

Introduction générale

Le génie électrique (GE) est un secteur industriel fondamental concerné par les systèmes qui produisent, traitent, transmettent et mesurent les signaux électriques. Le génie électrique combine les modèles de la physique avec les propriétés de matériaux afin de produire des systèmes répondant à nos besoins pratiques. La convergence des différentes disciplines du GE ont permis d'innombrables réalisations dans notre vie quotidienne.

Nous pouvons classer les systèmes du GE comme des systèmes de communication, systèmes informatiques, de contrôle, d'énergie et de traitement du signal. Le cours est organisé en cinq chapitres autour de ces systèmes.

Les **systèmes de communication** génèrent, transmettent et distribuent des informations. Des exemples comprennent la télévision, réseaux mobiles 2G, 3G, 4G, et 5G, systèmes satellites, radar. Ces systèmes sont traités en [chapitre 3](#).

Les **systèmes informatiques** utilisent des signaux électriques pour traiter des informations. Ces systèmes vont des simples microcontrôleurs aux superordinateurs. Les technologies derrière ces systèmes sont présentées dans le [chapitre 2](#).

Les **systèmes de contrôle** utilisent des signaux électriques pour réguler les processus. Les exemples incluent le contrôle de température, pressions, le pilote automatique et systèmes d'aides dans les avions. Ces systèmes sont classifiés sous le domaine de l'automatique. Les définitions de ces systèmes en conjonction avec les systèmes automatisés et robotisés sont présentées dans le [chapitre 5](#).

Les **systèmes d'énergie** génèrent et distribuent de l'énergie électrique. L'énergie électrique est le fondement de notre société axée sur la technologie. L'énergie est généralement produite en grande quantité par des générateurs nucléaires, hydroélectriques et thermiques (au charbon, au pétrole ou au gaz). Le courant électrique est distribué par des réseaux qui sillonnent le pays. Le [chapitre 4](#) présente les éléments de base de l'électrotechnique ainsi que les frontières des technologies de l'énergie qui transformeront notre future.

Les **systèmes de traitement du signal** agissent sur des signaux électriques qui représentent des informations. Ils transforment les signaux et les informations qu'ils contiennent en une forme plus adaptée. Ces systèmes sont utilisés dans différents domaines de spécialisation.

La conception et l'exploitation de systèmes impliquent une interaction considérable entre ces cinq classes de systèmes. Par exemple, les systèmes électriques nécessitent des systèmes de communication étendus pour coordonner de manière sûre et fiable le fonctionnement des composants. Un système de contrôle ou de traitement de signal peut comprendre une liaison de communication.

L'objectif de ce cours est de vous instruire des ¹notions basiques en génie électrique pour illustrer

l'impact des disciplines du génie électrique dans l'amélioration de notre vie quotidienne, et le développement de nos sociétés. Après avoir terminé ce cours, vous pourrez :

- Définir les filières existantes en génie électrique.
- Décrire les notions de base relatives au fonctionnement des domaines du génie électrique.
- Cerner les concepts de normalisation/standardisation.
- Diviser les métiers du génie électrique en fonctions des tâches et compétences.
- Différencier les employeurs dans les secteurs du génie électrique.
- Identifier les frontières technologiques de chaque disciple du GE.

L'examen final porte sur tout ce que vous avez vu dans ce cours pendant le semestre. Lors de cet examen, qui compte pour 100% de la note finale, vous aurez :

- des problèmes similaires ou proches aux exemples traités en cours.
- des questions de réflexion. (vous serez entraînés à répondre à ce type de questions par les questions posées lors des cours et lors des quiz qui vous seront proposés).
- des questions de synthèse (directe et QCM/QCU)

Les pré-requis pour ce cours se résument au sens commun, et les outils déjà enseignés lors des semestres S1, S2 et S3 en cours.

Chapitre 1

Éléments du Génie Électrique

Introduction

L'histoire de génie électrique (GE) est marquée par de nombreuses découvertes et inventions, qui ont pavé la route vers ce que nous connaissons aujourd'hui. Ce chapitre présente quelques éléments relatifs aux chapitres suivants. Une brève présentation des types d'électricités, leurs métriques de mesures, et leurs applications courantes. Après avoir terminé ce chapitre, vous pourrez :

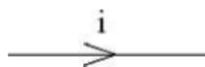
- Décrire les disciplines du génie électrique.
- Différencier les diagrammes et schémas électriques et électroniques.
- Évaluer les effets de l'électricité sur la physiologie humaine.
- Cerner les concepts de normalisation et standardisation.

1.1 Électricité

Un courant électrique est un déplacement de charges électriques dans un conducteur. On le caractérise par son intensité I , définie comme étant le débit de charges électriques dans le conducteur. Quand il passe dq Coulombs, pendant un temps dt , l'intensité vaut :

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

Le courant dans le schéma d'un circuit électrique est représenté par une flèche. Il est à noter que le sens de déplacement effectif des électrons est l'opposé du sens positif du courant. On représente un courant électrique par une flèche sur un conducteur, indiquant le sens positif de l'intensité :



L'intensité positive si les électrons passent de droite à gauche, et négative s'ils vont de gauche à droite. La tension (en Volt) est définie de telle manière qu'une charge d'un Coulomb accélérée sous une tension de 1V acquiert une énergie de 1J :

$$1V = \frac{1J}{1C} \quad (1.2)$$

On peut introduire la puissance électrique, définie comme étant le produit de la tension par l'intensité :

$$P = V \cdot I = 1V \cdot 1A = \frac{1J}{1C} \cdot \frac{1C}{1s} = \frac{1J}{1s} = 1W \quad (1.3)$$

1.1.1 Électricité statique

Par définition, l'électricité statique est un type d'électricité où les corps chargés se déchargent instantanément (lorsque les conditions le permettent). À grande échelle, la foudre est un exemple d'électricité statique accompagnée de tonnerre, suite à une décharge soudaine d'énergie électrique stockée. Dans l'industrie, l'électricité statique est utilisée dans :

- La machine à photocopier, dans laquelle les particules de tonner (l'encre sèche ou poudre de carbone noire) adhèrent aux parties du papier chargées. Un cylindre chaud les fait fondre pour pénétrer dans le papier sous forme d'encre. Le même procédé est utilisé dans la fabrication de papier de verre.
- Peindre de grandes pièces telles que des pièces de carrosserie automobile, pour une couche de peinture uniforme.
- Dans les cheminées industrielles, pour attirer la poussière de carbone lors de leur passage.

1.1.2 Courant continu (DC) et courant alternatif (AC)

Le courant continu ou CC (ou DC—Direct Current en anglais) est un courant électrique dont l'intensité est indépendante du temps (constante). Par extension, on nomme courant alternatif un courant périodique dont l'intensité et la tension sont variables périodiquement. Une source de tension alternative (AC) alterne périodiquement la polarité. Le courant alternatif résultant s'inverse donc périodiquement dans le sens. Le courant circule toujours de la borne négative à travers le circuit et retourne à la borne positive, mais lorsque le générateur alterne en polarité, le courant doit inverser sa direction.

Valeur efficace

La valeur efficace, dite aussi valeur RMS (de l'anglais root mean square —moyenne quadratique) d'un signal périodique est la valeur de la tension continue U appliquée aux bornes d'une résistance qui provoquerait une même dissipation d'énergie qu'une tension alternative variable $u(t) = U_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$. Pour une tension sinusoïdale $u(t)$, la valeur efficace est égale à :

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} u^2(t) \cdot dt} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (1.4)$$

La démonstration mathématique réside dans le calcul de l'intégrale suivant :

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} u^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} u^2(\theta) \cdot d\theta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot U_{\max}^2 \cdot \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta \cdot d\theta} \quad (1.5)$$

Sachant que :

$$\int_0^{2\pi} \sin^2 \theta \cdot d\theta = \pi \quad (1.6)$$

il vient :

$$U = \sqrt{\frac{U_{\max}^2}{2}} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (1.7)$$

Il en est de même pour l'intensité. Le [Tableau 1.1](#) présente les valeurs efficaces des signaux alternatifs simples.

Signal	U
sinusoïdal	$\frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$
triangulaire	$\frac{U_{\max}}{\sqrt{3}}$
carré et symétrique	U_{\max}

TABLE 1.1 – Valeur efficace des signaux alternatifs simples.

Exemple :

L'électricité domestique fournie en Algérie possède une valeur maximale aux alentours de 325 volts, soit :

$$U = \frac{325}{\sqrt{2}} = 230V$$

1.1.3 Sources d'électricité

Certaines des méthodes les plus courantes pour fournir de l'électricité sont énumérées ici.

Énergie chimique : les cellules humides ou sèches, les piles et les piles à combustible génèrent une tension. Ici, une réaction chimique produit des charges opposées sur deux métaux différents, qui servent de bornes négatives et positives.

Électromagnétisme : un champ magnétique qui change dans le temps peut produire du courant. Un moteur est un exemple, où un générateur produit une tension au moyen d'un conducteur tournant dans un champ magnétique.

Photoélectricité : certains matériaux sont photoélectriques, c'est-à-dire qu'ils peuvent émettre des électrons lorsque la lumière frappe leurs surfaces. Le césium est souvent utilisé comme source de photoélectrons. En outre, les cellules photovoltaïques utilisent le silicium pour générer une tension.

1.1.4 Puissance et énergie

La puissance peut se manifester sous diverses formes telles que le mouvement mécanique, les ondes radio, la lumière visible ou le bruit. Les physiciens mesurent l'énergie en joules. Un joule (1J) équivaut techniquement à 1W de puissance dissipée pendant 1s de temps. En électricité, vous rencontrerez plus souvent le watt-heure (symbolisé par Wh) ou le kilowattheure (kWh). Comme leur nom l'indique, un watt-heure représente l'équivalent de 1 W dissipé pendant 1 heure, et 1 kWh représente l'équivalent de 1 kW de puissance dissipée pendant 1 heure. Autres unités d'énergie, on peut citer :

- l'erg, une minuscule unité équivalant à 0,0000001 J.
- l'unité thermique britannique (Btu), équivalant à 1055 joules. Les gens utilisent le Btu pour définir la capacité de refroidissement ou de chauffage des équipements de climatisation.
- eV est une unité minuscule, égale à seulement $1,6 \times 10^{-19}$ J.

1.1.5 Effets physiologiques de l'électricité

La [Figure 1.1](#) illustre divers effets que le courant électrique peut avoir sur le corps humain. Notez que les petits courants peuvent avoir des effets graves. Les intervalles sur la [Figure 1.1](#) représentent des

variations entre les individus quant à la taille, à la morphologie et à la tolérance au choc électrique. Le courant peut facilement être estimé par l'application de la loi d'Ohm, $I = V/R$, où R est la résistance du corps d'une personne. Les chocs électriques les plus graves se produisent lorsqu'une personne est en contact simultané avec un fil électrique et le sol. La résistance du circuit inclurait non seulement la résistance du corps mais aussi la résistance des chaussures et la résistance entre les chaussures et la terre. Les [Tableau 1.2](#) et [Tableau 1.3](#) donnent des informations de base pour estimer la résistance totale au sol.

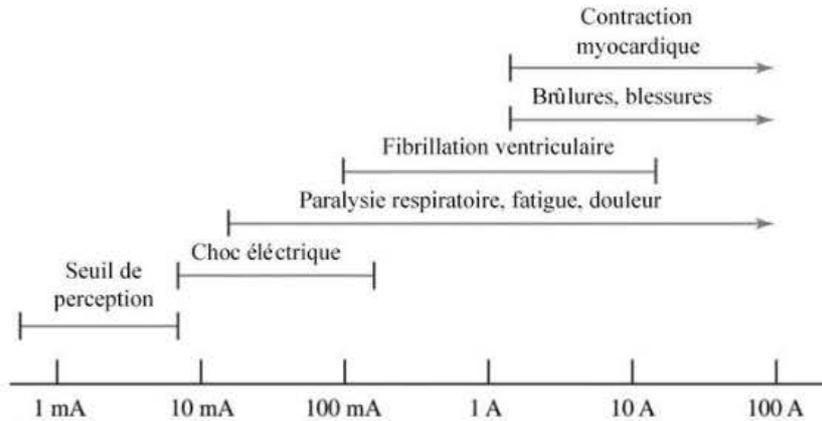


FIGURE 1.1 – Effets physiologiques du courant électrique.

