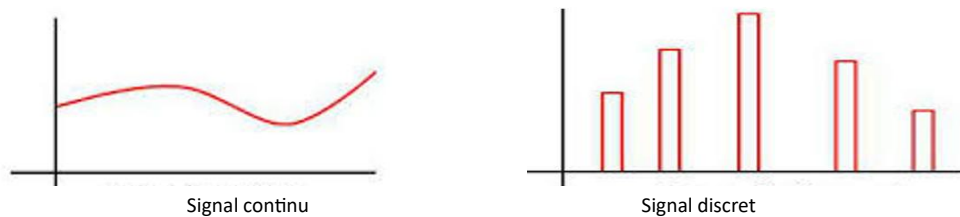


Figure I.36. Signal continu et signal discret

De même, les signaux continus (analogiques) varient de manière fluide dans le temps et l'amplitude (exemple : tension secteur 220V), définis à chaque instant. Et les signaux discrets (ou échantillonnés) existent uniquement à des instants précis et séparés, souvent régulièrement espacés (exemple : relevé de température toutes les minutes), et sont représentés par une suite de valeurs numériques.

La conversion d'un signal continu en discret s'appelle l'échantillonnage, une étape cruciale pour le traitement informatique.

5.4. Commande des systèmes dynamiques

- **Théorie de la stabilité**

La stabilité est une propriété fondamentale qui détermine la capacité d'un système à maintenir ou à retrouver un état d'équilibre après avoir été perturbé.

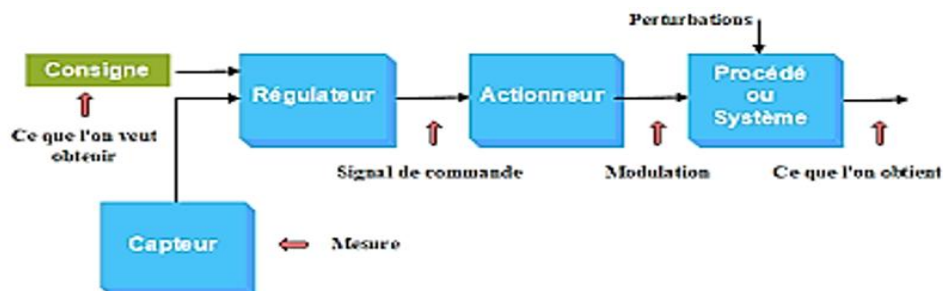


Figure I.37. Schéma fonctionnel d'une boucle de régulation

Une définition basée sur le critère d'entrée bornée/sortie bornée « BIBO, Bounded-Input Bounded-Output », très utilisée pour les systèmes linéaires s'exprime de la manière suivante : Un système automatique est considéré comme stable si, pour toute sollicitation ou entrée limitée (bornée) qu'on lui applique, sa sortie (sa réponse) reste également limitée (bornée) et ne diverge pas vers l'infini.

En d'autres termes, un système stable "encaisse" les chocs ou les changements d'entrée et finit par revenir à un état stationnaire ou un équilibre sans s'emballer indéfiniment. Si la sortie augmente sans limite, le système est dit instable.

Méthode des pôles : La stabilité est souvent caractérisée par la position de ses pôles³⁹ dans le plan complexe : pour qu'un système linéaire soit stable, tous ses pôles doivent avoir une partie réelle strictement négative. Plusieurs méthodes permettent de démontrer la stabilité d'un système dynamique.

Critère de Routh-Hurwitz : Le critère de Routh-Hurwitz est une méthode algébrique puissante utilisée pour déterminer la stabilité des systèmes dynamiques linéaires invariants dans le temps (LTI), sans avoir à calculer explicitement les racines (pôles) de l'équation caractéristique.

La condition nécessaire et suffisante pour démontrer la stabilité est exprimée par :

Un système est stable si et seulement si tous les éléments de la première colonne du tableau de Routh (construit à partir des coefficients du polynôme caractéristique du système) ont le même signe (tous positifs ou tous négatifs).

- Si tous les signes sont identiques : Le système est stable.
- S'il y a un ou plusieurs changements de signe dans la première colonne : Le système est instable. Le nombre de changements de signe indique le nombre de pôles instables (situés dans le demi-plan droit du plan complexe).

En résumé, la méthode consiste à :

1. Obtenir l'équation caractéristique du système (le dénominateur de la fonction de transfert en boucle fermée égal à zéro).
2. Construire le tableau de Routh à partir des coefficients du polynôme.
3. Analyser les signes de la première colonne de ce tableau pour conclure sur la stabilité.

Stabilité dans le sens de Lyapounov : La condition de stabilité de Lyapounov au sens de Lyapounov (stabilité asymptotique) est l'une des méthodes les plus puissantes et générales en automatique, car elle permet d'analyser la stabilité des systèmes non-linéaires (là où les méthodes comme les pôles ou Routh-Hurwitz échouent souvent).

Un système dynamique non-linéaire est stable (asymptotiquement stable à l'origine) si l'on peut trouver une fonction scalaire positive, appelée **fonction de Lyapounov** ($V(x)$), qui se comporte comme une sorte d'énergie généralisée du système :

1. La fonction d'énergie $V(x)$ est positive : $V(x) > 0$ partout sauf à l'origine (le point d'équilibre), où $V(0) = 0$.
2. L'énergie diminue strictement au cours du temps : La dérivée temporelle de cette fonction, $\dot{V}(x)$, doit être strictement négative $\dot{V}(x) < 0$.

En termes simples, si l'on peut prouver que l'énergie du système diminue constamment tant qu'il n'a pas atteint l'équilibre, le système est nécessairement stable et finira par s'y arrêter. L'astuce consiste à trouver la bonne fonction.

• **Régulation linéaire**

La régulation linéaire est une approche de commande automatique qui utilise des modèles et des lois de contrôle linéaires pour maintenir une variable de sortie désirée (la consigne). Elle s'applique principalement aux systèmes qui se comportent de manière prévisible et proportionnelle, ou à ceux dont le fonctionnement est étudié autour d'un point d'équilibre fixe.

³⁹ Un pôle (ou racine) est un concept fondamental en automatique pour analyser la stabilité et la réponse dynamique d'un système linéaire.

Le contrôleur le plus célèbre de cette approche est le régulateur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé), qui ajuste l'action de commande en fonction de trois paramètres calculés à partir de l'erreur (différence entre la consigne et la mesure) :

1. P (Proportionnel) : Réagit instantanément à l'erreur actuelle.
2. I (Intégral) : Corrige les erreurs passées à long terme (élimine l'erreur statique).
3. D (Dérivé) : Anticipe l'évolution future de l'erreur (agit sur la vitesse de changement).

Exemples d'applications :

- Régulation de vitesse : Régulateur de vitesse (cruise control) d'une voiture sur autoroute,
- Contrôle de processus industriels : Maintien d'une température constante dans un four ou d'un niveau de liquide dans une cuve.
- Domotique : Thermostat d'une maison qui régule le chauffage.

• **Régulation non-linéaire**

La régulation non-linéaire traite des systèmes dont les équations ne respectent pas le principe de superposition (comportement imprévisible, chaos, saturation). Elle utilise des lois de commande plus sophistiquées que le PID linéaire standard pour gérer ces complexités, les contraintes physiques (limites de puissance, fermeture de clapets, ...etc.) et les changements rapides de régime. Elle est cruciale dans les domaines où la linéarité est une approximation trop grossière.

Exemples de commande non-linéaire

- Commande par mode glissant (Sliding Mode Control - SMC) : Très robuste, force le système à suivre une "surface" désirée malgré les perturbations.
- Linéarisation par retour d'état (Feedback Linearization) : Tente de "masquer" la non-linéarité du système via une transformation mathématique pour appliquer ensuite une commande linéaire classique.
- Commande prédictive non-linéaire (NMPC) : Optimise les actions futures en tenant compte des contraintes non-linéaires du système.
- Commande par Backstepping : Méthode récursive systématique de synthèse de commande non-linéaire qui construit, étape par étape, une fonction de Lyapounov et la loi de commande stabilisante associée pour des systèmes complexes triangulaires.
- Commande par logique floue (Fuzzy Logic Control) : Utilise des règles linguistiques ("si c'est très chaud, baisser beaucoup le chauffage") plutôt que des équations strictes.

Exemples d'Applications

- Aérospatial/Robotique : Contrôle d'attitude des satellites, pilotage de drones ou équilibrage des robots marcheurs (non-linéarités mécaniques et aérodynamiques).
- Électronique de puissance : Gestion des convertisseurs de puissance ou des onduleurs.

5.5 Commandes avancées

• **Etat d'un système dynamique**

L'état d'un système dynamique est l'ensemble minimal de variables (appelées variables d'état) qui, à un instant donné, résume complètement le comportement futur du système en l'absence de toute nouvelle entrée.

- **Commande RST**

La commande RST est une méthode avancée de régulation numérique (à temps discret) qui permet de concevoir des contrôleurs industriels très performants, souvent utilisée pour remplacer les régulateurs PID classiques. Elle repose sur le réglage de trois polynômes (R, S, T) pour imposer directement le comportement désiré du système en boucle fermée, offrant une grande flexibilité pour gérer à la fois la poursuite de consigne et le rejet de perturbations.

Exemples d'applications :

- Machines électriques : Commande de vitesse et de couple de moteurs à courant continu ou de machines synchrones et asynchrones.
- Régulation de processus industriels : Contrôle de température dans des fours ou de niveaux dans des cuves, où une réponse rapide et robuste est nécessaire malgré les perturbations.

- **Commande LQR**

La commande LQR (Linear Quadratic Regulator) est une méthode de synthèse de commande optimale très utilisée pour les systèmes linéaires. Son objectif est de trouver la loi de commande la plus efficace qui minimise un "coût" de performance, défini mathématiquement par une fonction quadratique.

Le principe est de trouver le meilleur compromis entre deux objectifs contradictoires :

1. Atteindre la consigne ou stabiliser le système le plus rapidement possible.
2. Dépenser le moins d'énergie de commande possible (limiter l'effort de l'actionneur).

Le résultat est une rétroaction d'état qui offre souvent une excellente stabilité et robustesse.

Exemples d'applications :

- Aérospatial : Systèmes de pilotage automatique d'avions et de stabilisation d'engins spatiaux, où la consommation de carburant (énergie de commande) doit être minimisée.
- Suspensions actives : Contrôle des suspensions de voitures haut de gamme pour optimiser à la fois le confort (rapidité de réponse) et l'adhérence à la route (dépense d'énergie).
- Robotique : Planification de trajectoires et stabilisation de robots manipulateurs pour des mouvements fluides et efficaces.

- **Commande adaptative**

La commande adaptative est une technique utilisée pour contrôler les systèmes dont les caractéristiques (paramètres, dynamique) changent ou sont incertaines pendant leur fonctionnement. Le principe est qu'un contrôleur "intelligent" estime en continu et en temps réel les paramètres inconnus du processus, puis ajuste automatiquement sa propre loi de commande (ses gains) pour maintenir des performances optimales malgré ces variations.

Exemples d'applications :

- Aviation : Ajustement des commandes de vol lorsque la masse de l'avion diminue (consommation de carburant) ou en cas de panne partielle d'un actionneur.
- Contrôle moteur : Régulation de processus où l'usure mécanique modifie les propriétés physiques du système.

- **Commande prédictive (MPC)**

La commande prédictive par modèle (MPC) est une stratégie qui utilise un modèle mathématique du système pour prédire son comportement futur sur un horizon temporel donné. A chaque instant, le contrôleur MPC optimise une séquence d'actions de commande futures pour minimiser un coût (énergie, écart à la consigne) tout en respectant des contraintes (limites de température, de débit). Seule la première action calculée est appliquée, puis le processus recommence au pas de temps suivant.

Exemples d'applications :

- Raffinage et Pétrochimie : Gestion complexe de colonnes de distillation ou de grands réseaux de pipelines où de multiples variables interdépendantes doivent être optimisées sous contrainte.
- Économie d'énergie : Gestion optimale des systèmes CVC (chauffage, ventilation, climatisation) dans les bâtiments intelligents.
- Véhicules autonomes : Planification de trajectoire en temps réel pour anticiper les mouvements des autres véhicules et respecter les limitations physiques du véhicule.