Exemple :

Estimons le courant passant dans une personne debout sur un sol humide avec des chaussures humides, et attrape involontairement un fil de 240 V avec une paume de main humide. En se référant aux [Tableau 1.2](#) et [Tableau 1.3](#) et en prenant les valeurs les plus basses, on a 1 kΩ de la main, 200 Ω pour le corps, et 5 kΩ pour les pieds et les chaussures. Ainsi, le courant que pourrait porter la victime serait de 240 V / 6,2 kΩ, soit environ 40 mA. À partir de la [Figure 1.1](#), on peut voir qu'il y'a de fortes chances que la victime soit incapable de libérer la prise et incapable de respirer. Ainsi, une situation dangereuse peut exister.

Condition	Sec (kΩ)	Humide (kΩ)
Toucher des doigts	40–1000	4–15
Main tenant un fil	15–50	3–6
Empreinte du pouce	10–30	2–5
Main tenant une pince	5–10	1–3
Main ferme	1–3	0.1–1.5
Deux mains fermes	0.5–1.5	0.25–0.75
Corps humain interne à l'exclusion de la peau	0.2-1	0.2-1

TABLE 1.2 – Estimations de résistance pour diverses conditions de contact avec la peau.

Lorsqu'on travaille autour de l'alimentation électrique, les précautions générales suivantes doivent être prises :

- Assurez-vous que l'appareil est hors tension avant de travailler sur un câblage électrique ou un équipement électrique.
- Portez des gants en caoutchouc et des chaussures à semelles en caoutchouc, si possible.

Matériel	Résistance (kΩ)
Gants ou semelles en caoutchouc	>20 MΩ
Béton sec au-dessus du sol	1–5 MΩ
Semelle en cuir, sèche, y compris le pied	0.1–0.5 MΩ
Semelle en cuir, humide, y compris le pied	5–20 kΩ
Béton mouillé	1–5 kΩ

TABLE 1.3 – Estimation de la résistance de divers matériaux (130 cm²).

— Évitez de vous tenir sur une surface humide ou sur un sol humide.

1.2 Standards et normes

1.2.1 Diagrammes électriques et électroniques

Vous rencontrerez trois types de diagrammes en électricité et en électronique : les diagrammes en blocs, les schémas des circuits électroniques et les diagrammes picturaux des circuits.

Comme le montre la [Figure 1.2](#), un **Diagramme en blocs** vous donne un aperçu de la manière dont les circuits discrets d'un périphérique ou d'un système interagissent. Chaque circuit est représenté par un "bloc" (un rectangle ou une autre forme, selon l'application). Des lignes d'interconnexion, parfois avec des flèches sur une ou les deux extrémités, révèlent les relations entre les circuits.

Un **schéma de circuit électronique** inclut tous les composants contenus dans un circuit, chaque composant ayant son propre symbole spécial.

Un **diagramme pictural** (illustré), parfois appelé diagramme de disposition, montre la disposition physique réelle des éléments de circuit sur la carte de circuit imprimé, de sorte que vous puissiez trouver et identifier rapidement les composants à tester ou à remplacer.

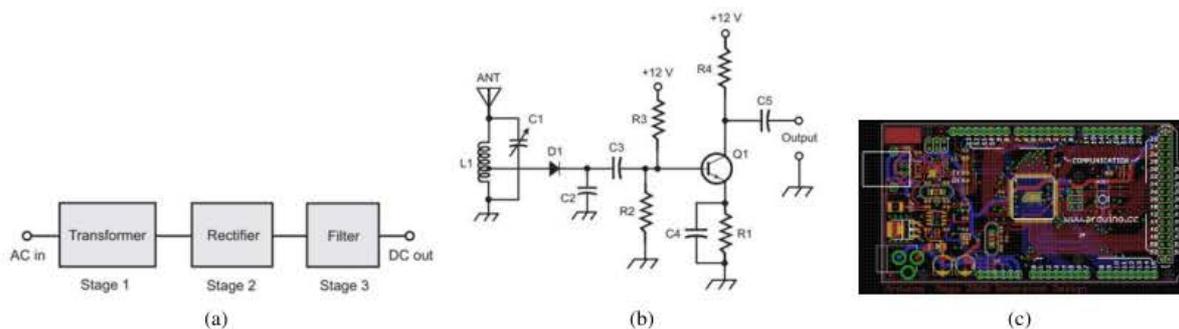


FIGURE 1.2 – Diagramme et schémas électroniques : (a) diagramme en blocs, (b) schéma électronique et (c) diagramme pictural.

1.2.2 Norme et standard technique

La normalisation ou la standardisation est le fait d'établir respectivement des normes et standards techniques, c'est-à-dire un référentiel commun documenté et destiné à harmoniser l'activité d'un secteur. La normalisation ou la standardisation est réalisée par des organismes spécialisés, qui sont le plus souvent soit étatique, soit des organisations créées par les professionnels d'un secteur. L'accès à des normes est généralement payant, et peu diffusé, alors que les standards sont plus facilement diffusés.

Un simple standard est généralement déterminé soit par un industriel pionnier ou par une association professionnelle ou un consortium d'acteurs industriels.

Conclusion

Dans ce premier chapitre, les concepts de base de l'électricité, les effets physiologiques et les concepts de standard et norme utilisés dans les disciplines du GE sont brièvement revus. Des lectures supplémentaires sur les techniques de lecture des schémas et circuits électriques et électroniques peuvent être trouvées dans [1]. Les modalités derrière les standards techniques du GE et les institutions et organismes légiférant peuvent être consultés sur [2].

Chapitre 2

Génie Électronique

Introduction

L'électronique est une branche de la physique appliquée, traitant les signaux électriques, permettant de transmettre/recevoir, mais aussi le traitement et stockage de l'information. La [Figure 2.1](#) montre une vue d'ensemble d'un système électronique. Les entrées sont des signaux électriques représentant un type d'informations telles que la voix, ou la vidéo. Ces signaux sont des tensions. L'objectif général en électronique est de traiter les tensions d'entrée en d'autres tensions de sorties. Le traitement peut être, parmi d'autres : amplification, atténuation, calcul, conversion, prise de décision...etc. Le processus génère alors de nouveaux signaux de sortie qui font quelque chose d'utile.

L'industrie de l'électronique représente des milliards de dollars de produits vendus annuellement dans le monde, et le secteur continue de croître dans les conditions économiques les plus difficiles, attestant de sa diversité et de son importance dans nos vies. Pour mieux comprendre la structure du secteur, il est préférable de le diviser en segments ou domaines de spécialisation. Les cinq principaux secteurs sont les composants, les communications, les processeurs, le contrôle et l'instrumentation. Bien que nous considérions encore l'électronique comme étant composée de ces secteurs de base, les différents secteurs convergent dans différentes applications. Les tablettes contiennent des émetteurs-récepteurs sans fil pour se connecter, tandis que les lecteurs de musique contiennent un microprocesseur de contrôle et des mémoires pour stocker les chansons.

Ce chapitre présentera les principales filières de l'électronique. Conjointement, les composants et technologies de base ainsi que les avancées en nanoélectronique seront brièvement revus. La [section 2.3](#) présentera quatre nouvelles technologies de pointe en électronique, qui auront un impact révolutionnaire dans nos vies au futur proche. Les objectifs de chapitre sont :

- Décrire les principaux segments de l'électronique.
- Classifier les composants passifs et actifs à base de semi-conducteurs.
- Diviser les métiers de l'électronique en fonctions des tâches et compétences.
- Différencier les employeurs dans les secteurs de l'électronique.
- Présenter un aperçu de l'état de l'art des technologies en électronique.

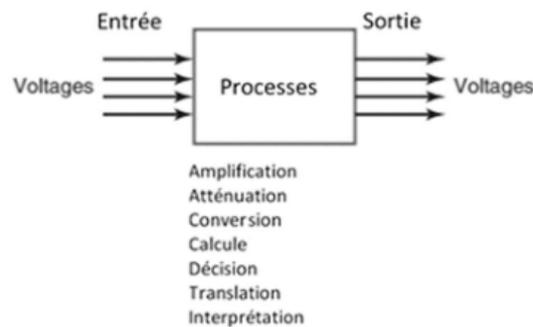


FIGURE 2.1 – Fonctionnement de base d'un système électronique

2.1 Principaux segments de l'électronique

2.1.1 Composants

Les composants électroniques sont la base de tous les circuits et équipements. Les composants électroniques comprennent les résistances, les condensateurs, les bobines, les transformateurs, les connecteurs, les fils et câbles, et les circuits imprimés. Le segment le plus important des composants est celui des semi-conducteurs, tels que les circuits intégrés, les transistors, les diodes... etc.

2.1.2 Communications

Le segment de l'électronique le plus ancien et l'un des plus grands est le secteur des communications et télécommunications. Son évolution a commencé avec le télégraphe et le téléphone au milieu du 19^{ème} siècle. Au début du 20^{ème} siècle, la radio a été développée, puis le tube à vide est arrivé. C'est précisément le tube à vide qui a créé l'industrie électronique telle que nous la connaissons aujourd'hui. Le tube à vide nous a apporté l'amplification et la commutation électronique. Le radar a été inventé pendant la seconde guerre mondiale. Plus tard, nous avons eu la télévision, les satellites et de nombreuses autres technologies de communication pour les applications civiles et militaires.

2.1.3 Ordinateurs et microprocesseurs

Les ordinateurs sont arrivés avant la seconde guerre mondiale. Les transistors et les circuits intégrés les ont miniaturisés. Les microprocesseur, ou unité centrale de traitement (CPU), ont créé une toute nouvelle industrie, rendant les ordinateurs abordables pour tous. La partie informatique de l'industrie électronique est également énorme, le secteur se concentre désormais sur les logiciels, avec la démocratisation des ordinateurs sous toutes leurs formes.

2.1.4 Contrôle

Le contrôle est une partie importante de l'électronique, utilisé pour surveiller et contrôler des entités physiques, tels que la température, la pression, la position mécanique, le niveau de liquide ou l'intensité lumineuse. Les capteurs captent et mesurent ces phénomènes physiques, et les transforment en signaux électriques pour être traités par des circuits électroniques. Les contrôles électroniques sont partout, dans les appareils ménagers, les voitures et les camions, les distributeurs automatiques, et les armes.

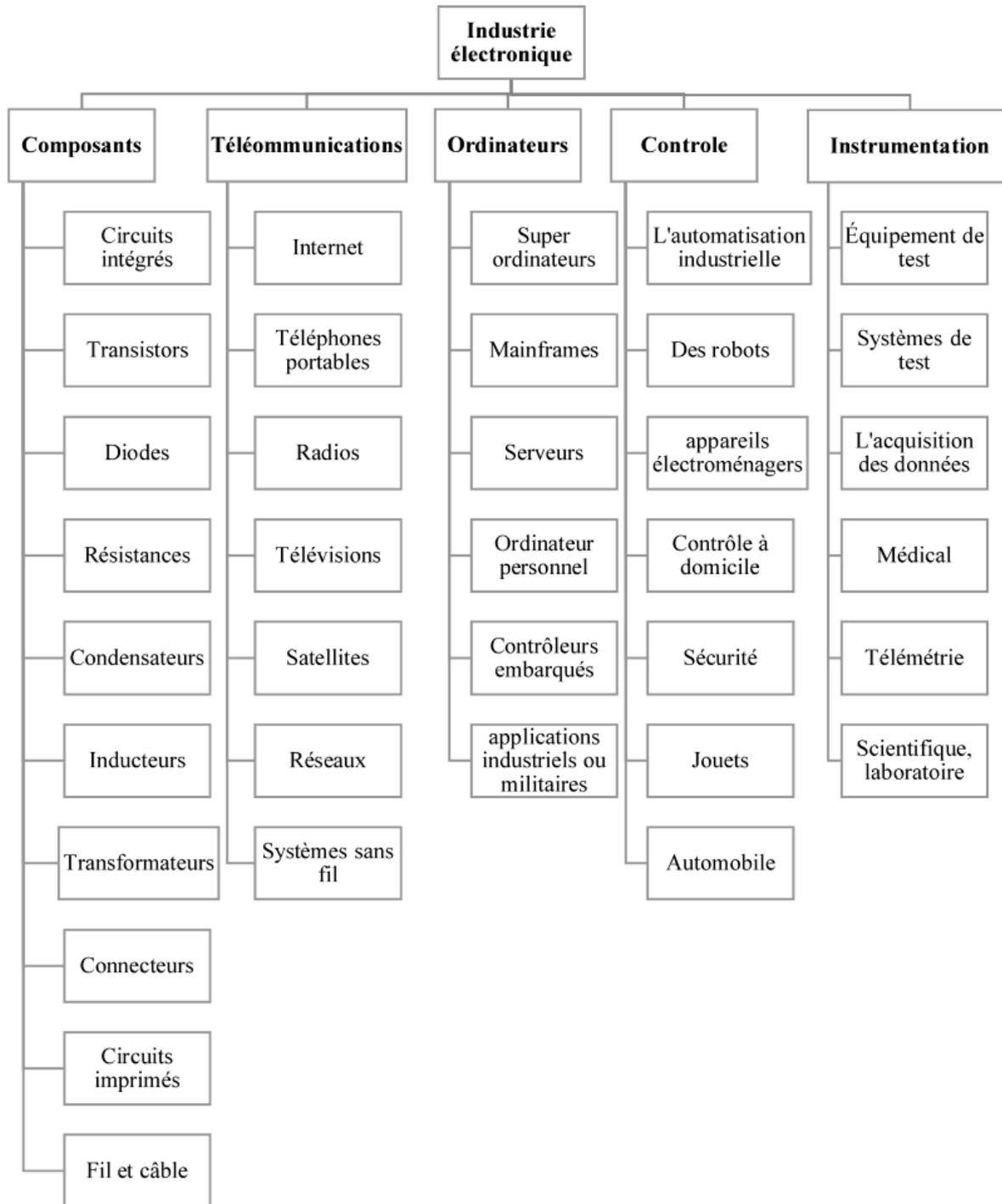


FIGURE 2.2 – Disciplines et filières de l'industrie de l'électronique

2.1.5 Instrumentation

L'instrumentation est le segment des circuits et équipements électroniques de mesure précise des signaux électriques tels que les multimètres, les oscilloscopes, les générateurs et analyseurs de signaux. Un segment majeur de l'instrumentation est le secteur médical. Les instruments médicaux comme l'EEG, appareils d'IRM ou de rayons X, sont quelques exemples d'instruments autres que les équipements de test conventionnels.

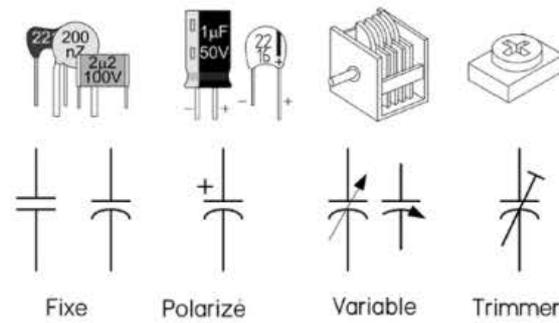


FIGURE 2.4 – Différentes variétés de condensateurs.

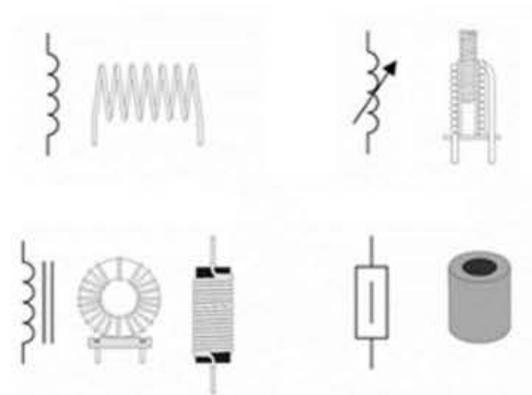


FIGURE 2.5 – Symboles et formes des bobines.

— Pour le filtrage d'un signal électrique ou d'une tension d'alimentation.

Transformateur électrique

Un transformateur de base est un dispositif à deux ports (quatre bornes) capable de transformer une tension d'entrée alternative en une tension de sortie alternative supérieure ou inférieure. Les transformateurs ne sont pas conçus pour augmenter ou diminuer les tensions continues, car le mécanisme de conversion repose sur un champ magnétique variable généré par un courant variable. Une représentation simpliste d'un transformateur est illustrée par la [Figure 2.6](#), avec son symbole schématique. Un transformateur typique consiste en deux bobines de fil isolées qui partagent un noyau en fer laminé. L'une des bobines est appelée primaire (contenant les spires N_P), tandis que l'autre bobine est appelée secondaire (contenant les spires N_S). La tension aux bornes du bobinage secondaire peut être calculée par l'expression suivante :

$$V_s = V_p \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (2.1)$$

Ainsi, si le nombre de tours dans la bobine primaire est supérieur au nombre de tours dans la bobine secondaire, la tension secondaire sera inférieure à la tension primaire, et inversement.

Exemple 1 :

Un transformateur a un primaire de 200 tours et un secondaire de 1200 tours. Si une tension de 120 V est appliquée au primaire, quelle tension apparaît sur le secondaire ?

Solution :

$$V_s = V_p \left(\frac{N_s}{N_p} \right) = 120V \left(\frac{1200}{200} \right) = 720V$$

Ce transformateur est un transformateur *élevateur*, car la tension secondaire est supérieure à la tension primaire.

Exemple 2 :

En utilisant le même transformateur que celui de l'exemple 1, retournez-le pour que le secondaire agisse maintenant comme primaire. Quelle sera la nouvelle tension secondaire ?

Solution :

$$V_s = V_p \left(\frac{N_s}{N_p} \right) = 120V \left(\frac{200}{1200} \right) = 20V$$

Ce transformateur est un transformateur *abaisseur*, car la tension secondaire est inférieure à la tension primaire.

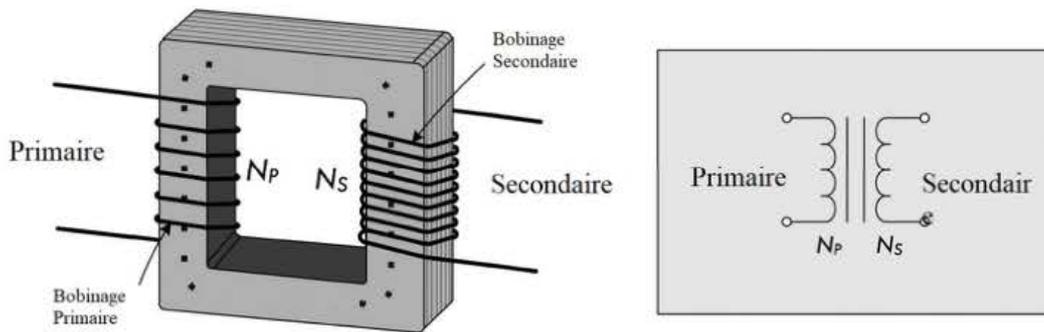


FIGURE 2.6 – Transformateur de base avec un noyau en fer.

2.2.2 Composants actifs

Un composant actif est un composant électronique qui permet d'augmenter la puissance d'un signal (tension, courant, ou les deux). La puissance supplémentaire est récupérée au travers d'une alimentation. On peut citer : diode, transistor, et circuit intégré. Les composants actifs sont construits à base de *semi-conducteurs*. Par définition, un *semi-conducteur* est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

Diode

Une diode est un dispositif semi-conducteur qui agit comme une porte à sens unique envers le flux de courant électrique. Lorsque la tension de l'anode d'une diode est plus positive que la cathode, le courant

passer dans la diode. Cependant, si les polarités sont inversées (polarisation inversée), la diode bloque le flux de courant.

Les diodes sont utilisées pour convertir les tensions alternatives en tensions et courants continus. Les diodes sont également utilisées dans les circuits de limitation de tension et les circuits de régulation de tension.



FIGURE 2.7 – Représentation de base d'une diode.

Transistor

Le transistor (voir Figure 2.8) est un composant électronique qui est utilisé dans la plupart des circuits électroniques (circuits logiques, amplificateur, stabilisateur de tension, modulation de signal, etc.). Un transistor est un dispositif semi-conducteur à trois électrodes, qui permet de contrôler un courant ou une tension sur l'électrode de sortie (le collecteur pour le transistor bipolaire) grâce à une électrode d'entrée (la base sur un transistor bipolaire).

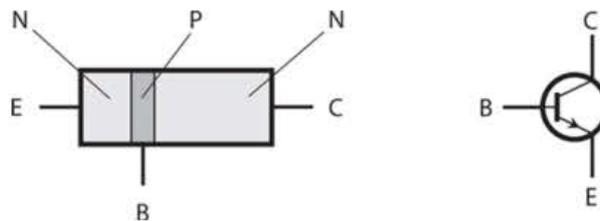


FIGURE 2.8 – Transistor NPN. E = émetteur, B = base et C = collecteur.

2.2.3 Circuit intégré

Le circuit intégré (CI), aussi appelé puce électronique, est un composant électronique intégrant plusieurs types de composants électroniques de base dans un volume réduit. Un CI remplit une ou plusieurs fonctions électroniques. Il existe une très grande variété de CIs divisés en deux grandes catégories : analogique et numérique. Les CIs analogiques les plus simples peuvent être de simples transistors encapsulés. Les circuits intégrés numériques les plus simples sont des portes logiques, les plus complexes sont les *microprocesseurs* et les plus denses sont les *mémoires*. On trouve de nombreux CI dédiés à des applications spécifiques (ou ASIC pour Application-specific integrated circuit), notamment pour le traitement du signal (traitement d'image, compression vidéo, cryptographie...etc).

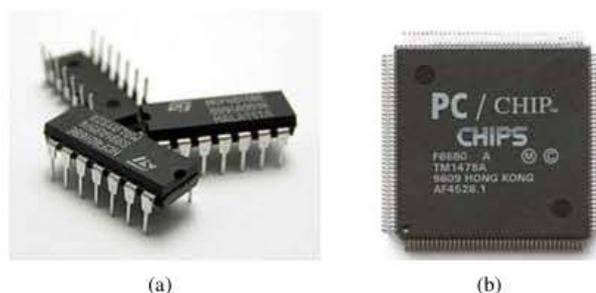


FIGURE 2.9 – (a) Circuits intégrés boîtier DIP (Dual In-line Package) et (b) puce de surface SMD.

Les circuits intégrés se présentent généralement sous la forme de boîtiers pleins rectangulaires, noirs, équipés de « pins », permettant d'établir les connexions électriques avec l'extérieur du boîtier. Ces composants sont soudés sur un circuit imprimé. Il existe différents types de CI, le format le plus ancien est le Dual Inline Package (DIP), et les circuits miniaturisés dits de surface ou SMD pour "surface mount device".

Mémoires électroniques

Les données numériques binaires (1 et 0) peuvent être stockées dans des puces mémoire. Certaines puces de mémoire nécessitent une source continue de tension, sinon elles perdront leurs données. D'autres peuvent conserver les données en l'absence de tension. Dans les appareils électroniques, nous rencontrons deux types principaux de mémoire : à accès aléatoire et à lecture seule.

Mémoire vive RAM : Une mémoire vive (RAM—random access memory) stocke des données binaires dans des tableaux. Les données peuvent être adressées (sélectionnées) de n'importe où dans la matrice. Les données disparaissent lorsque nous coupons l'alimentation, ce type de mémoire est dit *volatile*.

Mémoire morte ROM : Les données d'une puce de mémoire morte (ROM—read-only memory) ne sont pas écrasables, c.-à-d. *non volatile*. Une puce ROM standard est programmée en usine. Il existe des puces ROM programmable et reprogrammable. Une puce EPROM (erasable programmable read-only memory) est une ROM que nous pouvons reprogrammer en suivant une certaine procédure.