- **Commande robuste, H^∞ et μ -synthèse**

La commande robuste est une branche de l'automatique qui conçoit des contrôleurs capables de garantir des performances satisfaisantes, non seulement pour un modèle précis du système, mais pour toute une gamme de variations possibles (incertitudes de modélisation, perturbations, bruits de mesure). Elle vise à rendre le système "solide" ou "tolérant" aux erreurs et aux imprécisions. Les approches

Commande H^∞ (H-infini) :

Cette méthode optimise la pire des réponses possibles du système face aux incertitudes et aux perturbations. Elle cherche à minimiser l'influence maximale que ces éléments indésirables peuvent avoir sur la sortie.

Exemples d'applications :

- Aviation militaire : Assurer la stabilité d'un avion de chasse dans toutes les conditions de vol, malgré les variations d'altitude, de vitesse et de configuration de l'appareil.
- Lecteurs de disque dur : Contrôle de haute précision des têtes de lecture/écriture, où la robustesse face aux vibrations et aux variations thermiques est cruciale.

Commande μ -synthèse (H-synthèse) :

C'est une extension plus puissante de H^∞ , capable de gérer des incertitudes structurées et complexes (par exemple, savoir exactement quelles pièces du modèle sont incertaines et comment elles sont connectées). Elle offre une robustesse supérieure dans des scénarios complexes.

Exemples d'applications :

- Robotique avancée : Contrôle des manipulateurs multiaxes où les interactions complexes entre les moteurs et la charge utile sont difficiles à modéliser parfaitement.
- Réseaux électriques intelligents (Smart Grids) : Gestion de la stabilité des réseaux électriques complexes avec une forte intégration d'énergies renouvelables intermittentes (éolien, solaire).

5.6. Filières de l'automatique

5.6.1 Automatismes industriels

- **Définition**

Les automatismes industriels désignent l'ensemble des techniques et des systèmes qui permettent de commander, réguler et surveiller des machines ou des procédés de production, sans intervention humaine. Ils reposent sur l'utilisation de capteurs, d'actionneurs, d'automates programmables, de systèmes de supervision et de réseaux industriels. Leur rôle est d'assurer la fiabilité, la rapidité et la sécurité des opérations tout en réduisant les erreurs humaines et en améliorant la qualité des produits. Les automatismes se déclinent en deux grandes catégories : les automatismes discrets, qui concernent les logiques séquentielles comme le démarrage ou l'arrêt de machines, et les automatismes continus, qui régulent des grandeurs physiques telles que la pression, la température ou le débit. Ils s'intègrent souvent dans des architectures plus larges comme la gestion de production assistée par ordinateur. Avec l'avènement de l'Industrie 4.0, leur rôle s'élargit grâce à la connexion avec l'internet des objets et l'intelligence artificielle.

- **Historique**

L'histoire des automatismes industriels commence au XIX^e siècle avec l'usage des régulateurs mécaniques, comme le régulateur de Watt pour les machines à vapeur. Au début du XX^e siècle, les relais électromécaniques se généralisent pour assurer des commandes logiques simples dans les ateliers. Dans les années 1950, l'électronique à base de transistors remplace progressivement les relais, offrant plus de fiabilité et de rapidité. Les années 1970 marquent l'apparition des automates programmables industriels (API), qui révolutionnent la flexibilité des systèmes de commande. Dans les décennies suivantes, les automatismes s'intègrent aux systèmes informatiques et aux réseaux, permettant la supervision centralisée et la gestion en temps réel. Les années 1990 voient l'essor des systèmes SCADA⁴⁰ et des réseaux industriels normalisés, renforçant la communication entre machines. Avec les années 2000, la convergence entre automatisme et informatique ouvre la voie aux usines intelligentes et aux systèmes intégrés. Aujourd'hui, l'Industrie 4.0 prolonge cette évolution en connectant les automatismes à l'Internet des Objets et à l'intelligence artificielle pour des procédés autonomes et optimisés.

- **Applications**

Les automatismes industriels trouvent leurs principales applications dans la commande des machines de production, où ils assurent le démarrage, l'arrêt et la synchronisation des opérations. Ils sont largement utilisés dans la régulation des procédés continus, comme le contrôle de la température, de la pression ou du débit dans les industries chimiques et pétrolières. Dans le domaine de l'énergie, ils permettent la gestion des réseaux électriques, la supervision des centrales et l'optimisation de la distribution. En logistique et manutention, ils pilotent les convoyeurs, les systèmes de tri et les entrepôts automatisés. La robotique industrielle constitue une autre application majeure, avec des robots programmés pour l'assemblage, le soudage ou la peinture.

⁴⁰ *Supervisory Control And Data Acquisition* : Système informatique industriel qui permet de superviser, contrôler et acquérir en temps réel les données des procédés automatisés. Il assure la surveillance centralisée, le pilotage à distance et l'optimisation des installations industrielles.

Dans l'agroalimentaire, les automatismes garantissent la qualité et la traçabilité des produits en automatisant les étapes de transformation et de conditionnement. Ils interviennent aussi dans les transports, par exemple pour la signalisation ferroviaire ou la gestion du trafic routier.

- **Avancées récentes**

Les avancées des automatismes industriels se résument au passage des relais électromécaniques vers l'électronique à transistors, offrant rapidité et fiabilité. L'arrivée des automates programmables industriels a permis une flexibilité inédite grâce à la programmation. Les régulations numériques, notamment PID, ont amélioré la précision des procédés continus. Les réseaux industriels comme Modbus ou Profibus ont facilité la communication temps réel entre équipements. Les systèmes SCADA et les IHM⁴¹ ont renforcé la supervision et le diagnostic centralisé. La robotisation a apporté précision et productivité dans les chaînes de fabrication. Le cloud et l'IoT ont introduit des automatismes interconnectés et distribués. Enfin, l'intelligence artificielle permet aujourd'hui des automatismes prédictifs et auto-adaptatifs.

- **Perspectives**

Les perspectives futures des automatismes industriels s'orientent vers une intégration accrue de l'intelligence artificielle, permettant des systèmes capables d'analyser et de s'auto-optimiser en temps réel. L'Internet des Objets industriels renforcera la connectivité entre capteurs, actionneurs et plateformes de supervision, favorisant la maintenance prédictive. Le cloud computing et l'Edge Computing offriront une puissance de traitement distribuée, combinant rapidité locale et analyse massive des données.

La robotique collaborative se développera, avec des robots capables de travailler en synergie avec les opérateurs humains. Les systèmes de contrôle évolueront vers des architectures modulaires et interopérables, facilitant l'adaptation aux besoins changeants des usines. La cybersécurité deviendra un enjeu central pour protéger les réseaux industriels interconnectés contre les menaces numériques. Les automatismes intégreront davantage de fonctions de gestion énergétique pour réduire l'empreinte carbone et améliorer la durabilité.

L'Industrie 5.0 mettra l'accent sur la coopération homme-machine, valorisant la créativité humaine soutenue par la technologie. Les interfaces homme-machine seront plus intuitives, exploitant la réalité augmentée et la visualisation 3D. Enfin, les usines intelligentes se transformeront en environnements hautement flexibles, autonomes et résilients, capables de répondre aux défis économiques et environnementaux.



Figure I.38. Exemples d'usines 4.0 : Atelier de soudure et chaîne d'assemblage dans une usine de construction automobiles

⁴¹ Interface Homme-Machine, désigne l'ensemble des dispositifs matériels et logiciels permettant à un opérateur humain d'interagir avec une machine ou un système automatisé, en facilitant la commande, la supervision et le retour d'informations.

5.6.2 Informatique industrielle

- **Définition**

L'informatique industrielle est une branche de l'informatique appliquée aux systèmes techniques et aux procédés automatisés. Elle regroupe l'ensemble des technologies matérielles et logicielles utilisées pour piloter, superviser, communiquer, et optimiser les installations industrielles.

- **Historique**

Apparition des automates programmables dès les années 1970 et des premiers logiciels industriels 1970-1980 ; Intégration des réseaux industriels et des interfaces graphiques 1990-2000 ; Convergence avec l'IoT, le cloud, l'IA et cybersécurité vers l'industrie 4.0, 2010.

- **Applications**

Automatisation et supervision des procédés industriels ; Commande de machines et lignes de production via automates programmables ; Régulation temps réel : température, pression, débit, niveau ; Contrôle de bras robotisés, Pilotage de robots.

- **Avancées récentes**

Cloud industriel, IIoT⁴² (Internet Industriel des Objets), cybersécurité.

- **Perspectives**

Usines intelligentes, automatisation distribuée, maintenance prédictive.



Figure I.39. Salle de contrôle dans une usine de production

5.6.3 Diagnostic industriel

- **Définition**

Le diagnostic désigne l'ensemble des méthodes et procédures permettant d'identifier, localiser et analyser les dysfonctionnements ou les anomalies dans un système électrique ou électronique. Il peut s'appliquer à des équipements industriels, des réseaux électriques, des machines tournantes, des installations domestiques et des systèmes ou lignes de production automatisée.

- **Historique**

Le diagnostic en génie électrique émerge avec l'électrification industrielle au XIXe siècle, où les premières méthodes reposaient sur l'observation directe et les tests manuels. Au XXe siècle, l'apparition des instruments de mesure (oscilloscopes, multimètres) a permis une analyse plus précise des pannes.

⁴² Internet Industriel des Objets (*Industrial Internet of Things*), extension spécialisée de l'IoT appliquée aux environnements industriels.

Dans les années 1980-1990, l'intégration des microprocesseurs et des automates programmables a introduit le diagnostic embarqué. Le XXI^e siècle voit l'essor du diagnostic intelligent, basé sur l'intelligence artificielle, la maintenance prédictive et les systèmes experts. Aujourd'hui, il est au cœur des réseaux intelligents, de l'IoT et de la fiabilité des systèmes critiques.

- **Applications**

- Maintenance des machines électriques : Détection de défauts dans les moteurs, transformateurs et alternateurs (échauffement, vibrations, isolement) ;
- Surveillance des réseaux de distribution : Localisation des défauts : court-circuit, rupture de câble), analyse de la qualité de l'énergie (harmoniques, creux de tension) ;
- Automatisation industrielle : Diagnostic embarqué dans les automates programmables pour détecter les erreurs de capteurs, d'actionneurs ou de logique de commande ;
- Systèmes de production d'énergie renouvelable : Surveillance des panneaux photovoltaïques, onduleurs, et éoliennes pour optimiser le rendement ;
- Smart grids et réseaux intelligents : Diagnostic distribué pour gérer les flux d'énergie, détecter les anomalies, et améliorer la résilience du réseau ;
- Maintenance prédictive via l'IoT : Utilisation de capteurs connectés et d'algorithmes pour anticiper les défaillances avant qu'elles ne surviennent.

- **Avancées récentes**

IA pour le diagnostic, capteurs intelligents, analyse de données massives, Diagnostic par apprentissage profond (Deep Learning), Maintenance prédictive via l'IoT industriel (IIoT), Jumeaux numériques pour la simulation et le diagnostic, Cybersécurité intégrée au diagnostic, Analyse de la qualité de l'énergie en temps réel, Automatisation du diagnostic embarqué, Fusion de données multisources⁴³.

- **Perspectives**

- Intégration de l'intelligence artificielle explicable (XAI) (Vers des systèmes de diagnostic capables non seulement de détecter les pannes, mais aussi d'expliquer leurs décisions de manière compréhensible pour les ingénieurs).
- Déploiement massif de capteurs intelligents et auto-diagnostiques (Les équipements électriques intégreront des capteurs capables de surveiller leur propre état et de signaler les anomalies sans intervention humaine).
- Diagnostic collaboratif en réseau (edge + cloud) (Les systèmes distribués combineront le traitement local (edge computing) et l'analyse globale (cloud) pour un diagnostic rapide, coordonné et évolutif).
- Utilisation des jumeaux numériques dans les réseaux intelligents (Les répliques virtuelles permettront de simuler des scénarios de panne, d'optimiser les interventions et de tester des solutions sans risque réel).
- Diagnostic adaptatif basé sur le contexte opérationnel (Les algorithmes tiendront compte des conditions environnementales, de la charge, et de l'historique pour ajuster dynamiquement les seuils de détection).

⁴³ Combinaison de mesures électriques, thermiques, vibratoires et acoustiques pour un diagnostic global et plus fiable.

- Standardisation des protocoles de diagnostic interopérables (Vers des normes universelles permettant aux équipements de différents fabricants de communiquer et de partager des données de diagnostic).