Fabrication de circuit intégré

La matière première de base habituellement utilisée pour fabriquer les circuits intégrés est le silicium, néanmoins, d'autres matériaux sont parfois employés, comme le germanium ou l'arséniure de gallium. Le silicium est un semi-conducteur dans sa forme monocristalline. Ce matériau doit être pur à 99,99%. On fabrique d'abord un barreau cylindrique de silicium en le cristallisant très lentement. Ce barreau est ensuite découpé pour être utilisé sous forme de galettes de 100 à 800 μm d'épaisseur et ayant jusqu'à 300 mm de diamètre, appelé wafer (voir [Figure 2.10](#)). Un wafer va supporter de nombreux circuits intégrés. L'échelle de gravure sur le wafer en 2018 a atteint 10 nm. En bref :

- En 2004, les gravures les plus fines en production sont de 0,13 μm (ou 130 nm) et 90 nm.
- En 2006, les gravures les plus fines en production sont de 60 nm et 30 nm.
- En 2015, les gravures les plus fines en production sont de 14 nm.
- En 2018, les gravures les plus fines en production sont de 10 nm.
- IBM, TSMC, et samsung ont affirmés pouvoir graver en 7 et 5 nm, ce qui a permis de fabriquer la dernière génération des processeurs ARM et x86 en 2019/2020 (quelques exemple sont illustres par la [Figure 2.12](#)).

2.3 Frontières technologiques en électronique

L'électronique connaît une avancée majeure sur toutes les frontières. Les majeures technologies qui permettront des avancées considérables dans le futur sont présentées dans cette section.

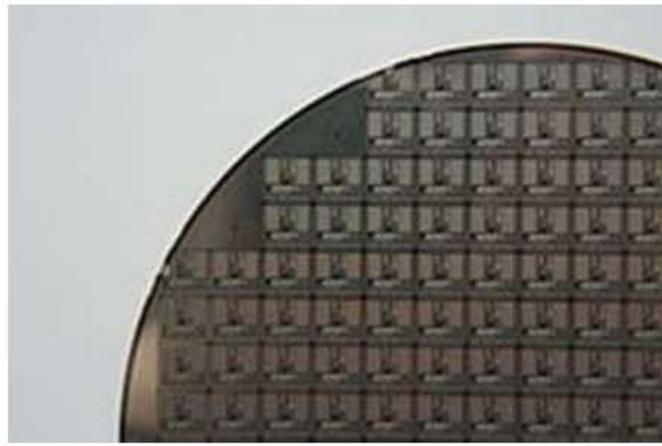


FIGURE 2.10 – Des microprocesseurs gravé sur un wafer de silicium qui sert à leur fabrication.

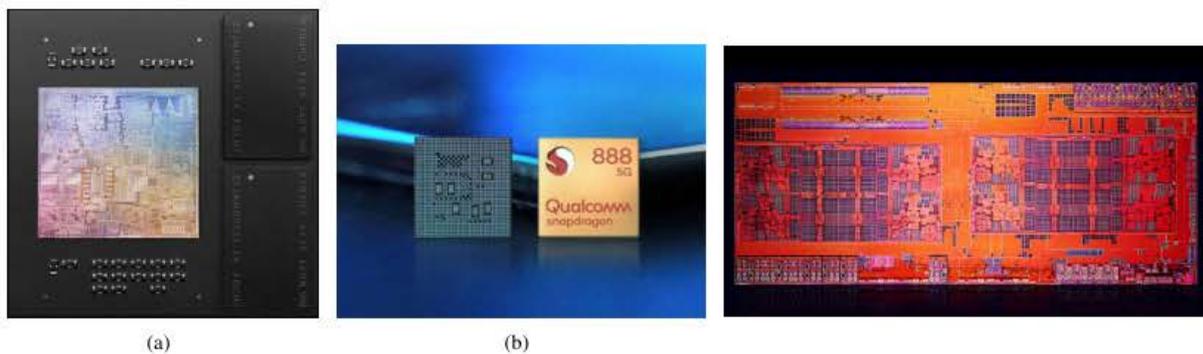


FIGURE 2.11 – Exemples de processeurs commercialisés en 2020 : (a) SoC M1 de Apple d’une architecture ARM (5nm, 16 milliard de transistors), (b) SoC ARM Snapdragon 888 de Qualcomm pour les smartphones (5nm, fabriqué par Samsung), et (c) Processeur AMD de type Zen 3 d’une architecture x86 (7nm, fabriqué par TSMC).

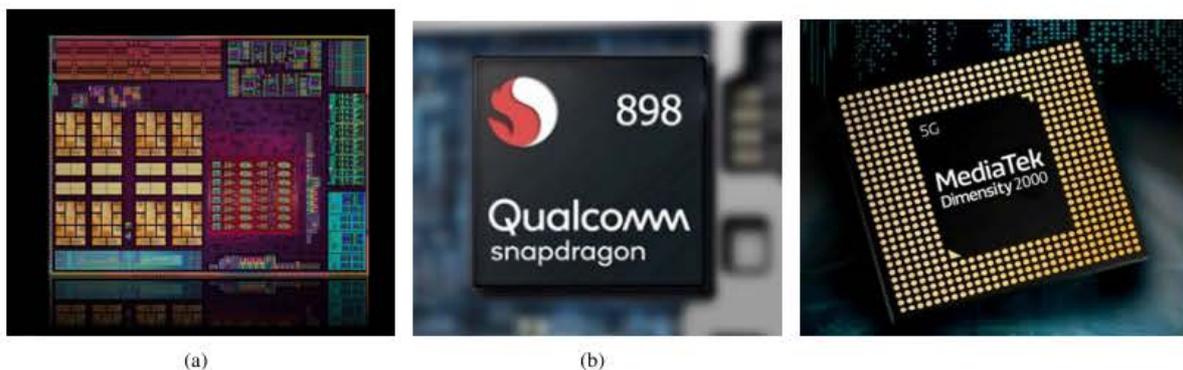


FIGURE 2.12 – Exemples de processeurs et SoC commercialisés en 2021 et 2022 : (a) Processeur AMD de type Zen 3+ d’une architecture x86 (6nm, fabriqué par TSMC), (b) SoC ARM Snapdragon 898 de Qualcomm (4nm, fabriqué par Samsung), et (c) SoC mediatek Dimensity 2000 (4nm, fabriqué par TSMC).

2.3.1 Transistor à base de Graphène

Le graphène est un matériau bidimensionnel cristallin, composé d’atomes de carbone arrangés en forme hexagonale, comme illustrée dans la Figure 2.13. Les travaux en laboratoire montrent que des transistors en graphène sont plus performants que les transistors en silicium. Ceci est dû au fait que les électrons se déplacent sur le graphène beaucoup plus facilement que dans le silicium, grâce à sa faible résistance. Ainsi, un transistor en graphène ne s’échauffe que très peu. Potentiellement, des circuits en graphène vont révolutionner l’industrie de l’électronique par des composants et des microprocesseurs

plus performants, plus denses, plus écologiques, et plus efficaces en énergie. Le graphène est particulièrement attractif pour l'électronique haute fréquence en bandes millimétriques et bandes térahertz. Ces bandes seront sans doute exploitées par les réseaux mobiles de télécommunication de 6^{ème} générations (6G). Étant pratiquement un conducteur de qualité, le graphène peut aussi servir à réaliser des écrans tactiles, des batteries sèches, des circuits et composants semiconducteurs.

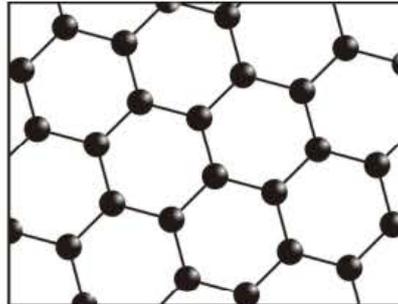


FIGURE 2.13 – Molécule de graphène

2.3.2 Électronique imprimée et électronique flexible

Contrairement aux circuits électroniques à base de minéraux comme le silicium, l'électronique flexible est à base de molécules organiques telles que le polymère (voir Figure 2.14). L'électronique flexible consiste à imprimer par jet d'encre des circuits en matière organique polymères sur des supports souples. Ces techniques sont appliquées dans des écrans OLED flexibles, cellules photovoltaïques enroulables, et des capteurs intelligents intégrés.

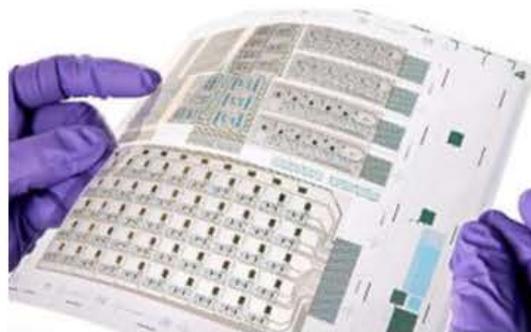


FIGURE 2.14 – Exemples de circuits flexibles.

2.3.3 Calculateur quantique

Un calculateur quantique (ou ordinateur quantique), utilise les propriétés quantiques de la matière afin d'effectuer des opérations sur des données. À la différence d'un ordinateur classique basé sur des transistors travaillant sur des données binaires (0 ou 1), le calculateur quantique fonctionne avec des qubits dont l'état quantique peut posséder une infinité de valeurs. Les calculateurs quantiques sont basés sur des QPU (Quantum processing Unit) au lieu de CPU dans les ordinateurs conventionnels (voir Figure 2.15). Les QPU fonctionnent en température absolue (-273°C) pour atteindre la supraconductivité (matériaux avec une résistance presque nulle). Ce domaine ouvrira une panoplie de possibilités dans l'industrie électronique et informatique, et permettra des applications révolutionnaires dans tous les

domaines. Les calculateurs quantiques sont un domaine ouvert de recherche, et les leaders dans ce domaine sont : IBM, Google, D-Wave, et Intel.

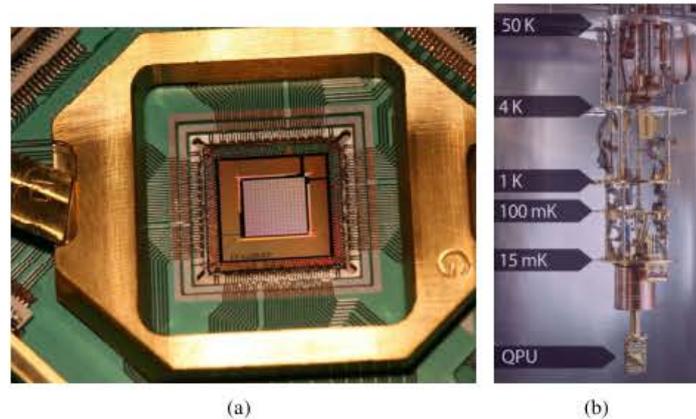


FIGURE 2.15 – Ordinateur quantique D-Wave-2000Q : (a) QPU (Quantum Processing Unit) et (b) ordinateur quantique D-Wave-2000Q, où à partir de la température ambiante en haut (en Kelvin), la température diminue à chaque niveau jusqu'à ce qu'elle soit proche du zéro absolu au niveau du QPU .[3]

2.3.4 Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (IA) est devenue une réalité dans plusieurs segments de l'industrie électronique. Les fabricants de puces font de grands progrès en matière d'innovation, de nouvelles architectures et de nouvelles techniques pour accélérer le traitement et réduire la consommation d'énergie. Les principales applications de l'IA au niveau électronique sont :

- **Processeurs d'application** : où les processeurs de réseaux de neurones sont conçus comme des moteurs de calcul optimisés pour une application précise, tels que le traitement d'image, du son, la vidéo ou autre.
- **SoC automobile** : Les systèmes embarqués (system-on-chip —SoC) automobile sont des systèmes sur puce qui ont de grandes capacités de calcul en temps réel pour le traitement des données relatifs aux véhicules et leurs environnements. Ce genre de systèmes sont conçus pour développer les véhicules autonomes. La [Figure 2.16](#) montre une carte utilisée dans les véhicules autonomes de niveau 3, 4 et 5. Le niveau 5 est le niveau maximal d'autonomie, où le véhicule est autonome à 100%.
- **Puces ultra basse consommation** : Ce sont des puces IA à basse consommation conçues pour les appareils alimentés par batterie, ou par récupération d'énergie (où l'appareil récupère de l'énergie des ondes électromagnétiques) pour l'apprentissage machine et la reconnaissance vocale dans les objets connectés, par exemple.

2.4 Métiers et carrières dans l'industrie électronique

Veillez-vous reporter à [Appendice A](#).

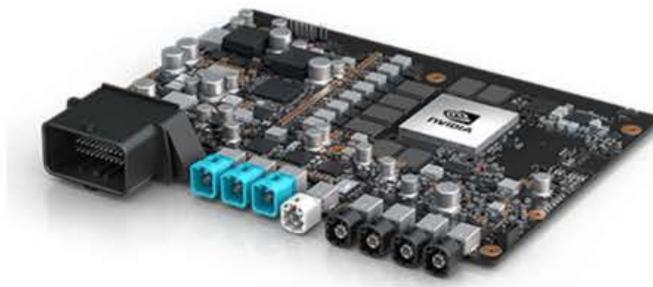


FIGURE 2.16 – Exemple de carte IA automobile : NVIDIA DGX spécialisée dans l’entraînement et l’optimisation des réseaux de neurones. Cette carte équipe la majorité des véhicules avec une autonomie de niveau 3, 4 et 5.

Conclusion

Dans ce chapitre, les segments de l’industrie électronique, à savoir le secteur des composants, des communications, des processeurs, du contrôle, et de l’instrumentation, ont été présentés. Les composants électroniques passifs et actifs de base ont été revus par quelques exemples d’éléments. Autre part, les types de mémoire dans leur forme RAM et ROM ont été aussi présentés ainsi que la technique de fabrication de ses denses circuits intégrés. Il est important de noter qu’à la conjecture actuelle, le processus de gravure optimal a atteint 5 nm. Cette technologie est particulièrement maîtrisée par le géant américain IBM et le fabricant taiwanais TSMC¹. Finalement, les promesses technologiques apportées par le Graphène en électronique ont été brièvement présentées. Les technologies de l’IA, les calculateurs quantiques et l’électronique flexible sont incontestablement des technologies futuristes, qui révolutionneront notre civilisation sur tous les plans.

Les ressources bibliographiques en relation avec la filière électronique sont nombreuses. Selon votre intérêt, voici quelques unes :

- Un guide exhaustif sur les composants électroniques, les connectiques, le câblage, ainsi que les normes techniques et les formes des boîtiers, peut être consulté dans [4].
- Une introduction aux principes théoriques de l’électronique en tant que domaine de spécialité est disponible dans [5, 6, 7].
- Les détails sur les aspects pratiques dans la conception des circuits et appareil électroniques peuvent être trouvés dans [8, 9].
- Les architectures des ordinateurs quantiques ainsi que leurs langages de programmation peut être consultées dans [10].
- Les lecteurs intéressés par les aspects de réparation et résolutions des problèmes électroniques peuvent consulter [11, 12].

1. TSMC est la compagnie qui fabrique les processeurs pour les plus grandes entreprises au monde, on cite parmi d’autres : Qualcomm, Apple, AMD, NVIDIA, Huawei, Samsung, Seiko, Hynix, Mediatek...

Chapitre 3

Génie Télécommunication

Introduction

Les télécommunications sont définies comme la transmission électronique à distance d'informations sur un média de transmission filaire, optique ou électromagnétique. Dans les débuts des télécommunications, des inventeurs comme Antonio Meucci, Alexander Graham Bell ou Guglielmo Marconi ont mis au point des dispositifs de communication comme le télégraphe, le téléphone ou la radio. Actuellement, les télécommunications concernent généralement l'utilisation d'équipements électroniques associés à des réseaux analogiques ou numériques, comme le téléphone fixe ou mobile, la radio, la télévision ou l'ordinateur. L'industrie des télécommunication est en plein effervescence, et représente une partie importante de l'économie mondiale. Les télécommunications font l'objet de régulations au niveau mondial régional et national, et même extraterrestre dans le cas de satellite communicant dans l'espace. Après avoir terminé ce chapitre, vous pourrez :

- Décrire les éléments d'un système de télécommunications.
- Différencier les types de télécommunications électroniques.
- Expliquer les principes et les techniques de télécommunications modernes.
- Interpréter les directives d'administration, organisations, et régulations des télécoms.
- Diviser les métiers des télécommunications en fonctions des tâches et compétences.
- Différencier les employeurs dans le secteur des télécommunications.
- Identifier les frontières technologiques en télécommunications.

3.1 Systèmes des télécommunications

Une liaison de télécommunications comporte trois éléments principaux :

- un **émetteur** qui prend l'information et la convertit en un signal électrique, optique ou radioélectrique.
- un **média de transmission**, pouvant être une ligne de transmission, une fibre optique ou l'espace radio, qui relie émetteur et récepteur.
- un **récepteur** qui reçoit le signal et le convertit en information utilisable.

3.1.1 Types de communication électronique

Les communications peuvent être classées en transmissions :

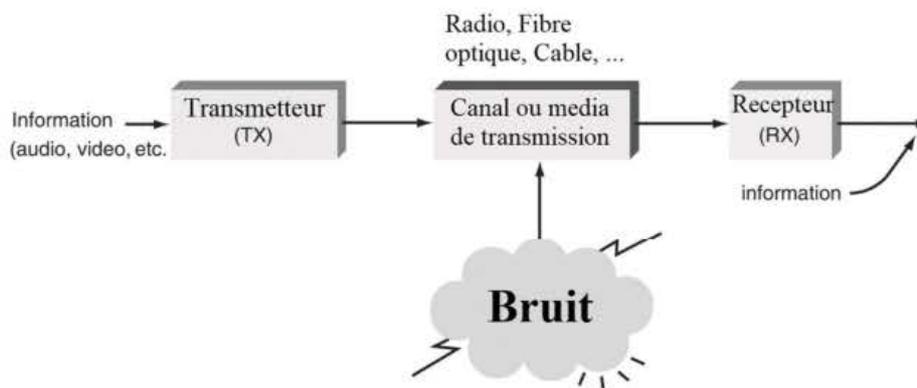


FIGURE 3.1 – Schéma de base d’une liaison de télécommunication.

- unidirectionnelles (simplex)
- bidirectionnelles :
 - duplex intégral (Full-duplex)
 - semi-duplex (Half-duplex))

Unidirectionnelle (Simplex)

Le moyen le plus simple de communication est la communication unidirectionnelle, appelée communément communication simplex. Les formes les plus courantes de communication simplex sont la radiodiffusion et la télévision.

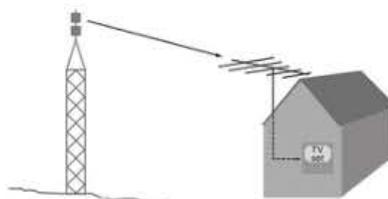


FIGURE 3.2 – Communication simplex : diffusion télévision.

Bidirectionnelle (Duplex)

Les applications duplex classiques sont illustrées par la Figure 3.3. Les personnes qui communiquent entre elles par téléphone peuvent parler et écouter simultanément, cela s’appelle une communication bidirectionnelle en *full-duplex*. Les communications bidirectionnelles dans laquelle une seule partie émet à la fois est appelée communication *semi-duplex* ou *half-duplex*. La communication est à double sens, mais la direction alterne. La plupart des transmissions radio de la police, trafics aériens, et maritimes, sont en mode semi-duplex.

3.1.2 Topologies des systèmes de télécommunications

Un ensemble de liaisons et de fonctions permettant d’assurer un service, constitue un système de télécommunications. Un système de télécommunications peut avoir une architecture :

- de type *point à point*, comme un faisceau hertzien, une fibre optique, ou une liaison radiotéléphonique. Des répéteurs peuvent y être ajoutés pour amplifier et corriger les signaux.
- de *diffusion*, comme en télévision où un émetteur est reçu par des milliers de récepteurs.

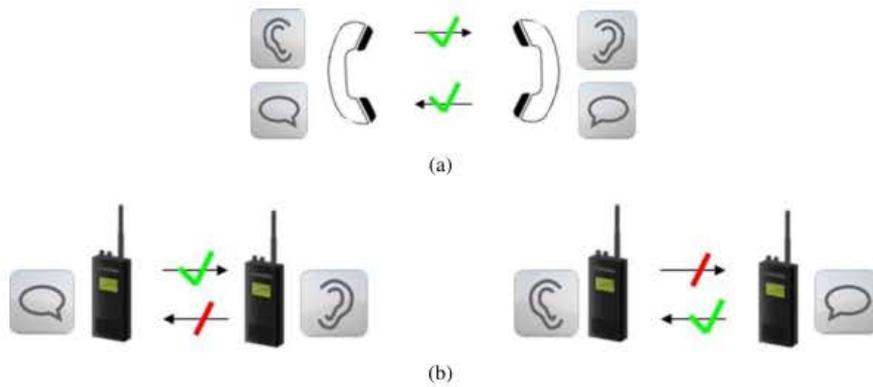


FIGURE 3.3 – Communication Duplex. (a) Full duplex (deux voie simultanées). (b) Half duplex (une voie à la fois).

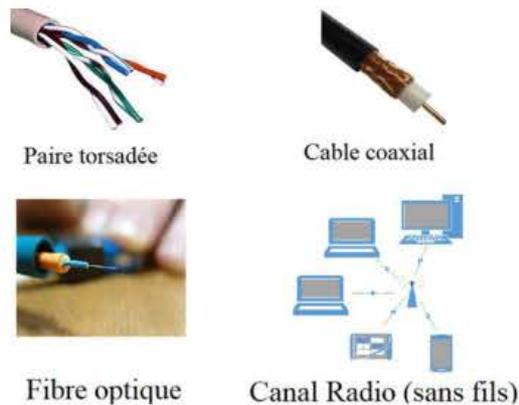


FIGURE 3.4 – Les média de transmission.

- de *collecte*, comme en surveillance océanographique, où des centaines de capteurs sont reçus par un système central.
- en *structure de réseau*, où un ensemble d'émetteurs et de récepteurs communiquent entre eux par des liaisons *étoilées* (topologie en étoile) ou point à point.

3.1.3 Médias de transmission

La transmission s'effectue par différents médias selon les systèmes. Historiquement, le fil téléphonique (paire torsadée) fut le premier support de télécommunication qui a permis le développement du télégraphe et du téléphone. Le câble coaxial était le média du haut débit avant l'apparition des fibres optiques, il est toujours utilisé dans les réseaux industriels en raison de sa robustesse face aux perturbations. La fibre optique, qui raccorde progressivement les abonnés en ville, est aussi le média des câbles sous-marins modernes. C'est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété de conduire la lumière. La radiocommunication, qui peut être définie comme toute communication par l'intermédiaire de l'espace hertzien, a révolutionné les télécommunications au début du XXe siècle. C'est le média de la radiodiffusion TV, radiotéléphonie, des réseaux de téléphonie mobile, du Wi-Fi, des liaisons par satellite ou par faisceau hertzien, ou des simples télécommandes infra-rouge domestiques.

Spèctre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est l'ensemble des rayonnements électromagnétiques classés par fréquence ou longueur d'onde. Le spectre électromagnétique s'étend théoriquement de zéro à l'infini en

fréquence (ou en longueur d'onde), de façon continue. Le spectre fréquentiel est divisé en plusieurs grandes classes de rayonnement. La Figure 3.5 illustre les systèmes de télécommunication et leurs fréquences opérationnelles, ainsi que les bandes fréquentiels majeurs, telles que la bande des micro-ondes (300 MHz-30 GHz), la bande millimétrique (30 GHz- 300 GHz), et la bande Terahertz (300 GHz- 10 THz). Pour une propagation en espace libre, on passe de la fréquence a la longueur d'onde par les relations suivantes :

$$f = \frac{1}{T}$$

et

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f}$$

dans ces relations, f est la fréquence, T est la période, λ la longueur d'onde, et $c = 299792458ms^{-1}$ est la vitesse de la lumière dans le vide.