Tablette dédiée à la surveillance

Figure I.40. Exemples d'IHM(s) dédiées à la supervision

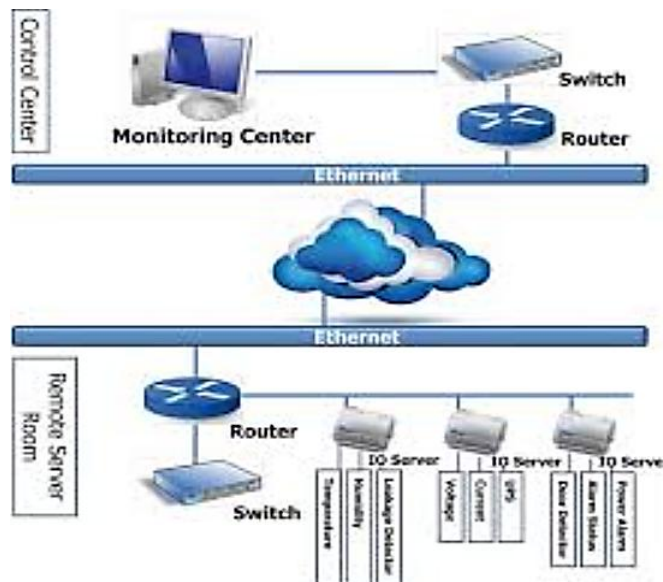


Figure I.41. Principe d'une plateforme de supervision



Figure I.42. Opération de diagnostic sur un véhicule automobile

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Le diagnostic industriel s'appuie d'abord sur la théorie des systèmes dynamiques, qui permet de modéliser les comportements normaux et défectueux des procédés. La théorie de l'identification des systèmes, fondée sur les méthodes statistiques et l'algèbre linéaire, est utilisée pour extraire des modèles à partir des données de fonctionnement.

Les outils des transformées de Fourier et en ondelettes servent à analyser les signaux et détecter des anomalies fréquentielles ou transitoires. La théorie des observateurs, notamment de ceux de Luenberger et de Kalman, fournit des estimateurs d'état capables de révéler des défauts non mesurables directement. Les méthodes de détection basées sur les résidus utilisent l'algèbre matricielle et les fonctions de transfert pour comparer le comportement attendu et observé. Les techniques probabilistes⁴⁴ et bayésiennes⁴⁵ permettent de modéliser l'incertitude et d'évaluer la vraisemblance des scénarios de panne. L'analyse multivariée, incluant les méthodes de corrélation, est mobilisée pour diagnostiquer des systèmes complexes à variables multiples.

5.6.4 Autres filières de l'automatique

- **Robotique et mécatronique** : Disciplines intégrées qui associent mécanique, électronique, automatique et informatique pour concevoir des systèmes intelligents. Elles visent à développer des machines capables d'exécuter des tâches complexes, avec précision, autonomie et interaction avec leur environnement.
- **Automatismes électromécaniques et électrotechniques** : Disciplines qui intègrent moteurs, actionneurs, capteurs et circuits électriques pour réaliser des systèmes de commande automatisés. Elles visent à concevoir, analyser et optimiser des dispositifs industriels capables de transformer l'énergie électrique en mouvements contrôlés et fiables.
- **Automatismes pneumatiques et hydrauliques** : Disciplines qui exploitent l'hydraulique et le pneumatique pour piloter et automatiser des mouvements ou opérations. Elles visent à concevoir et optimiser des architectures de contrôle utilisant la pression et le débit des fluides afin d'assurer puissance, précision et fiabilité dans les environnements industriels.
- **Domotique** : Discipline qui intègre électronique, informatique et contrôle pour gérer intelligemment les équipements d'un bâtiment. Elle vise à optimiser confort, sécurité, efficacité énergétique et communication entre systèmes grâce à des technologies interconnectées.
- **Nanotechnologies et microsystèmes** (perspective émergente) : Disciplines qui étudient, conçoivent et fabriquent des dispositifs à l'échelle nanométrique et micrométrique. Elles visent à intégrer matériaux, capteurs et actionneurs miniaturisés pour développer des systèmes innovants en électronique, biomédecine et industrie.



Figure I.43. Robot humanoïde et à usage agricole

⁴⁴ Méthodes mathématiques qui utilisent la théorie des probabilités pour modéliser, analyser et prédire le comportement incertain ou aléatoire des systèmes industriels.

⁴⁵ Méthodes probabilistes qui utilisent le théorème de Bayes pour mettre à jour la probabilité d'un événement ou d'un modèle en fonction de nouvelles observations.



Figure 1.44. Exemple de vérin et distributeur pneumatiques industriels

6. Télécommunications

6.1. Généralités

- **Définition**

Branche des sciences et technologies de l'ingénieur qui étudie, conçoit et met en œuvre les systèmes de transmission, de réception et de traitement de l'information à distance, sous forme de signaux analogiques ou numériques.

Elle couvre les réseaux de communication, les protocoles, les systèmes embarqués, et les infrastructures physiques et logicielles permettant l'échange de données entre entités distantes.

- **Historique**

- Révolution électromagnétique XIXe siècle : Télégraphe électrique (1837), téléphone (1876), radio 1895 ;
- Naissance des télécommunications modernes 1900-1950 : Réseaux téléphoniques filaires, Radiodiffusion : stations AM/FM, télévision : premières transmissions vidéo (1930s) ;
- Numérisation et réseaux 1950-1990 : Télécommunications numériques, satellites de communication, réseaux informatiques ;
- Internet, mobile et convergence 1990-2010 : Internet grand public, téléphonie mobile, générations GSM (2G), UMTS (3G), LTE (4G), convergence voix/données/vidéo, fibre optique) ;
- Télécommunications intelligentes 2010-2025 : 5G et bientôt 6G, Internet des objets (IoT), Edge computing et cloud, cybersécurité et souveraineté numérique).

- **Applications**

La filière des télécommunications trouve ses principales applications dans la conception et l'exploitation des réseaux fixes et mobiles de transmission de données, voix et images (IoT, Télémedecine, Télévision). Elle est au cœur du développement des infrastructures mobiles (4G, 5G, et futures 6G en préparation) assurant une connectivité haut débit et fiable.

Les télécommunications permettent l'intégration des systèmes de communication optiques et satellitaires pour couvrir de vastes zones géographiques et garantir la continuité de service. Elles jouent un rôle stratégique dans la mise en place des réseaux d'entreprise et industriels, favorisant la supervision, la sécurité et l'automatisation des procédés. La discipline s'applique également aux services numériques avancés tels que la téléphonie IP, la visioconférence et les plateformes multimédias interactives.

Enfin, elle constitue un pilier pour l'Internet des objets (IoT), les villes intelligentes et les systèmes cyber-physiques, en interconnectant capteurs, machines et utilisateurs dans un environnement global.

- **Avancées récentes**

Les avancées récentes de la filière Télécommunications se matérialisent par la commercialisation des équipements 5G avancés, tels que les stations de base massives MIMO et les antennes intelligentes. Les modules IoT industriels et domestiques, intégrant capteurs miniaturisés et connectivité basse consommation (NB-IoT, LTE-M), sont désormais largement diffusés. Les systèmes de fibre optique de nouvelle génération, incluant la fibre multicœur et les transceivers cohérents, permettent des débits de plusieurs térabits par seconde pour les réseaux métropolitains et dorsaux. Enfin, les routeurs et plateformes de communication unifiée basés sur l'intelligence artificielle sont commercialisés pour assurer une gestion adaptative, sécurisée et éco-énergétique des infrastructures télécoms.

On peut aussi citer les applications concernant les véhicules autonomes, les réalités augmentée et virtuelle, l'agriculture intelligente, les villes connectées, la supervision et l'optimisation énergétique des data centers et des antennes relais.

- **Perspectives**

Les perspectives de la filière Télécommunications s'orientent vers le développement de la 6G, intégrant intelligence artificielle et communications ultra-rapides pour des usages immersifs et critiques. Elles incluent l'expansion des réseaux optiques et satellitaires de nouvelle génération, visant une couverture globale et une efficacité énergétique accrue. Enfin, la convergence avec l'Internet des objets, les systèmes cyber-physiques et les infrastructures intelligentes renforcera la connectivité industrielle et urbaine à grande échelle.

Enfin, la convergence avec l'IoT massif et les systèmes cyber-physiques repose sur des protocoles de communication ultra-fiables (URLLC) et des architectures edge computing, garantissant une interconnexion sécurisée et temps réel des procédés industriels et urbains.



Figure I.45. Fibre optique et boîtier de raccordement

- **Théories fondamentales et outils mathématiques**

Les théories fondamentales nécessaires en télécommunications sont essentiellement la théorie électromagnétique, la théorie des signaux et systèmes, la théorie de l'information (Shannon), la théorie de la modulation et démodulation (AM, FM, PM, QAM, PSK, OFDM, multiplexage fréquentiel et temporel), la théorie du bruit et des canaux aléatoires, la théorie du codage, la théorie des réseaux, la théorie des communications numériques.

Les outils mathématiques couramment utilisés dans le domaine des télécommunications sont l'analyse de Fourier (Transformée de Fourier, spectres en fréquence, séries de Fourier pour décomposition spectrale), la transformation de Laplace et la transformation en Z, l'algèbre linéaire (Matrices, vecteurs, décomposition en valeurs singulières (SVD)), les probabilités et

processus stochastiques (Variables aléatoires, distributions gaussiennes, les probabilités et processus stochastiques (Variables aléatoires, distributions gaussiennes, chaînes de Markov, processus stationnaires), le calcul différentiel et intégral, l'optimisation convexe et non convexe (Programmation linéaire, optimisation sous contraintes), la transformée de Hilbert, l'analyse numérique (Méthodes d'approximation, interpolation, simulation numérique des systèmes), la théorie des graphes : modélisation des réseaux, routage optimal, topologies), les statistiques avancées (Estimation paramétrique, maximum de vraisemblance, filtrage de Kalman).

6.2. Ondes électromagnétiques

- **Définition d'une onde électromagnétique**

Les ondes électromagnétiques jouent un rôle fondamental dans le domaine du génie électrique. Elles interviennent dans la transmission de l'énergie, les télécommunications, les systèmes radar, et de nombreux capteurs. Comprendre leur nature, leur propagation et leur spectre est essentiel pour maîtriser les technologies modernes.

Une onde électromagnétique est une perturbation des champs électrique et magnétique qui se propage dans l'espace. Ces champs sont perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation. En milieu vide, la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques est donnée par la relation suivante :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}}$$

où c représente la vitesse de la lumière dans le vide ($\approx 3 \times 10^8$ m/s), μ_0 est la perméabilité du vide et ϵ_0 la permittivité du vide.

La relation entre la vitesse, la fréquence et la longueur d'onde est donnée par :

$$c = \lambda \cdot f$$

La figure suivante illustre la propagation d'une onde électromagnétique dans l'espace. Le champ électrique \vec{E} et le champ magnétique \vec{B} sont perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation \vec{k} .

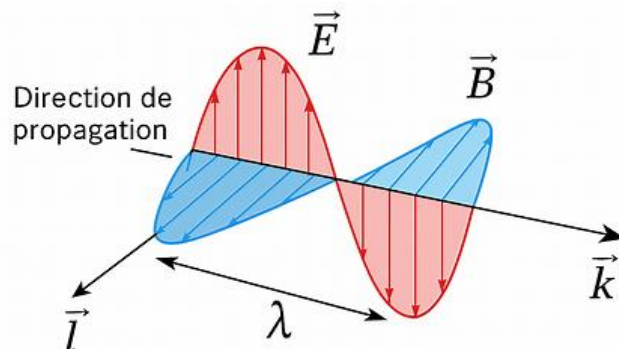


Figure I.46. Propagation d'une onde électromagnétique (\vec{E} en rouge, \vec{B} en bleu, \vec{k} vers la droite)

Le spectre électromagnétique est l'ensemble continu des ondes électromagnétiques classées selon leur fréquence ou leur longueur d'onde. Il regroupe l'ensemble des ondes classées selon leur fréquence ou longueur d'onde. Il comprend les ondes radio, micro-ondes, infrarouge, lumière visible, ultraviolet, rayons X et rayons gamma.