Exemple 1 :

Trouver les longueurs d'ondes de (a) 150 MHz, (b) 430 MHz, (c) 8 MHz.

a.

$$\lambda = \frac{300.000.000}{150.000.000} = \frac{300}{150} = 2m$$

b.

$$\lambda = \frac{300}{430} = 0.697m$$

c.

$$\lambda = \frac{300}{8} = 37.5m$$

Exemple 2 :

Un signal d'une longueur d'onde de 1,5 m a une fréquence de :

$$f = \frac{300}{1.5} = 200MHz$$

On caractérise habituellement les ondes radio par la fréquence. Quand les fréquences croissent, les longueurs d'onde correspondantes se raccourcissent. À partir des rayons X, les longueurs d'ondes sont rarement utilisées, comme on a affaire à des particules très énergétiques.

Spectre	Longueur d'onde(m)	Fréquence(Hz)
Rayon gamma	< 10 pm	> 30 EHz
Rayon X	10 pm – 10 nm	30 EHz – 30 PHz
Ultraviolet	10 nm – 390 nm	30 PHz – 750 THz
Visible	390 nm – 750 nm	770 THz – 400 THz
Infrarouge	750 nm – 0,1 mm	400 THz – 3 THz
Térahertz / submillimétrique	0,1 mm - 1 mm	3 THz - 300 GHz
Micro-ondes	1 mm - 1 m	300 GHz - 300 MHz
Ondes radio	1 m – 100 000 km	300 MHz – 3 Hz

TABLE 3.1 – Domaines du spectre électromagnétique.

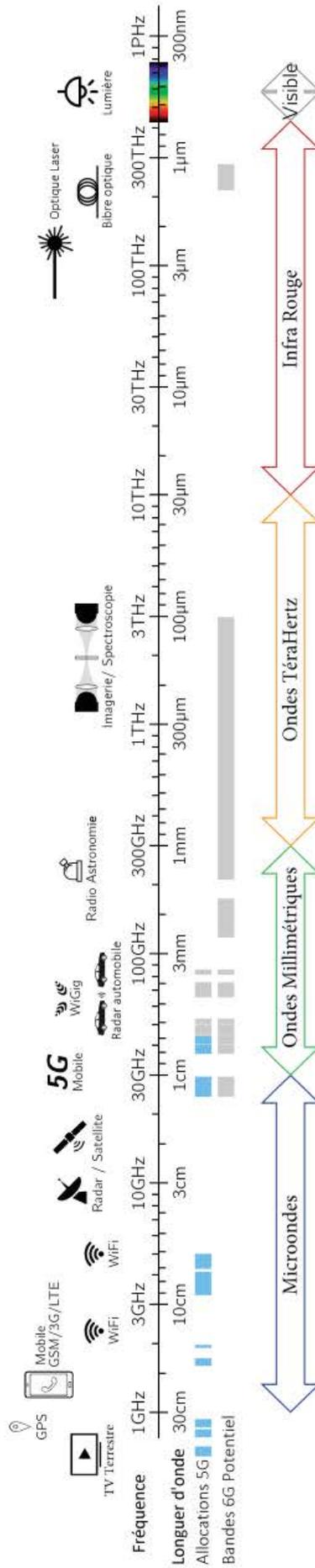


FIGURE 3.5 – Spectre électromagnétique et bandes fréquentielles des différents systèmes des télécommunications. ©2018 IEEE. Reprinted, with permission.

3.2 Techniques des télécommunications

Dans un système de télécommunication, un émetteur convertit l'information en signal électrique, optique ou radioélectrique adapté au canal de transmission, en le modulant et en l'amplifiant. Inversement, un récepteur convertit le signal transmis en information utilisable. La technique de ces fonctions est donc très dépendante du média, de la fréquence d'utilisation, et surtout de la puissance nécessaire pour compenser les pertes de propagation. Dans un canal de transmission hertzien, le signal porté par l'onde radioélectrique est atténué par la perte d'espace, les absorptions atmosphériques et les précipitations, et dégradé par les diffractions et réflexions.

3.2.1 Partage du média de transmission

Le partage du média entre utilisateurs se fait par les techniques d'affectation, de multiplexage et d'accès multiple. À l'intérieur d'une bande de fréquences, le multiplexage fréquentiel est la division d'un média de transmission en plusieurs canaux, chacun étant affecté à une liaison. Cette affectation peut être fixe, par exemple en radiodiffusion FM, une station émet à 96,1 MHz, une autre à 94,5 MHz. L'affectation des fréquences peut être dynamique comme en FDMA (Accès multiple par division en fréquence), utilisée par exemple lors de transmissions par satellite. Chaque utilisateur du canal y reçoit dans ce cas une autorisation temporaire pour une des fréquences disponibles. En communications numériques, le multiplexage peut également être temporel ou par codage. Le fonctionnement de ces techniques d'accès multiple nécessite des protocoles pour les demandes d'affectation, les adressages, dont le plus connu est le TCP/IP d'Internet.

3.2.2 Traitement du signal

Le traitement du signal permet d'adapter l'information, sous forme de signal analogique ou numérique, au média de transmission et de la restituer après réception. À l'émission, les techniques de compression permettent de réduire le débit nécessaire et à la réception, les opérations inverses sont effectuées : démodulation, décodage, correction et décompression.

3.2.3 Modulation du signal

La modulation est le processus par lequel le signal est transformé de sa forme originale en une forme adaptée au canal de transmission, par exemple en faisant varier les paramètres d'amplitude d'une onde sinusoïdale appelée porteuse. Le dispositif qui effectue cette modulation est un modulateur. L'opération inverse permettant d'extraire le signal de la porteuse est la démodulation. Un Modem effectue les deux opérations, à savoir la modulation-démodulation, d'où l'abréviation modem.

3.2.4 Administration des télécommunications

L'interopérabilité entre équipements ou systèmes nécessite des standards et des protocoles de télécommunications précis ; qui évoluent en versions successives selon les avancées techniques. Un fabricant dont une ou plusieurs innovations sont à la base d'une norme ou d'un standard, est assuré de prendre une avance significative sur son marché. Les constructeurs d'équipements tissent donc des liens très

étroits avec les organismes de normalisation et de standardisation. Parmi les principaux organismes de normalisation-standardisation mondiaux, citons :

- UIT (Union internationale des télécommunications), en anglais : ITU : International Telecommunication Union (agence de l'ONU).
- ETSI : European Telecommunication Standards Institute ou Institut européen des normes de télécommunication.
- 3GPP : 3rd Generation Partnership Project, responsable des normes de téléphonie mobile.
- IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Pour optimiser l'utilisation du spectre de fréquence et limiter les interférences entre systèmes, les états s'accordent au niveau international :

- au niveau international par l'UIT - Union Internationale des Télécommunications.
- dans le cadre des CMR (Conférence Mondiale des Radiocommunications) appelées « WRC » (World Radiocommunication Conference) en anglais.

Chaque pays gère ces réglementations internationales à l'intérieur de ses frontières, sous le contrôle d'administrations nationales, en Algérie par l'autorité de régulations des postes et des télécommunications (ARPT). Les lois de base portant sur les communications électroniques selon les pays veuillent préciser les modalités pour assurer l'interconnexion des réseaux, la gestion des numéros, le contrôle des fréquences, la sécurité et protection des consommateurs.

3.3 Frontières technologiques en télécommunications

3.3.1 Réseaux sans fils B5G et 6G

Les réseaux du futur, a savoir "Beyond 5G (B5G)" et 6G, offriront des performances inégalées en termes de débits, de latence, et de fiabilité. La promesse fixée par les fournisseurs d'équipements des télécommunications est de 10 Gb/s de débit moyen par utilisateur pour les réseaux 6G, à l'horizon 2030. Pour ce faire, les réseaux mobiles de nouvelle génération adopteront de nouvelles technologies et de nouvelles techniques. On cite parmi d'autres :

- **MIMO Massif** : le Multi-Input-Multi-Output –MIMO massif est une technologie qui utilise plusieurs antennes pour établir des communications au niveau de l'émetteur et récepteur. Le nombre des antennes peut atteindre l'ordre de milliers d'éléments. L'avantage de cette technique est d'augmenter le nombre d'utilisateurs par cellule, en réduisant les interférences tout en améliorant leurs débit et couverture (voir [Figure 3.6\(a\)](#)). Le MIMO massif est déjà une réalité dans les réseaux 5G, comme le montre la [Figure 3.6\(b\)](#).
- **Edge computing** : Le "edge computing" (ou informatique en périphérie en français) est une technologie qui consiste en l'établissement du traitement et contrôle des données des utilisateurs à la périphérie du réseau, près des utilisateurs finaux. Cette technologie promet une fluidité et une latence minimale pour les utilisateurs.
- **Pico-cellules en bandes millimétriques** : les réseaux de nouvelle génération utiliseront des bandes de fréquences en bandes millimétriques en plus de ceux en micro-ondes (voir [Figure 3.5](#)).

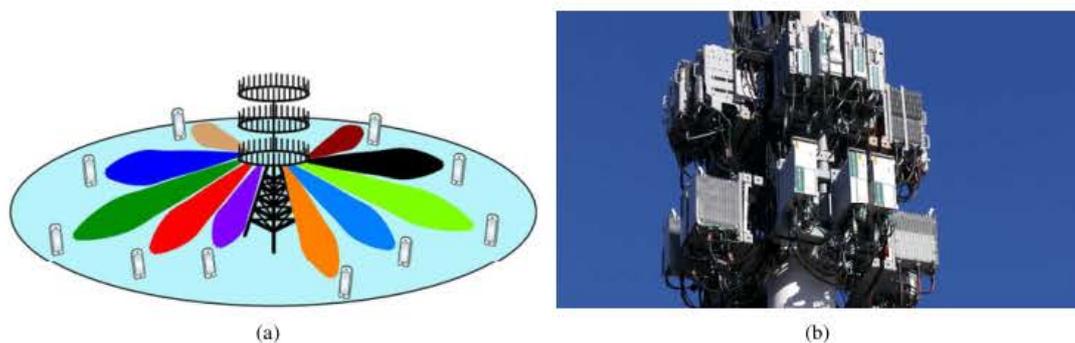


FIGURE 3.6 – Technologie MIMO massive : (a) illustration du principe, et (b) une implémentation dans un réseau 5G.

La bande de fréquences millimétriques s'étend de 30 GHz à 300 GHz¹. Les bandes adoptées pour la 5G et B5G (selon le pays) sont : 28 GHz, 38 GHz, 42 GHz, 48 GHz, 52 GHz, 56-71 GHz. Ces bandes offrent des bandes passantes considérables, ce qui permet de transmettre des débits dans l'ordre de centaines de Gb/s, voir des Tb/s. Les bandes envisagées pour la 6G sont la bande de 94 GHz, 140 GHz, 220 GHz, et 300 GHz.

Comme établi dans la Figure 3.1.3, la longueur d'onde dans ces bandes de fréquences est petite, ce qui implique que la propagation à ces fréquences doit être en visibilité directe entre émetteur et récepteur. Ainsi, les cellules du réseau mobile en bandes millimétriques seront de petite taille, d'où l'appellation pico-cellules.

- **Radio intelligente** : La radio² intelligente est le domaine de conception de moyen et techniques de transmission radio adaptatifs. Plusieurs approches sont adoptées dans cette technologie, comme la radio cognitive, la radio coopérative, ou la radio intelligente en utilisant l'intelligence artificielle.

3.3.2 Internet des objets

L'internet des objets (Internet of things –IoT) est l'interconnexion des objets par internet. Ceci permettra de rassembler des masses de données (connue sous "big data" en anglais). Ces données permettront d'optimiser plusieurs aspects de nos vies, comme la consommation énergétique, autonomie de décision...etc. Plusieurs challenges sont posés pour les objets connectés, tels que l'invasion de la vie privée, la sécurité, et les protocoles et normes à adopter.