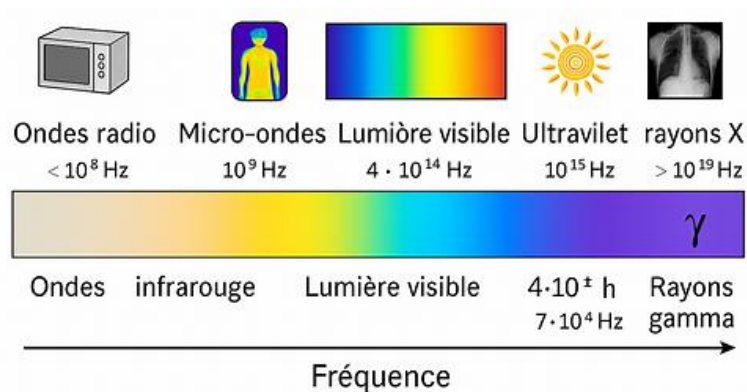


Figure I.47. Spectre électromagnétique avec illustrations des applications pour chaque bande de fréquence

Les principales bandes du spectre électromagnétique, avec leurs intervalles de fréquence en Hertz et leurs applications typiques sont données par le tableau ci-dessous :

Bande	Intervalle de fréquence (Hz)	Applications principales
Ondes radio	10^3 à 10^9	Radiodiffusion, téléphonie mobile, radio amateur
Micro-ondes	10^9 à 10^{11}	Radar, four micro-ondes, Wi-Fi, transmission satellite
Infrarouge (IR)	10^{11} à $4 \cdot 10^{14}$	Thermographie, capteurs de chaleur, télécommandes
Lumière visible	$4 \cdot 10^{14}$ à $7 \cdot 10^{14}$	Vision humaine, optique, éclairage
Ultraviolet (UV)	10^{15} à 10^{16}	Stérilisation, détection chimique, bronzage
Rayons X	10^{16} à 10^{19}	Imagerie médicale, contrôle industriel, radiographie
Rayons gamma (γ)	$> 10^{19}$	Traitement du cancer, physique nucléaire, stérilisation

Les ondes électromagnétiques sont utilisées dans de nombreuses applications :

- Télécommunications : transmission de données via ondes radio et micro-ondes ;
- Radar : détection d'objets et mesure de distance ;
- Transfert d'énergie sans fil : induction magnétique, recharge sans fil ;
- Imagerie : IR pour thermographie, rayons X pour radiographie ;
- Capteurs : détection de mouvement, de température, de lumière ;

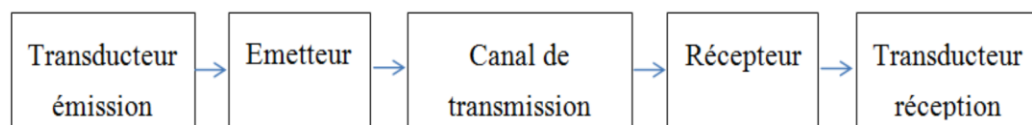
La compréhension des ondes électromagnétiques est indispensable pour les ingénieurs en génie électrique. Elle permet de concevoir des systèmes de communication, de détection et de conversion d'énergie efficaces et adaptés aux besoins technologiques actuels.

- **Désignation et répartition des ondes**

- TLF : Enormément Basses Fréquences (Tremendously Low Frequencies)
- ELF : Extrêmement Basses Fréquences (Extremely Low Frequencies)
- SLF : Super Basses Fréquences (Super Low Frequencies)
- ULF : Ultra Basses Fréquences (Ultra Low Frequencies)
- VLF : Très Basses Fréquences (Very Low Frequencies)
- LF : Basses Fréquences (Low Frequencies)
- MF : Moyennes Fréquences (Medium Frequencies)
- HF : Hautes Fréquences (High Frequencies)
- OC : Radiodiffusion Ondes Courtes (SW Short Wave)
- VHF : Très Hautes Fréquences (Very High Frequencies)
- UHF : Ultra Hautes Fréquences (Ultra High Frequencies)
- SHF : Super Hautes Fréquences (Super High Frequencies)

- **Chaîne de transmission d'informations**

Une communication correspond à l'échange d'information, sous forme de signal, entre un émetteur et un récepteur à l'aide d'un canal de transmission.



- Transducteur à l'émission : microphone, clavier, caméra, ...
- Emetteur : codage, modulation, amplification
- Canal de transmission : câbles, fibres optiques, ondes radio, ...
- Récepteur : filtrage, démodulation, décodage, amplification
- Transducteur à la réception : Haut-parleur, écran, ...

Figure I.48. Structure générale d'une chaîne de transmission de l'information

6.3 Théorie des signaux et systèmes

La théorie des signaux et systèmes en télécommunications est une discipline fondamentale qui étudie la manière dont les informations, représentées sous forme de signaux, sont générées, transformées, transmises et reçues à travers divers systèmes.

Elle constitue le socle de l'ingénierie des télécommunications et s'intéresse d'abord à la notion de signal, défini comme une fonction mathématique représentant une information physique (voix, image, données numériques). Ces signaux peuvent être continus (analogiques) ou discrets (numériques), et leur analyse repose sur des outils comme la transformée de Fourier ou la transformée de Laplace, permettant de les étudier en domaine fréquentiel ou temporel.

Un système, quant à lui, est une entité qui agit sur un signal pour le modifier, l'amplifier, le filtrer ou le transmettre. Dans les télécommunications, un système peut être un filtre électronique, un canal de transmission, ou un dispositif de modulation. La théorie des systèmes s'appuie sur des concepts tels que la linéarité, la causalité, et l'invariance dans le temps, qui garantissent une compréhension rigoureuse du comportement des dispositifs.

Cette discipline est essentielle car elle permet de modéliser et de prédire la réponse d'un système à un signal donné. Par exemple, un signal vocal $x(t)$ peut être transmis à travers un canal de communication qui introduit du bruit ou des distorsions, produisant un signal de sortie $y(t)$. L'étude de cette relation entrée-sortie est au cœur de la théorie.

En pratique, la théorie des signaux et systèmes est utilisée pour :

- Filtrage des signaux (élimination du bruit),
- Modulation et démodulation (conversion des signaux pour la transmission),
- Compression et codage (réduction de la taille des données),
- Analyse spectrale (étude des fréquences contenues dans un signal).

Elle fournit également un langage universel pour décrire les phénomènes de transmission et de traitement de l'information, reliant les mathématiques aux applications concrètes comme la téléphonie, l'Internet, ou la télévision numérique.

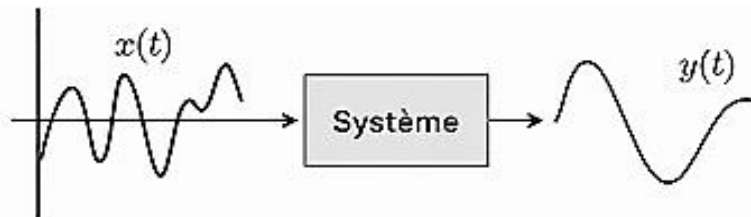


Figure I.49. Illustration schématique montrant un signal d'entrée $x(t)$, un système qui agit sur ce signal et un signal de sortie $y(t)$, transformé et adapté.

En résumé, cette théorie explique comment un signal brut est transformé par un système pour devenir exploitable, fiable et transmissible. Elle est donc indispensable pour concevoir des réseaux performants et assurer la qualité des communications modernes.

6.4. Modulation, démodulation et chaîne de transmission

La modulation et la démodulation sont des processus essentiels dans la chaîne de transmission en télécommunications, permettant d'adapter les signaux pour leur propagation efficace et leur récupération fidèle.

En télécommunications, la modulation consiste à insérer un signal d'information (voix, données, image) dans une onde porteuse de fréquence plus élevée, afin de le rendre compatible avec le canal de transmission choisi (câble, fibre optique, ondes hertziennes). Ce procédé permet de réduire la taille des antennes, éviter les interférences entre signaux, et optimiser la portée.

Il existe plusieurs types de modulation chacune adaptée à des contextes spécifiques :

- la modulation d'amplitude (AM),
- la modulation de fréquence (FM),
- la modulation de phase (PM).

La chaîne de transmission est l'ensemble des étapes permettant à un signal de voyager de l'émetteur au récepteur.

Elle comprend :

- L'émetteur, qui prépare et module le signal.
- Le canal de communication, qui transporte le signal modulé (avec risques d'atténuation, bruit, distorsion).
- Le récepteur, qui applique la démodulation pour extraire le signal d'origine.

La démodulation est donc l'opération inverse de la modulation : elle récupère le signal utile à partir de l'onde modulée reçue. Elle garantit la fidélité de la transmission et la qualité du service.

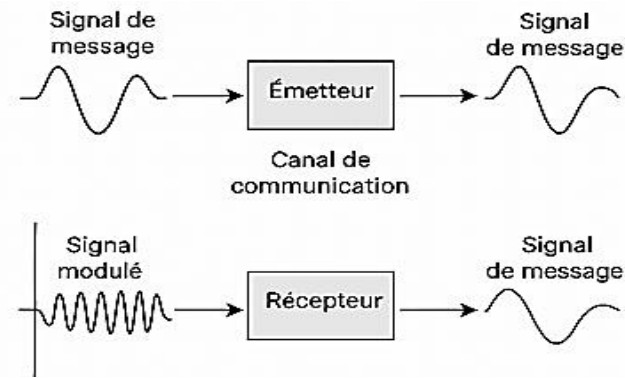


Figure 1.50. Illustration schématique de la modulation-démodulation dans une chaîne de transmission

Ce processus est omniprésent dans les systèmes modernes : téléphonie mobile, radio, télévision, Internet, satellite. Par exemple, dans une communication radio, la voix est modulée en fréquence, transmise par ondes électromagnétiques, puis démodulée au niveau du récepteur pour être audible.

6.5. Supports et canaux de transmission

- **Câbles**

- Câble bifilaire, de bande passante faible et réservé pour les transmissions à bas débit (inférieur à 2 Mbits/s pour le réseau téléphonique).
- Câble coaxial : de bande passante plus importante et qui permet de réaliser des transmissions avec un débit relativement élevé (jusqu'à 565 Mbits/s sur le réseau téléphonique).



Figure 1.51. Câbles bifilaires et coaxiaux

- **Fibres optiques**

Les fibres optiques sont des guides d'ondes diélectriques cylindriques qui confinent et propagent l'énergie électromagnétique, principalement dans le spectre visible et proche infrarouge.

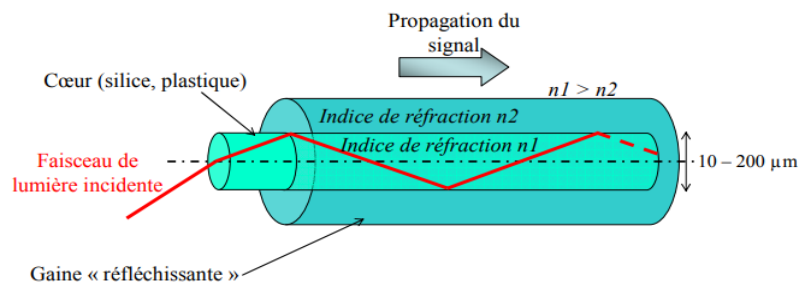


Figure 1.52. Principe de la transmission par fibre optique

- **Ondes électromagnétiques**

Les radiocommunications utilisent la propagation d'une onde électromagnétique dans l'atmosphère. Ce milieu est généralement réservé aux transmissions par satellite ou par faisceaux hertziens ainsi qu'aux communications mobiles.

6.6 Réseaux et protocoles

Les réseaux et protocoles en télécommunications constituent l'ossature invisible qui permet aux appareils de communiquer, d'échanger des données et d'accéder à des services numériques à travers le monde. Un réseau de télécommunications est un ensemble d'équipements interconnectés (ordinateurs, téléphones, serveurs, routeurs, commutateurs) qui échangent des informations sous forme de signaux numériques ou analogiques.

Ces réseaux peuvent être :

- Locaux (LAN) : à l'échelle d'un bâtiment ou d'un campus,
- Étendus (WAN) : reliant plusieurs sites géographiques,
- Mondiaux (Internet) : interconnectant des millions de réseaux.

Pour que ces échanges soient possibles, il faut des protocoles de communication, qui sont des règles normalisées définissant comment les données sont :

- formatées (structure des paquets),
- adressées (identification des destinataires),
- transmises (acheminement via les routeurs),
- reçues (réassemblage et interprétation),
- sécurisées (cryptage, authentification).

Parmi les protocoles les plus utilisés :

- TCP/IP : fondement de l'Internet, assurant la fiabilité des transmissions,
- HTTP/HTTPS : pour la navigation web,
- DNS : traduit les noms de domaine en adresses IP⁴⁶,
- Ethernet : pour les connexions filaires,
- Wi-Fi : pour les connexions sans fil.