3.3.3 Communication quantique

La communication quantique est un domaine ouvert de recherche, et présente des promesses qui peuvent bouleverser la manière dont nous communiquons. Les majeures applications de cette technologie aujourd'hui se résument aux aspects de sécurité, plus particulièrement de chiffrement quantique par distribution de clés quantiques (quantum key distribution –QKD).

3.3.4 Intelligence artificielle en télécommunication

L'IA est exploitée dans les réseaux de télécommunication pour l'allocation des ressources, le monitoring et diagnostique. L'approche est d'entraîner une IA aux comportements des réseaux sur plusieurs

1. Ce qui correspond à une longueur d'onde $\lambda = 10\text{mm}$ à 1mm , d'où la nomenclature "ondes millimétriques".

2. Le terme "radio" ici signifie des transmissions radioélectriques, et non pas une station radio ou autre concept.

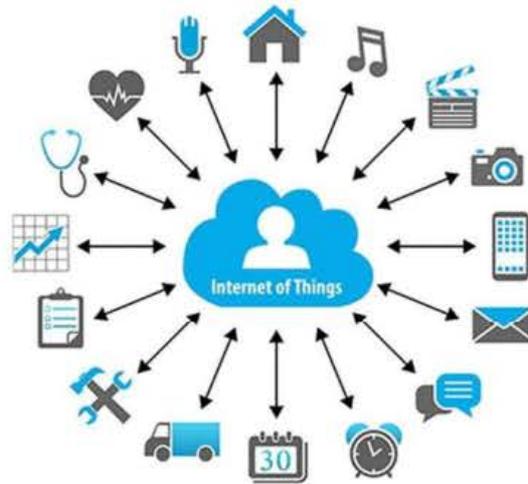


FIGURE 3.7 – Internet des objets.

niveaux de complexités. L'IA permettra des réseaux plus flexibles, reconfigurables et fiables. L'IA est l'une des technologies clés des réseaux B5G et 6G.

3.4 Emplois et carrières dans l'industrie des télécommunications

Veillez-vous reporter à l'[Appendice A](#).

Conclusion

Dans ce chapitre, l'accent a été mis sur les systèmes de télécommunication et les techniques de transmission. Les systèmes de télécommunications peuvent être analogique ou numérique, avec des topologies en point-a-point, point-a-multipoints ou en mesh. Les médias de transmission peuvent être filaires comme le câble coaxial, paire torsadée, ou la fibre optique. Le canal de transmission radio (sans fils) est différent du canal ou média filaire. La difficulté de transmettre dans un canal radio varie en fonction de la fréquence de transmission, la bande passante, et la distance à couvrir. Le média de transmission est généralement partagé par les utilisateurs via une technique de multiplexage dans le domaine temporel, fréquentiel ou en codes. Finalement, quatre exemples qui représentent l'état de l'art des technologies de télécommunication sont présentés dans la [section 3.3](#), à savoir les technologies des réseaux de nouvelles générations B5G et 6G, le principe derrière l'internet des objets et l'application de l'IA en télécommunications, en plus des communications quantiques.

Les ressources de références pour les communications numériques sans fils —pour les lecteurs avertis, sont [13, 14]. Une introduction aux protocoles des réseaux des télécommunications est fournie dans [15]. Pour les concepts de base, architectures, et fonctionnement des réseaux d'opérateurs, veillez-vous référer à [16].

Chapitre 4

Génie électrotechnique

Introduction

L'électrotechnique est un domaine qui traite les applications pratiques de l'électricité. Elle concerne la production, le transport, la distribution, le traitement, la transformation, la gestion et l'utilisation de l'énergie électrique. Généralement, l'électricité est générée à partir de sources d'énergie primaires, transformée ensuite en énergie mécanique, et puis en énergie électrique grâce à une turbine dans une centrale électrique. L'énergie primaire peut être nucléaire, thermique (combustion de gaz, gasoil, charbon), ou de pesanteur (comme dans un barrage à eau), tandis que l'énergie mécanique est transformée en électricité grâce aux effets du magnétisme. Nous produisons de l'électricité à grande échelle par les techniques suivantes : énergie hydroélectrique par des centrales installées dans les barrages et rivières, centrale nucléaire, énergie thermique par centrale au charbon ou au gaz, et les formes modernes d'énergie renouvelable telles que l'éolien et le solaire..

Les objectifs de ce chapitre se résument en : la description des techniques de production d'électricité (section 4.1). En section 4.2, les caractéristiques des réseaux électriques sont présentées et différenciées. La section section 4.3 présente les équipements des réseaux électriques. Finalement, trois exemples de technologies qui représentent l'état de l'art en électrotechnique sont présentés dans section 4.4. Les métiers et les employeurs dans le secteur de l'électrotechnique sont présentés dans Appendice A.

4.1 Production et consommation de l'énergie électrique

4.1.1 Transport de l'énergie électrique

Le transport de l'énergie électrique s'effectue par un réseau de distribution électrique. Généralement, l'électricité est transportée en tension élevée pour abaisser l'intensité du courant, et ainsi, réduire les pertes par effet Joule. Les pertes par effet Joule dépendent de la résistance des câbles de transport et de l'intensité du courant transporté. Donc, en augmentant la tension dans le réseau, l'intensité diminue, ainsi que les pertes par effet Joule. Ces pertes dépendent de l'intensité I , de la tension U et de la résistance R de la ligne. Pour du courant triphasé, on a par phase :

$$P_{\text{pertes Joule}} = RI^2 = R \left(\frac{P_{\text{électrique}}}{U\sqrt{3}} \right)^2 \quad (4.1)$$

Exemple :

D'après l'Équation 4.1, une ligne d'une centaine de km avec une résistance de 10Ω par phase, sur laquelle circule 400 MW, entraîne environ 40 MW de perte Joules si elle est exploitée à 200 kV, mais seulement 10 MW si elle est exploitée à 400 kV.

4.1.2 Courant alternatif

Le choix d'une tension alternative est due au fait que le transport de puissances importantes sur de longues distances nécessite des tensions élevées. Il faut donc des transformateurs pour passer d'une tension à une autre ; or les transformateurs passifs ne fonctionnent qu'avec du courant alternatif. Sachant que les changements de tension sur un système à courant continu ne sont pas aussi efficaces (plus de pertes) qu'en alternatif (par transformateur). Néanmoins, pour certains projets particuliers le courant continu devient plus intéressant malgré l'obligation de recourir à des stations de conversion.

4.1.3 Tension sinusoïdale

Les tensions sinusoïdales sont le résultat de la rotation des alternateurs dans les turbines génératrices d'électricité. C'est la manœuvre la plus répandue pour produire de l'électricité à grande échelle.

4.1.4 Système monophasé et triphasé

Un système de courant (ou tension) triphasé est constitué de trois courants (ou tensions) sinusoïdaux de même fréquence et amplitude, déphasés entre eux de 120° ($\frac{2\pi}{3}$ radians) dans le cas idéal (voir Figure 4.1).

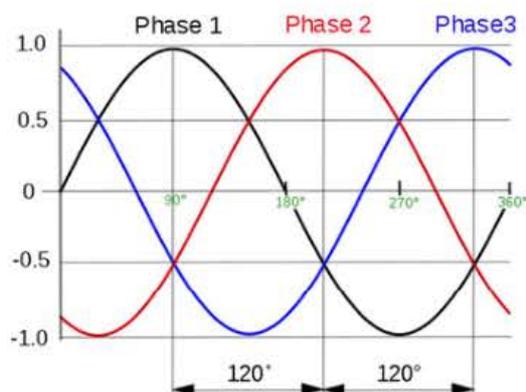


FIGURE 4.1 – Système triphasé équilibré : lorsque les trois conducteurs sont parcourus par des courants de même valeur efficace, le système est dit équilibré.

©Contenu soumis à la licence CC-BY-SA 3.0. Source : Article Réseau électrique de Wikipédia en français.

Il est tout à fait possible de réaliser un réseau uniquement en courant monophasé. Les raisons qui ont conduit à adopter le réseau triphasé sont les avantages techniques et économiques importants qu'il apporte :

- la puissance instantanée d'un système monophasé passe par une valeur nulle à chaque oscillation. La puissance instantanée est donc variable. Au contraire, les systèmes triphasés équilibrés assurent une puissance instantanée constante.

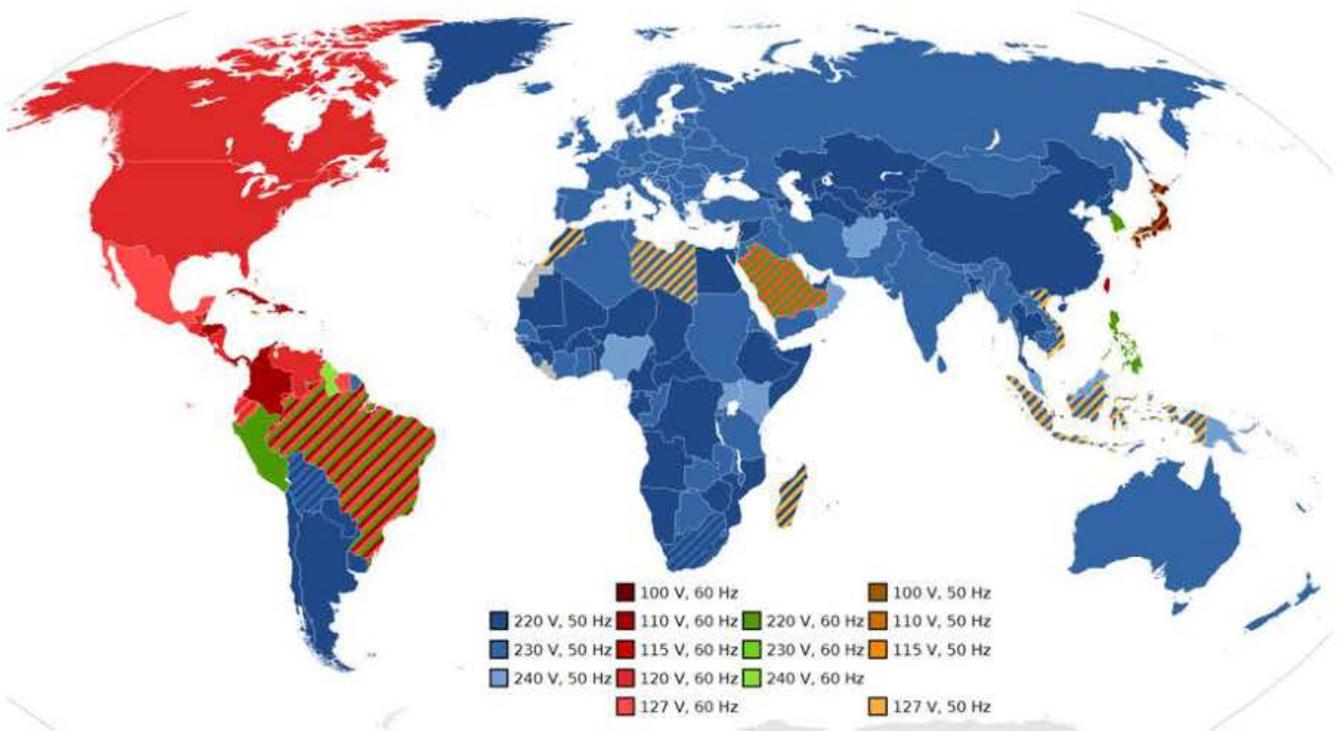


FIGURE 4.2 – Tensions et fréquences des réseaux électriques dans le monde.

©Contenu soumis à la licence CC-BY-SA 3.0. Source : Article Réseau électrique de Wikipédia en français.

- le transport d’une même puissance électrique en triphasé (sans neutre) nécessite une section de câbles conducteurs deux fois plus faible qu’en monophasé.
- Une distribution de l’électricité en courant triphasé avec fil de neutre permet de proposer pour un même réseau deux tensions d’utilisation différentes, soit : 230 V entre une phase et le neutre, et 400 V entre deux phases (en Algérie).

4.2 Réseaux électriques

Les réseaux électriques utilisent des tensions sinusoïdales de fréquence qui varient selon les régions du monde. Les raisons derrière ces différences sont plus historiques que techniques.