Ces protocoles sont organisés en couches fonctionnelles, selon le modèle OSI (Open Systems Interconnection), qui comprend 7 niveaux :

- Physique : transmission électrique ou optique,
- Réseau : routage des paquets⁴⁷,
- Session : gestion des connexions,
- Application : interface utilisateur.
- Liaison de données : détection des erreurs,
- Transport : fiabilité et contrôle de flux,
- Présentation : format des données,

Chaque couche communique avec les couches adjacentes pour assurer une transmission fluide et cohérente. Cette architecture modulaire permet une interopérabilité entre équipements de différents fabricants et une évolutivité du réseau.

En résumé, les réseaux et protocoles permettent à des milliards d'appareils de communiquer sans confusion, avec fiabilité, sécurité et rapidité. Ils sont la colonne vertébrale de l'Internet moderne, des communications mobiles, et des systèmes embarqués.

⁴⁶ Identifiant numérique unique attribué à chaque appareil connecté à un réseau pour permettre son identification et sa communication. Elle peut être de type IPv4 (ex. 192.168.1.1) ou IPv6 (ex. 2001:0db8::1).

⁴⁷ Processus par lequel les données, découpées en paquets, sont dirigées à travers un réseau pour atteindre leur destination. Il repose sur des algorithmes et des tables de routage qui déterminent le chemin optimal entre l'émetteur et le récepteur

6.7 Communications numériques et systèmes mobiles

Les communications numériques et les systèmes mobiles sont au cœur des télécommunications modernes, permettant la transmission rapide, fiable et sécurisée d'informations entre appareils connectés, en particulier dans les environnements sans fil.

Les communications numériques reposent sur la conversion des données (voix, texte, image, vidéo) en signaux numériques, c'est-à-dire en suites de bits (0 et 1). Ces signaux sont plus robustes face au bruit, plus faciles à compresser et à sécuriser, et permettent une transmission efficace sur de longues distances. Contrairement aux signaux analogiques, les signaux numériques peuvent être modulés⁴⁸, multiplexés⁴⁹ et cryptés⁵⁰ pour répondre aux exigences des réseaux modernes.

La modulation numérique consiste à adapter les bits à une onde porteuse pour qu'ils puissent être transmis sur un canal physique. Des techniques comme QAM (Quadrature Amplitude Modulation), PSK (Phase Shift Keying) ou OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) sont utilisées dans les réseaux mobiles pour optimiser la bande passante et réduire les interférences.

Les systèmes mobiles exploitent ces principes pour offrir une connectivité sans fil entre les utilisateurs. Ils s'appuient sur des infrastructures comme les stations de base, les antennes relais, et les réseaux cellulaires. Ces systèmes sont organisés en cellules géographiques, chacune desservie par une antenne, permettant une couverture étendue et une gestion efficace du trafic.

Les générations de réseaux mobiles (2G, 3G, 4G, 5G) illustrent l'évolution technologique :

- 2G : Voix et SMS,
- 3G : Internet mobile,
- 4G : Haut débit et streaming,
- 5G : Ultra-haut débit, faible latence, IoT massif.

La démodulation au niveau du récepteur permet de récupérer les données originales à partir du signal reçu. Des techniques comme la correction d'erreurs, l'estimation de canal, et le codage adaptatif assurent la fiabilité et la qualité de la transmission.

Ces technologies sont omniprésentes dans notre quotidien : appels téléphoniques, navigation web, visioconférences, géolocalisation, objets connectés, véhicules autonomes. Elles permettent une mobilité totale, une connectivité permanente, et une intégration intelligente des services numériques.

En conclusion, les communications numériques et systèmes mobiles forment l'infrastructure invisible qui relie les individus, les machines et les services dans un monde interconnecté. Elles sont la colonne vertébrale de la société numérique contemporaine.

⁴⁸ Signifie que les signaux d'information sont transformés en modifiant une caractéristique d'une onde porteuse (amplitude, fréquence ou phase). Cela permet leur transmission efficace sur un canal de communication.

⁴⁹ Procédé permettant de transmettre plusieurs signaux ou flux de données simultanément sur un même canal de communication. Cela optimise l'utilisation de la bande passante en combinant plusieurs sources d'information, qui sont ensuite séparées à la réception.

⁵⁰ Signifie que les données sont transformées grâce à des algorithmes afin de les rendre illisibles pour toute personne non autorisée. Ce procédé garantit la confidentialité et la sécurité des informations transmises.

6.8. Filières des télécommunications

- **Télécommunications radio et optiques (ou Communications radiofréquences et optiques) :** Transmission de données, radiofréquences, antennes, fibre optique, 5G/6G.
- **Optoélectronique et photonique :** LED, lasers, capteurs optiques, fibres optiques.
- **Téléphonie fixe et mobile :** Gestion des réseaux vocaux traditionnels et cellulaires (4G/5G).
- **Réseaux internet fixes et mobiles :** Déploiement de la fibre optique, broadband et accès haut débit.
- **Télévision et diffusion :** Services par câble, satellite, TNT et streaming numérique.
- **Services de données et messagerie :** Transmission de données, SMS, e-mails et applications cloud.
- **Sécurité et réseaux :** Cybersécurité, ingénierie des infrastructures et maintenance des équipements.

7. Conclusion

En conclusion, ce chapitre concernant les familles du génie électrique met en évidence la vitalité et la diversité des disciplines et des applications du génie électrique. Les avancées récentes et les perspectives d'avenir, notamment dans les domaines des réseaux intelligents, de l'électronique de puissance des énergies renouvelables, de l'électronique biomédicale, de l'automatique et des télécommunications témoignent d'une dynamique d'innovation soutenue. La richesse des applications, allant de l'industrie aux transports, en passant par la santé et les technologies de l'information, confirme le rôle central du génie électrique. Les différentes spécialités montrent une volonté constante d'améliorer les performances, la fiabilité et l'efficacité énergétique des systèmes. L'importance croissante de l'intégration numérique et de l'interdisciplinarité sont soulignés. Cette synthèse révèle des tendances fortes, mais aussi des défis à relever pour répondre aux besoins futurs. Ainsi, le génie électrique apparaît comme un champ en perpétuelle évolution, ouvert à des perspectives prometteuses. Ce panorama constitue une base solide pour orienter les recherches et renforcer l'impact des innovations à venir.

Chapitre 2

Impact du génie électrique sur le développement de la société

Impact du génie électrique sur le développement de la société

1. Introduction

Le génie électrique constitue aujourd'hui l'un des piliers fondamentaux du développement socio-économique des sociétés modernes. Plus qu'un ensemble de techniques dédiées à la production, au transport, à la conversion ou au contrôle de l'énergie électrique, il représente un vecteur essentiel de progrès, de modernisation et d'innovation. Son impact s'étend à pratiquement tous les secteurs d'activité, qu'il s'agisse de l'industrie, du transport, de la santé, des télécommunications, de l'agriculture, de l'environnement ou encore de l'éducation. Ainsi, comprendre l'influence profonde du génie électrique sur la société est indispensable pour tout étudiant se destinant aux métiers de l'ingénierie électrique, car cela lui permet de situer son futur rôle dans un contexte global où les enjeux technologiques, énergétiques et socio-économiques sont plus complexes que jamais.

Le développement économique d'un pays est intimement lié à la fiabilité, à l'extension et à l'efficacité de son infrastructure électrique. Une industrie performante ne peut exister sans une alimentation électrique stable et de qualité. Les établissements de santé, les systèmes de transport, les réseaux de télécommunication, les services publics et les institutions éducatives dépendent tous directement de la disponibilité de l'électricité. Chaque progrès dans le domaine du génie électrique se répercute donc immédiatement sur le fonctionnement de la société, sur la création d'emplois, sur la compétitivité industrielle et sur la qualité de vie des citoyens.

Historiquement, l'introduction de l'électricité a été l'un des événements les plus marquants de la modernité. L'accès à l'éclairage, à la production mécanisée et aux premiers réseaux de transport électrique a bouleversé les structures sociales en supprimant des barrières temporelles, en réduisant la pénibilité du travail et en ouvrant la voie à une transformation massive de l'économie. L'électrification rurale, quant à elle, a permis d'atténuer les disparités territoriales et a offert à des millions de personnes la possibilité de participer au développement économique national.

Aujourd'hui, l'impact socio-économique du génie électrique est encore plus visible. Il se manifeste notamment à travers la transition énergétique, qui repose sur l'intégration à grande échelle des sources d'énergie renouvelables, sur la modernisation des réseaux électriques et sur l'adoption de nouvelles technologies comme les systèmes de stockage, les micro-réseaux intelligents et l'électromobilité. Par ailleurs, la numérisation croissante des systèmes électriques via l'Internet des objets, les capteurs intelligents, l'analyse de données massives et l'intelligence artificielle, rend encore plus indispensable le rôle de l'ingénieur electricien dans la conception, le pilotage et la sécurisation de ces infrastructures.

L'ingénieur du XXI^e siècle doit ainsi disposer d'une vision globale et interdisciplinaire, capable de relier les aspects techniques aux enjeux de société tels que l'inclusion énergétique, la durabilité environnementale, la souveraineté technologique ou encore la transition vers une économie bas carbone.

2. Approche historique du génie électrique

L'histoire du génie électrique est pleine de grandes avancées qui ont changé nos sociétés économiquement, socialement, scientifiquement et même culturellement. À la fin du 19^e siècle, l'arrivée des premiers générateurs, moteurs électriques, lampes et réseaux électriques urbains a lancé une révolution. L'éclairage public a tout de suite changé nos vies, permettant d'être actif le soir et la nuit, rendant les villes plus sûres, boostant le commerce et créant une nouvelle façon de vivre ensemble. L'électrification des usines a été un changement encore plus grand. L'usage croissant des moteurs électriques a remplacé la vapeur et la force de l'eau, rendant la production plus adaptable, fiable et efficace. Cette transformation a augmenté énormément la capacité des industries des pays, changeant l'économie en baissant les coûts de production. Elle a aussi lancé de nouveaux métiers liés à l'entretien, à la conception des systèmes électriques et au développement des réseaux de distribution. Dans les décennies qui ont suivi, le déploiement massif des réseaux nationaux de transport et de distribution haute tension, notamment après la seconde guerre mondiale, a permis la démocratisation de l'accès à l'électricité. Ce phénomène a eu des répercussions majeures sur le développement humain. L'accès à l'énergie a facilité la modernisation de l'agriculture, favorisant la mécanisation des cultures et améliorant la productivité alimentaire. Dans les zones rurales, l'électrification a permis l'apparition de nouveaux services éducatifs et sanitaires contribuant ainsi à réduire les disparités entre les régions.

Entre 1980 et 2000, l'évolution des systèmes électroniques, de l'informatique et des télécommunications a marqué le début d'une nouvelle ère dans le domaine du génie électrique. La réduction de la taille des composants électroniques, l'émergence des microprocesseurs et la diffusion des ordinateurs ont engendré ce que certains désignent comme une révolution numérique. Cette transformation a favorisé l'apparition de nouveaux secteurs économiques ancrés dans l'électronique et les technologies de l'information, tels que les télécommunications, Internet, la robotique et l'industrie des semiconducteurs. Ces avancées sont accompagnées d'un bouleversement socioéconomique significatif, donnant naissance à une économie mondialisée, à un commerce électronique, ainsi qu'à de nouvelles modalités de travail et de communication.

Depuis les années 2000, le génie électrique est devenu progressivement le moteur de la transition énergétique. La nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et l'épuisement progressif des ressources fossiles ont conduit à une transformation profonde des systèmes énergétiques. Le développement du photovoltaïque, de l'éolien, des réseaux intelligents et des systèmes de stockage a modifié la manière dont les sociétés produisent, distribuent et consomment l'électricité. Ce progrès a aussi créé des débouchés économiques, comme la création d'industries vertes, une production énergétique locale et de nouvelles boîtes spécialisées dans la gestion de l'énergie.

Le génie électrique, un élément essentiel des infrastructures actuelles, a une forte influence sur nos sociétés, grâce aux technologies qu'il rend possibles, mais aussi grâce aux changements économiques, sociaux et culturels qu'il entraîne. L'un des premiers impacts importants est la modification des systèmes de production.

Avec l'introduction massive d'automatismes, de systèmes électromécaniques avancés et de procédés d'électronique de puissance, les chaînes de production sont devenues plus rapides, plus homogènes et moins dépendantes de la main d'œuvre pour les tâches répétitives. Cette évolution a permis d'accroître la compétitivité des entreprises, d'améliorer la qualité des biens produits et de réduire les coûts unitaires.

Cependant, elle a également transformé les compétences requises dans l'industrie, faisant apparaître une demande croissante en techniciens et ingénieurs capables d'opérer, de maintenir et d'optimiser des systèmes complexes. Cette mutation du marché du travail constitue un des aspects les plus significatifs des impacts socioéconomiques du génie électrique.

Le deuxième impact majeur se trouve dans la transformation des modes de vie. L'accès à l'électricité, d'abord cantonné aux zones urbaines, s'est progressivement étendu aux régions rurales, modifiant profondément la qualité de vie, les activités économiques locales et les dynamiques démographiques. Lorsque l'électrification parvient dans une localité isolée, elle ouvre de nouvelles possibilités telles que la réfrigération des produits agricoles, l'utilisation d'appareils électriques pour l'artisanat, l'éclairage prolongé, l'accès à l'information et la possibilité de développer des micro-entreprises. L'électricité devient ainsi un levier de réduction des inégalités territoriales et un facteur d'inclusion socio-économique. Dans de nombreuses régions du monde, les programmes d'électrification rurale ont été associés à une amélioration du niveau d'éducation et à une baisse de la pauvreté, confirmant le rôle structurant du génie électrique dans le développement humain.

Sur le plan industriel, les réseaux électriques intelligents représentent une évolution stratégique majeure. Leur déploiement permet de répondre aux défis contemporains liés à la consommation croissante, à l'intégration des sources renouvelables intermittentes et à la nécessité d'accroître la résilience des infrastructures critiques. L'utilisation de capteurs distribués, d'algorithmes d'optimisation et de systèmes de supervision avancés permet non seulement de réduire les pertes électriques, mais améliore également la gestion de la demande, ce qui se traduit par une meilleure allocation des ressources énergétiques et une diminution des coûts pour les consommateurs. Ces gains d'efficacité ont des répercussions directes sur la compétitivité globale de l'économie, car l'énergie constitue un facteur transversal affectant l'ensemble des secteurs productifs.

L'impact sur la santé et la sécurité constitue une autre dimension essentielle. L'amélioration des normes de protection, l'évolution des dispositifs de coupure et de surveillance, ainsi que l'introduction de systèmes de protection à haute sensibilité ont drastiquement réduit les accidents d'origine électrique, tant dans les foyers que dans les industries. Le génie électrique contribue également au développement de technologies médicales cruciales, telles que l'imagerie par résonance magnétique, les respirateurs, les défibrillateurs, les lasers médicaux et les instruments de monitoring. Ces systèmes, hautement dépendants de l'électrotechnique et de l'électronique de puissance, renforcent les capacités de diagnostic, augmentent l'efficacité des traitements et améliorent la longévité de la population.

Un autre aspect des impacts socio-économiques réside dans la transition énergétique, où le génie électrique occupe une place centrale. Le passage progressif des systèmes basés sur les énergies fossiles vers des technologies propres repose en grande partie sur la maîtrise des systèmes photovoltaïques, éoliens, hydroélectriques et sur les innovations en matière de stockage d'énergie. Ces évolutions créent de nouveaux emplois qualifiés et stimulent l'apparition de secteurs industriels émergents tels que les fabricants d'onduleurs, les concepteurs de batteries avancées et les entreprises spécialisées dans l'ingénierie des réseaux intelligents. Elles permettent également de réduire la dépendance énergétique des États, ce qui renforce leur souveraineté économique. La transition énergétique est donc à la fois une réponse à l'urgence climatique et un moteur de transformation économique profonde.

Sur le plan géopolitique, les technologies du génie électrique influencent également les rapports de force entre nations. Les pays capables de maîtriser les infrastructures électriques, de produire leurs

propres équipements stratégiques et de sécuriser leurs réseaux face aux cybermenaces disposent d'un avantage compétitif notable. Les conflits récents ont montré que les réseaux électriques peuvent devenir des cibles critiques, soulignant la nécessité d'investir dans la résilience, la cybersécurité et la capacité de rétablissement rapide. Ainsi, le génie électrique ne se limite plus à la production d'énergie ou à l'automatisation ; il s'inscrit pleinement dans les stratégies de défense et de protection nationale. En matière d'éducation et de formation, les impacts sont tout aussi considérables. Le développement rapide des technologies électriques exige une révision permanente des curricula universitaires⁵¹ afin de préparer les étudiants aux évolutions constantes de leur future profession. Les établissements sont contraints d'intégrer des modules d'électrotechnique, d'électronique, d'intelligence artificielle appliquée aux réseaux, d'électronique de puissance avancée et de communication industrielle. Cette dynamique favorise l'émergence d'une nouvelle génération d'ingénieurs, plus polyvalents, plus connectés aux enjeux technologiques actuels et mieux préparés à affronter la complexité croissante des systèmes modernes.

Enfin, le génie électrique transforme profondément la culture technologique au sein des sociétés. Les citoyens sont désormais entourés d'appareils intelligents, de systèmes d'assistance, de dispositifs connectés et de solutions de mobilité électrique. Cette omniprésence contribue à la démocratisation de la technologie, à l'acceptation des innovations et à la création d'un environnement social où la maîtrise des technologies devient une compétence essentielle. L'émergence des véhicules électriques, par exemple, modifie non seulement les habitudes de consommation, mais influence également les infrastructures urbaines, les politiques gouvernementales et la manière dont les villes envisagent leur développement futur.

3. Spécialités du génie électrique et leurs impacts socio-économiques

3.1 Production, transport et distribution de l'énergie électrique

La production d'énergie électrique constitue la pierre angulaire du développement industriel et social. Les ingénieurs électriciens jouent un rôle central dans la conception et l'exploitation des centrales électriques, qu'elles soient thermiques, nucléaires, hydroélectriques ou basées sur les énergies renouvelables. Leur responsabilité ne se limite pas à produire de l'électricité ; elle inclut l'optimisation de la fiabilité, de l'efficacité énergétique et de la durabilité des systèmes. La construction et l'entretien des réseaux de transport à haute tension et des réseaux de distribution moyenne et basse tension sont des activités critiques qui assurent la continuité de l'approvisionnement énergétique. Les impacts socio-économiques de cette spécialité sont profonds et multiples.

Premièrement, un réseau électrique fiable favorise la stabilité économique, en permettant aux entreprises industrielles et commerciales de fonctionner sans interruptions, ce qui attire les investissements nationaux et étrangers.

Deuxièmement, l'accès à l'électricité dans les zones rurales et isolées transforme la vie quotidienne, offrant la possibilité de développer des micro-industries et des infrastructures de santé.

⁵¹ Ensemble structuré des programmes, cours et contenus pédagogiques proposés par une université, organisés selon des objectifs de formation et des standards académiques.

Troisièmement, la production et la distribution d'énergie créent une chaîne complète d'emplois, allant des techniciens de maintenance aux ingénieurs spécialisés dans le contrôle et l'optimisation des réseaux.

Enfin, la diversification des sources d'énergie et l'intégration de solutions renouvelables réduisent la dépendance aux importations de combustibles fossiles, ce qui renforce la souveraineté énergétique et contribue à la résilience économique des pays.

3.2 Machines électriques et entraînements

La spécialité des machines électriques et des systèmes d'entraînement englobe la conception, la commande et l'optimisation de moteurs, alternateurs et générateurs, qu'ils soient synchrones, asynchrones ou à aimants permanents. Les systèmes d'entraînement moderne, intégrant des convertisseurs de puissance et des commandes avancées, permettent un contrôle précis de la vitesse, du couple et de la consommation énergétique.

L'impact socio-économique de cette spécialité est multiple. D'une part, elle permet l'automatisation industrielle, ce qui augmente considérablement la productivité tout en réduisant la consommation énergétique des installations. Cette productivité accrue rend les entreprises plus compétitives sur le marché international. D'autre part, elle favorise l'émergence de filières complètes de formation et de métiers spécialisés, tels que les ingénieurs de maintenance, les concepteurs de moteurs et en systèmes d'entraînement. Enfin, l'amélioration de l'efficacité énergétique des moteurs réduit les coûts opérationnels, ce qui se traduit par une économie significative pour les entreprises et les consommateurs, tout en contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

3.3 Électronique de puissance

L'électronique de puissance est la discipline qui permet de convertir, réguler et distribuer l'énergie électrique avec une efficacité maximale. Elle inclut la conception de convertisseurs AC/DC, DC/DC, AC/AC, d'onduleurs, de redresseurs et de systèmes de commande associés. Ces technologies sont essentielles pour l'intégration des énergies renouvelables, la propulsion des véhicules électriques et le contrôle précis des machines industrielles.

Les impacts socio-économiques sont particulièrement marqués dans le secteur des transports, où les convertisseurs et les onduleurs permettent le développement de véhicules électriques et de trains à grande vitesse, réduisant la dépendance aux combustibles fossiles et diminuant l'empreinte carbone. Dans l'industrie, l'électronique de puissance assure un fonctionnement plus stable et efficace des lignes de production, améliorant la productivité et la qualité des produits. Par ailleurs, le développement et la maintenance de ces systèmes créent des emplois hautement qualifiés et stimulent l'innovation technologique dans les entreprises spécialisées en électronique.

3.4 Automatique et contrôle

L'automatique et le contrôle jouent un rôle stratégique dans la modernisation des processus industriels et des infrastructures critiques. Les ingénieurs de cette spécialité conçoivent et supervisent des systèmes complexes comprenant des capteurs, des actionneurs et des automates programmables. Ces systèmes permettent d'automatiser des tâches répétitives, d'optimiser la consommation énergétique et de garantir la qualité des processus de production.

L'impact socio-économique se manifeste à plusieurs niveaux. Sur le plan industriel, les systèmes automatisés augmentent considérablement la productivité, réduisent les coûts de fabrication et améliorent la qualité des produits. Sur le plan social, l'automatisation libère les opérateurs des

tâches répétitives et pénibles, tout en générant de nouvelles opportunités d'emplois qualifiés dans la programmation, la maintenance et la supervision de ces systèmes. L'introduction de l'automatisation contribue également à renforcer la compétitivité des entreprises sur le marché international, car elle permet de produire des biens plus rapidement, avec moins de déchets et à moindre coût.

3.5 Energies renouvelables et efficacité énergétique

Le génie électrique est aujourd'hui au cœur de la transition énergétique. Les systèmes photovoltaïques, éoliens et hydrauliques, combinés à des solutions de stockage et à des stratégies d'optimisation énergétique, constituent les bases d'une économie durable. Les ingénieurs conçoivent et maintiennent ces systèmes afin d'assurer une production fiable et efficace, tout en maximisant l'intégration au réseau et en minimisant l'impact environnemental.

Les impacts socio-économiques de cette spécialité sont particulièrement importants. L'adoption des énergies renouvelables réduit la dépendance aux combustibles fossiles, stabilise les coûts énergétiques et contribue à la sécurité énergétique nationale. Elle favorise également la création d'emplois dans de nouveaux secteurs, tels que la conception et l'installation de panneaux photovoltaïques, la fabrication de turbines éoliennes, la maintenance de systèmes hybrides et le développement de micro-grids. Sur le plan social, ces technologies permettent l'accès à l'électricité dans les zones rurales et isolées, améliorant l'éducation, la santé et les activités économiques locales. Enfin, la réduction des émissions de CO₂ contribue à limiter les impacts sanitaires et environnementaux, ce qui représente un bénéfice direct pour la société.

3.6 Stockage énergétique moderne

Les systèmes de stockage, incluant les batteries lithium-ion, les supercondensateurs et l'hydrogène, jouent un rôle déterminant dans la stabilisation des réseaux et la transition énergétique. Ces technologies permettent de stocker l'énergie produite de manière intermittente par les sources renouvelables et de la restituer lorsque la demande est forte. Les ingénieurs conçoivent et optimisent ces systèmes pour améliorer leur durée de vie, leur sécurité et leur efficacité.

Les impacts socio-économiques sont considérables. Sur le plan économique, le stockage énergétique permet de réduire les coupures, de stabiliser les prix de l'électricité et d'augmenter la rentabilité des investissements dans les infrastructures renouvelables. Sur le plan social, il contribue à améliorer l'accès à l'énergie, en particulier dans les régions isolées ou à forte variabilité climatique. L'émergence de ces technologies crée également de nouvelles filières industrielles, allant de la recherche et développement à la production, l'installation et la maintenance, générant des emplois hautement qualifiés et stimulant l'innovation technologique.

3.7 Télécommunications et réseaux intelligents

Le génie électrique joue un rôle central dans les télécommunications, qui constituent aujourd'hui un vecteur essentiel de développement économique et social. La conception et l'exploitation des réseaux de télécommunication, qu'ils soient filaires, radio ou satellitaires, permettent la circulation instantanée de l'information, la gestion à distance des infrastructures et le contrôle des systèmes automatisés.

Les impacts socio-économiques sont multiples et profonds. L'accès aux télécommunications favorise le développement de l'économie numérique, la création de nouvelles entreprises, le télétravail, l'e-commerce et les services financiers en ligne. Sur le plan social, il réduit les inégalités en permettant

l'accès à l'information, à l'éducation et aux services de santé à distance. L'innovation dans les réseaux intelligents facilite également la gestion optimisée des ressources énergétiques et la réduction des coûts pour les consommateurs, tout en créant de nouveaux métiers dans le secteur numérique et dans la maintenance des infrastructures critiques.

3.8 Intelligence artificielle appliquée au génie électrique

L'intelligence artificielle (IA) est devenue un levier stratégique pour l'optimisation et la gestion des systèmes électriques. Son intégration permet l'analyse en temps réel de volumes massifs de données provenant des réseaux, des capteurs et des équipements industriels. Les ingénieurs utilisent des algorithmes d'apprentissage automatique pour anticiper les besoins énergétiques, détecter les anomalies, prévoir les pannes et ajuster les flux de production et de distribution de manière proactive.

L'impact socio-économique de l'IA appliquée au génie électrique est très significatif. D'une part, elle contribue à la réduction des coûts opérationnels grâce à une gestion optimisée des ressources et à une maintenance prédictive qui limite les arrêts de production. D'autre part, elle améliore la fiabilité et la sécurité des systèmes électriques, garantissant un approvisionnement continu dans les secteurs critiques tels que les hôpitaux, les transports ou les industries stratégiques. L'IA favorise également la création de nouvelles opportunités professionnelles dans l'analyse de données, la conception d'algorithmes, la cybersécurité énergétique et la gestion des réseaux intelligents. Enfin, sur le plan environnemental et social, l'IA permet de réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à une économie plus durable et à une meilleure qualité de vie pour les populations.

3.9 Smart Grids et transformation socio-économique

Les réseaux électriques intelligents, ou smart grids, représentent une innovation majeure du génie électrique contemporain. Ces systèmes combinent la production décentralisée, les dispositifs de stockage et les technologies de communication avancées pour réguler de manière dynamique les flux d'énergie. Ils permettent de répondre à la variabilité de la production des énergies renouvelables et à la fluctuation de la demande, tout en garantissant une exploitation plus efficace et sécurisée des infrastructures.

Les impacts socio-économiques des smart grids sont multiples et profonds. Sur le plan économique, ils réduisent les pertes énergétiques, optimisent l'utilisation des infrastructures existantes et favorisent l'émergence de nouveaux modèles d'affaires tels que les agrégateurs d'énergie et les services de flexibilité. Sur le plan social, les consommateurs bénéficient d'un accès plus fiable à l'électricité, de tarifs plus compétitifs et de la possibilité de participer activement à la gestion de leur consommation. Les smart grids génèrent également des emplois dans des domaines tels que l'ingénierie des systèmes, l'analyse de données, l'installation et la maintenance des capteurs intelligents et des logiciels de supervision. L'adoption de ces technologies contribue enfin à la transition énergétique, à la réduction des émissions et à la création d'une société plus résiliente face aux risques liés à l'énergie.

4. Electromobilité et transformation de la société

L'électromobilité constitue l'un des domaines les plus visibles de l'application du génie électrique dans la vie quotidienne. Elle englobe les véhicules électriques, les infrastructures de recharge, les systèmes de gestion de batteries et l'intégration des transports au réseau électrique. L'électrification

des transports réduit la dépendance aux carburants fossiles, diminue les émissions de gaz à effet de serre et transforme profondément l'économie des transports.

Les impacts socio-économiques de l'électromobilité sont multiples. Sur le plan industriel, elle stimule la création de nouvelles usines, la production locale de composants critiques tels que les batteries et les onduleurs, et le développement de chaînes de valeur intégrées. Sur le plan social, elle réduit la pollution urbaine, améliore la qualité de vie, diminue les maladies respiratoires et encourage des modes de transport plus durables. Elle transforme également les compétences requises dans le secteur automobile, en favorisant l'émergence de métiers liés à la conception, à la maintenance et à la gestion des véhicules électriques, ainsi qu'au développement des infrastructures de recharge. Enfin, la transition vers l'électromobilité a un impact direct sur la souveraineté énergétique des nations, en diminuant la dépendance aux carburants importés.

5. Cybersécurité appliquée au génie électrique

La numérisation des réseaux et l'intégration de l'IA et des systèmes intelligents ont rendu la cybersécurité indispensable dans le domaine du génie électrique. Les ingénieurs doivent protéger les infrastructures critiques contre les cyberattaques, prévenir les intrusions et garantir l'intégrité des données. Cette spécialité contribue à la résilience économique et à la sécurité nationale.

Les impacts socio-économiques sont très importants. La sécurisation des infrastructures énergétiques évite des pertes économiques massives liées aux interruptions de production et aux dommages matériels. Elle protège également les services essentiels tels que les hôpitaux, les transports et les services financiers. L'essor de la cybersécurité énergétique crée de nouvelles opportunités professionnelles dans l'analyse des risques, la conception de systèmes sécurisés et la gestion des incidents. De plus, il renforce la confiance des consommateurs et des entreprises dans les technologies numériques et énergétiques, favorisant ainsi l'adoption des innovations et le développement économique.

6. Industrie 4.0 et impacts socio-économiques

Le concept d'Industrie 4.0 repose sur la convergence des technologies numériques, de l'intelligence artificielle, de l'Internet des objets et de l'électronique avancée. Dans ce contexte, le génie électrique joue un rôle central en intégrant des capteurs, des systèmes de communication et des dispositifs de contrôle dans les chaînes de production. Les ingénieurs électriciens conçoivent et supervisent des systèmes intelligents capables de surveiller et d'optimiser en temps réel la production, la consommation d'énergie et la maintenance préventive.

Les impacts socio-économiques de l'Industrie 4.0 sont multiples et profonds. Sur le plan industriel, elle permet une réduction significative des coûts de production, une amélioration de la qualité des produits et une augmentation de la flexibilité de fabrication. Cette capacité à adapter rapidement les lignes de production aux fluctuations du marché confère un avantage concurrentiel considérable aux entreprises. Sur le plan social, l'Industrie 4.0 transforme le profil des emplois, en exigeant davantage de compétences spécialisées dans l'automatisation, l'analyse de données et la cybersécurité. Elle libère également les travailleurs des tâches répétitives et pénibles, tout en créant de nouvelles opportunités professionnelles dans la conception, la maintenance et l'optimisation des systèmes intelligents. Sur le plan économique global, cette révolution industrielle favorise l'innovation, attire les investissements étrangers et stimule le développement de nouvelles filières technologiques à forte valeur ajoutée.

7. Défis éthiques, environnementaux et sociétaux

Le développement rapide des technologies électriques soulève également des défis éthiques et environnementaux qu'il est crucial d'intégrer dans l'analyse socio-économique. La dépendance croissante aux systèmes automatisés et aux intelligences artificielles pose des questions de responsabilité en cas de défaillance, tandis que la collecte massive de données nécessite une gestion stricte de la confidentialité et de la sécurité.

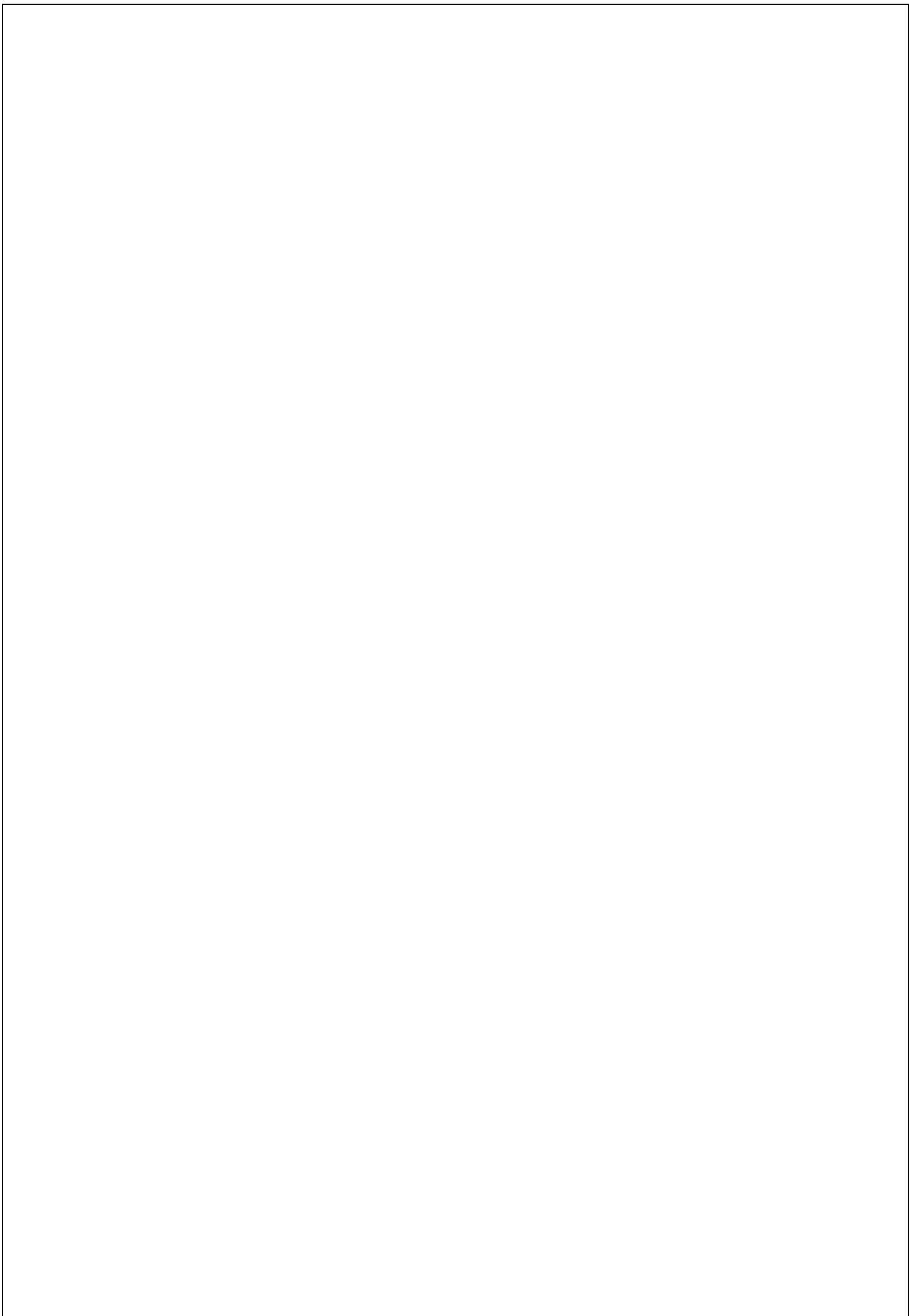
Sur le plan environnemental, bien que le génie électrique contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre grâce aux énergies renouvelables, certaines technologies, comme la production de batteries ou l'électronique de puissance, génèrent des déchets et des impacts environnementaux qu'il est nécessaire de maîtriser. La gestion responsable des ressources, le recyclage des matériaux et l'optimisation des processus sont donc des aspects essentiels pour maximiser les bénéfices socio-économiques.

Enfin, l'intégration des nouvelles technologies électriques modifie la structure sociale et économique. L'automatisation et l'IA peuvent entraîner une redistribution des emplois, avec des métiers traditionnels qui disparaissent et de nouveaux métiers spécialisés qui apparaissent. La formation continue, la reconversion professionnelle et l'inclusion des populations vulnérables deviennent des enjeux majeurs pour garantir que les bénéfices de l'innovation soient équitablement répartis dans la société.

8. Conclusion

En conclusion, le génie électrique est bien plus qu'une discipline technique : il constitue un moteur fondamental de transformation économique, sociale et environnementale. Chaque spécialité, qu'il s'agisse de la production d'énergie, des machines électriques, de l'électronique de puissance, de l'automatisation, des énergies renouvelables ou de l'IA appliquée aux systèmes électriques, contribue à façonner la société moderne. Ses impacts socio-économiques se manifestent par l'amélioration de la productivité industrielle, la création d'emplois qualifiés, la réduction des inégalités territoriales, la transition énergétique et la protection de l'environnement.

L'ingénieur du XXI^e siècle, en maîtrisant ces technologies et en comprenant leurs implications socio-économiques, devient un acteur clé du développement durable et de l'innovation. La compréhension de ces impacts est essentielle pour tout étudiant en génie électrique, car elle permet de relier les savoirs techniques aux besoins concrets de la société, de l'économie et de l'environnement, et de préparer une carrière professionnelle capable de répondre aux défis du futur.



Références bibliographiques

Histoire et fondements

- [1] Franklin, B. (1769). Experiments and Observations on Electricity. London.
Pertinence : [Recueil des expériences de Benjamin Franklin sur l'électricité atmosphérique.](#)
- [2] Maxwell, J.C. (1873). A Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford University Press.
Pertinence : [Ouvrage fondateur de l'électromagnétisme moderne.](#)
- [3] CNRS Ampère. Chronologie des découvertes en électromagnétisme.
Pertinence : [Ressource pédagogique retraçant les grandes étapes de l'histoire du génie électrique.](#)

Electrotechnique et machines électriques

- [1] Chapman, S.J. Electric Machinery Fundamentals. McGraw-Hill, 2022.
Pertinence : [Ouvrage de référence sur les machines électriques, couvrant les moteurs, les générateurs et les transformateurs avec rigueur mathématique et exemples industriels.](#)
- [2] Jan A. Melkebeek. (2018). Electrical Machines and Drives. Springer.
Pertinence : [Approche moderne des machines tournantes, incluant les commandes vectorielles et les applications en automatisation.](#)
- [3] Kirtley, J.L. (2021). Electric Power Principles. Wiley.
Pertinence : [Introduction aux systèmes de production, conversion et distribution de l'énergie électrique.](#)
- [4] Eidiani.M, Rouzbehi.K. (2024). Advanced Topics in Power Systems Analysis: Problems, Methods, and Solutions. CRC Press
Pertinence : [Analyse des réseaux électriques et des flux de puissance.](#)
- [5] Wood, A.J., Wollenberg, B.F., & Sheble, G.B. (2020). Power Generation, Operation, and Control. Wiley.
Pertinence : [Modélisation et optimisation des systèmes de production et de gestion de l'énergie.](#)
- [6] Kundur, P. (2020). Power System Stability and Control. McGraw-Hill.
Pertinence : [Référence incontournable sur la stabilité des réseaux électriques et les systèmes de contrôle.](#)
- [7] Hughes, T.P. (2019). Networks of Power. Johns Hopkins University Press.
Pertinence : [Étude historique et sociotechnique sur l'électrification des sociétés occidentales.](#)
- [8] Multon, B. (2003). Production d'énergie électrique par sources renouvelables. Techniques de l'Ingénieur, D 4 005.
Pertinence : [Approche détaillée des technologies renouvelables \(éolien, solaire, hydro\), avec calculs de rendements, puissances et intégration aux réseaux de production.](#)
- [9] Marec, E. (1950). Production, transport, distribution de l'électricité. Fenixx Réédition Numérique, 228 p. ISBN: 9782307360476.
Pertinence : [Vue classique sur les transformations énergétiques \(chimique/mécanique/électrique\), cycles industriels et bases de la chaîne production-transport-distribution.](#)
- [10] Morf, J.-J., & Aguet, M. (2013). Énergie électrique (Traité d'Électricité, vol. XII) (2e éd.). EPFL Press, 364 p. ISBN: 9782889142354.
Pertinence : [Modélisation mathématique des réseaux triphasés, dimensionnement des lignes, gestion des perturbations \(court-circuits, surtensions\) et réserves de puissance.](#)
- [11] Sabonnadière, J.-C., & Hadjsaïd, N. (2007). Lignes et réseaux électriques - Volume 1. Hermes-Lavoisier.
Pertinence : [Analyse des architectures de postes, lignes de transport \(calculs mécaniques, régimes établis/transitoires\), HVDC et topologies des réseaux HT/DT.](#)

- [12] RTE (2024). Présentation des réseaux d'électricité : transport et distribution. Commission de Régulation de l'Énergie (CRE).
Pertinence : Description réglementaire et opérationnelle des réseaux français, rôles des acteurs (RTE, Enedis) et hiérarchie transport/distribution.
- [13] Techniques de l'Ingénieur (réf.). Réseaux électriques de transport et de répartition. Articles D4120, D4080.
Pertinence : Étude technique approfondie des réseaux de transport/répartition, incluant généralités, équipements et généralités sur les flux énergétiques.
- [14] Chauvin Arnoux (2016). Production - Transport - Distribution et installation électrique. Ressource technique sur les chaînes énergétiques.
Pertinence : Focus pratique sur la chaîne complète (production à installation), avec mesures et applications industrielles en électrotechnique.

Electronique de puissance

- [1] Rashid, M. H. (2022). Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications (5th ed.). Pearson.
Pertinence : Ouvrage de référence sur les dispositifs de puissance, leurs topologies et applications industrielles.
- [2] Blaabjerg, F., & Ma, K. (2021). Future on Power Electronics for Wind Turbine Systems. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 9(3), 2235–2248.
Pertinence : Analyse des convertisseurs de puissance pour l'intégration des éoliennes dans les réseaux électriques.
- [3] Kolar, J. W., & Friedli, T. (2023). Advanced Concepts of Power Electronics for Renewable Energy Systems. IEEE Transactions on Power Electronics, 38(4), 4567–4582.
Pertinence : Innovations dans les topologies de convertisseurs pour améliorer l'efficacité énergétique des systèmes renouvelables.
- [4] Leon, J. I., Vazquez, S., & Franquelo, L. G. (2024). Multilevel Converters: Control and Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 71(2), 1120–1135.
Pertinence : Étude approfondie des convertisseurs multiniveaux et de leurs applications dans les réseaux haute puissance.
- [5] Yang, Y., Wang, X., & Blaabjerg, F. (2021). Benchmarking of Grid-Tied Power Converters in Terms of Reliability. IEEE Transactions on Power Electronics, 36(12), 13984–13997.
Pertinence : Comparaison des convertisseurs connectés au réseau selon des critères de fiabilité et durée de vie.
- [6] Rodriguez, J., Rivera, M., & Wu, B. (2025). Predictive Control in Power Electronics and Drives. IEEE Transactions on Power Electronics, 40(1), 15–28.
Pertinence : Application du contrôle prédictif pour améliorer la performance des convertisseurs et des entraînements électriques.
- [7] B. B. Al-Sayyid, Y. El-Moursi, and A. H. El-Sayed, "Review of Wide-Bandgap Devices (SiC and GaN) in Power Electronics Applications and Their Impact on Future Grids and Electric Vehicles", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 70, no. 1, pp. 1-13, 2023. (ISSN : 0278-0046).
Pertinence : Traite des avancées sur les semi-conducteurs SiC et GaN pour les convertisseurs compacts et l'électronique de puissance, perspectives mentionnées dans la section III.

Énergies renouvelables et Smart Grids

- [1] Ackermann, T. (2022). Wind Power in Power Systems. Wiley.
Pertinence : Intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques, avec modélisation et contrôle.
- [2] Bollen, M.H.J., & Hassan, F. (2021). Integration of Distributed Generation. Wiley.
Pertinence : Problèmes techniques liés à l'intégration des sources décentralisées dans les réseaux.
- [3] IEEE Power & Energy Society. (2023). Smart Grid Technologies. IEEE Transactions.
Pertinence : État de l'art sur les technologies des réseaux intelligents, capteurs, IA, cybersécurité.

- [4] Momoh, J. (2012). Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis. Wiley.
Pertinence : Architecture, protocoles et algorithmes pour les réseaux électriques intelligents.
- [5] Fang, X. et al. (2012). Smart Grid – A Survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials.
Pertinence : Revue complète des défis et solutions pour les smart grids.

Électronique et microélectronique

- [1] Sedra, A.S., & Smith, K.C. (2021). *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press.
Pertinence : Manuel complet sur les circuits analogiques et numériques, très utilisé dans l'enseignement supérieur.
- [2] Rashid, M.H. (2023). *Power Electronics*. Pearson.
Pertinence : Composants et topologies de conversion de puissance, avec applications industrielles et renouvelables.
- [3] Weste, N.H.E., & Harris, D. (2020). *CMOS VLSI Design*. Pearson.
Pertinence : Conception de circuits intégrés en technologie CMOS, du transistor à l'architecture système.
- [4] Neamen, D.A. (2020). *Semiconductor Physics and Devices*. McGraw-Hill.
Pertinence : Fondements physiques des dispositifs semi-conducteurs, avec traitement rigoureux des équations.
- [5] Sze, S.M. (2021). *Semiconductor Devices*. Wiley.
Pertinence : Référence mondiale sur les technologies des composants semi-conducteurs.
- [6] Pierret, R.F. (2019). *Semiconductor Device Fundamentals*. Addison-Wesley.
Pertinence : Ouvrage pédagogique sur les principes de fonctionnement des diodes, transistors et MOSFET.
- [7] Mead, C. (2021). *Neuromorphic Electronic Systems*. IEEE Press.
Pertinence : Architectures inspirées du cerveau pour les systèmes embarqués et l'intelligence artificielle.

Biomédical

- [1] Webster, J.G. (2021). *Medical Instrumentation*. Wiley.
Pertinence : Conception et fonctionnement des dispositifs médicaux : ECG, EEG, stimulateurs, capteurs.
- [2] Rangayyan, R.M. (2020). *Biomedical Signal Analysis*. Wiley.
Pertinence : Traitement des signaux physiologiques, détection d'événements et classification.
- [3] Bronzino, J.D. (2022). *The Biomedical Engineering Handbook*. CRC Press.
Pertinence : Encyclopédie technique couvrant tous les domaines du génie biomédical.

Automatique et systèmes embarqués

- [1] Ogata, K. (2020). *Modern Control Engineering*. Prentice Hall.
Pertinence : Théorie du contrôle linéaire, régulateurs PID, systèmes d'état.
- [2] Dorf, R.C., & Bishop, R.H. (2021). *Modern Control Systems*. Pearson.
Pertinence : Approche systémique du contrôle, avec applications en robotique et automatisation.
- [3] Astrom, K.J., & Murray, R.M. (2022). *Feedback Systems*. Princeton University Press.
Pertinence : Introduction rigoureuse aux systèmes de rétroaction, avec exemples interdisciplinaires.
- [4] Ganssle, J. (2019). *The Art of Designing Embedded Systems*. Newnes.
Pertinence : Guide pratique pour la conception de systèmes embarqués robustes et efficaces.

Télécommunications et IoT

- [1] Proakis, J.G., & Salehi, M. (2022). Digital Communications. McGraw-Hill.
Pertinence : Théorie des communications numériques, modulation, codage et détection.
- [2] Haykin, S. (2021). Communication Systems. Wiley.
Pertinence : Systèmes analogiques et numériques, avec applications aux réseaux modernes.
- [3] Shannon, C.E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal.
Pertinence : Article fondateur de la théorie de l'information, base des communications numériques.
- [4] Zanella, A. et al. (2014). Internet of Things for Smart Cities. IEEE IoT Journal.
Pertinence : Applications de l'IoT dans les infrastructures urbaines, avec protocoles et architectures.
- [5] Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges. Business Horizons.
Pertinence : Analyse économique et technologique de l'IoT dans les secteurs industriels et domestiques.
- [6] A. Hussain, A. D. Khan, and H. R. Khan, "Deep Learning in Smart Grid Technology: A Review of Recent Advancements and Future Prospects", IEEE Access, vol. 9, pp. 54558-54578, 2021. (ISSN: 2169-3536).
Pertinence : Couvre l'intégration de l'IA (Deep Learning) pour optimization des Smart Grids, sujet mentionné dans les sections V.2 et III.

Notes

A series of horizontal dotted lines for writing notes.

A series of horizontal dotted lines for writing, arranged in a grid pattern across the page.

A series of horizontal dotted lines for writing, arranged in a grid pattern across the page.