4.2.1 Fréquence et tension des réseaux électriques

La fréquence du courant est de 50 Hz en Europe, Asie, et en Afrique, contre 60 Hz en Amérique du Nord et le Japon. Comme montré par la [Figure 4.2](#), tous les pays européens et ainsi que la plupart des pays africains et asiatiques utilisent une tension efficace nominale comprise entre 220 et 240 V. Le Japon, tous les pays d’Amérique du Nord, la plupart des pays d’Amérique centrale et quelques pays d’Amérique du Sud emploient une tension entre 100 et 127 V.

4.2.2 Structure des réseaux électriques

Les réseaux électriques peuvent être organisés selon plusieurs types de structures, comme montré dans la [Figure 4.3](#) :

- **structure maillée** : les postes électriques sont reliés entre eux par des lignes électriques, avec redondances.

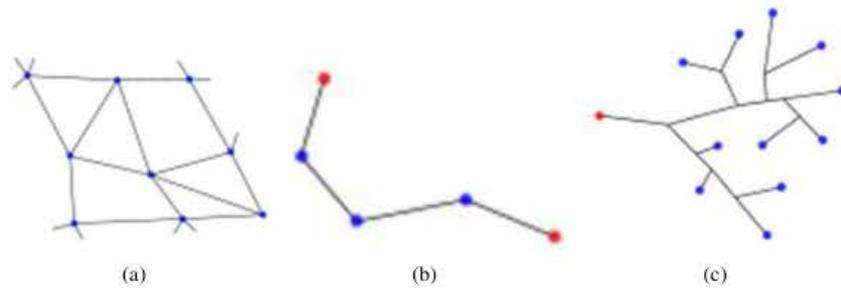


FIGURE 4.3 – Structures des réseaux électriques : (a) structure maillée (b) structure radiale, où les postes rouges représentent les apports d'énergie et (c) structure arborescente (le poste rouge représente l'apport d'énergie).

©Contenu soumis à la licence CC-BY-SA 3.0. Source : Article Réseau électrique de Wikipédia en français.

- **structure radiale ou bouclée** : la redondance d'alimentation, bien qu'inférieure à celle de la structure maillée, reste élevée.
- **structure arborescente** : la redondance d'alimentation est faible puisqu'un défaut sur la ligne, ou sur le poste rouge coupe l'ensemble des clients en aval.

Les grands réseaux d'énergie utilisent ces types de structure. Dans les réseaux de hautes tensions, on utilise la structure maillée pour le réseau de transport. Dans les niveaux de tension inférieurs, la structure bouclée est utilisée en parallèle avec la structure maillée, c'est le réseau de répartition. Enfin, pour les réseaux basse tension, la structure arborescente est utilisée pour la distribution.

Le réseau de transport

Les réseaux de transport sont à haute tension de 50 kV à 400 kV, et ont pour but de transporter l'énergie des grands centres de production vers les régions consommatrices d'électricité. Les réseaux maillés garantissent une très bonne disponibilité d'alimentation, car la perte de n'importe quel élément (ligne électrique, transformateur ou groupe de production) n'entraîne aucune coupure d'électricité.

Le réseau de répartition

Les réseaux de répartition sont à haute tension (de l'ordre de 30kV à 150 kV) et ont pour but d'assurer à l'échelle régionale la fourniture d'électricité. L'énergie y est injectée essentiellement par le réseau de transport via des transformateurs, mais également par des centrales électriques de moyennes puissances. Ils ont une structure à la fois maillée et bouclée suivant les régions considérées.

Le réseau de distribution

Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs. Il existe deux sous niveaux de tension :

- les réseaux moyenne tension (de 1 kV à 50 kV)
- les réseaux basse tension (de 50 V à 1000 V), sur lesquels sont raccordés les utilisateurs (entreprises et locaux d'habitations).

4.2.3 Réseau domestique

Le réseau domestique est relié par un câble au réseau électrique de la compagnie de distribution de l'électricité. Les trois types de contact sont :

- **Phase** : La phase désigne l'alimentation alternatif, donc la phase ne correspond pas au pôle + d'une pile mais prend le rôle de + puis de – successivement, 50 fois par seconde pour du 50 Hz.
- **Neutre** : C'est la référence électrique de tension.
- **Terre** : La mise à la terre permet de dévier le courant en cas de défaut d'un équipement électrique.

Prises électriques

Les prises électriques permettent de relier les appareils domestiques ou industriels au réseau électrique. Le courant domestique est distribué en monophasé, où chaque habitation reçoit qu'une seule des trois phases et le neutre. Lorsque la puissance demandée est plus importante, l'électricité peut être distribuée sous forme biphasé, ou en triphasé.

Les prises murales ont une phase, un neutre et une terre . Les types de prise standardisées dans le monde sont illustrées dans la [Figure 4.4](#). Le code couleurs adopté pour la phase, le neutre, et la terre est détaillé dans le [Tableau 4.1](#).

Pays	Phase	Neutre	Terre
Algérie	toutes les couleurs sauf le bleu, le vert et jaune	bleu	jaune et vert
UE et Australie	marron, rouge ou noir	bleu	jaune et vert
Royaume-Uni	marron ou rouge	bleu ou noir	vert/jaune
États-Unis et Canada	noir ou rouge	blanc	vert ou dénudé

TABLE 4.1 – Couleur standard des conducteurs de prises murales.

4.3 Équipement des réseaux électriques

Le réseau électrique est constitué non seulement de matériel haute tension, mais également de nombreuses fonctions utiles telles que la téléconduite et les systèmes de protection.

4.3.1 Matériels de puissance

Les lignes électriques relient les postes entre eux. À l'intérieur d'un poste, on trouve pour chaque niveau de tension un jeu de barre qui relie les départs lignes et les départs transformateurs.

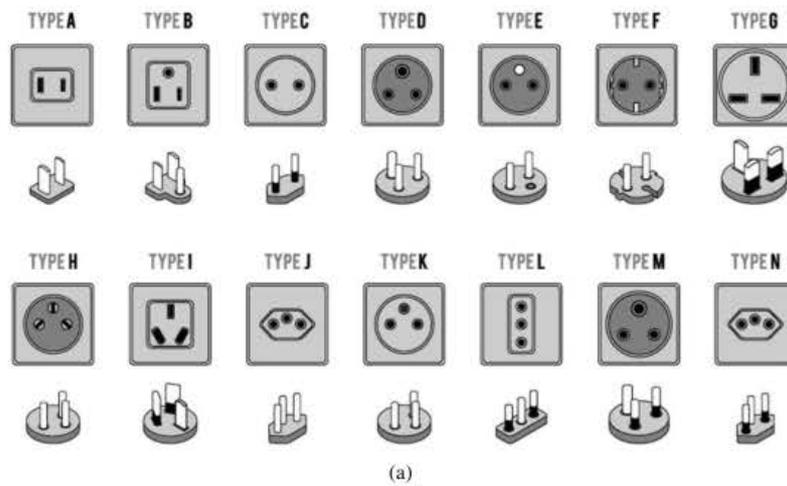
Les postes électriques

Les postes électriques (voir [Figure 4.5](#)) sont les nœuds du réseau électrique. Ce sont les points de connexion des lignes électriques. Les postes des réseaux électriques ont deux finalités :

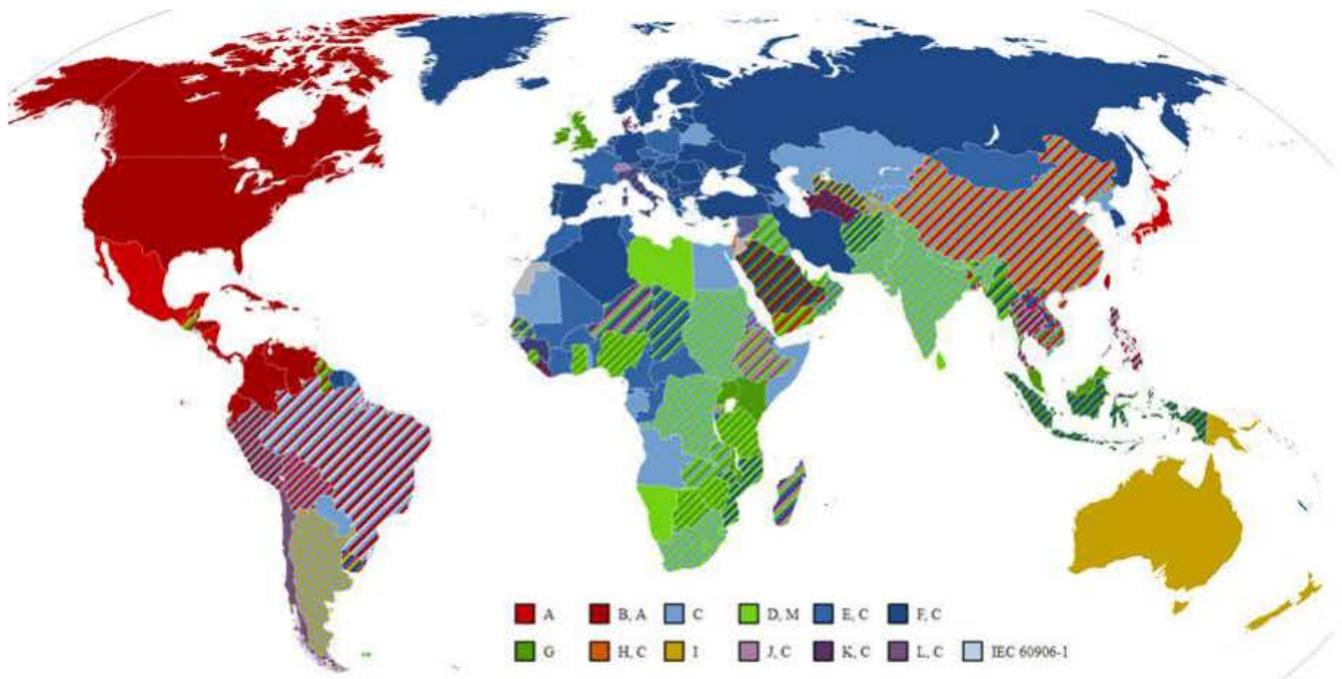
- l'interconnexion entre les lignes de même niveau de tension.
- la transformation de l'énergie pour passer d'un niveau de tension à un autre.

Les lignes électriques

Les lignes électriques assurent le transport de l'énergie sur les longues distances. Elles sont constituées de trois phases, et chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs (de 1



(a)



(b)

FIGURE 4.4 – (a) Types de prises domestiques et (b) type de prises par pays.

©Contenu soumis à la licence CC-BY-SA 3.0. Source : Article Réseau électrique de Wikipédia en français.



FIGURE 4.5 – Poste électrique (on trouve ce genre d'infrastructure aux bornes des villes).

à 4), espacés de quelques centimètres, afin de limiter l'effet couronne qui entraîne des pertes en ligne, différentes des pertes Joule. L'ensemble de ces 3 phases électriques constitue un terne. Les pylônes sont tous soigneusement reliés à la terre par un réseau de terre.

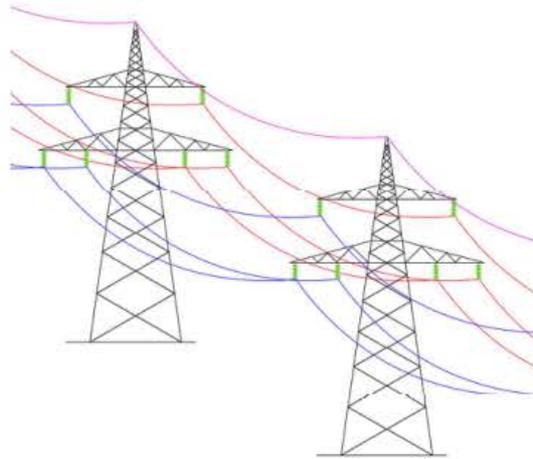


FIGURE 4.6 – Pylône de lignes électriques : câble de garde en haut (couleur magenta) et des ternes en bleu et rouge.

©Contenu soumis à la licence CC-BY-SA 3.0. Source : Article Réseau électrique de Wikipédia en français.

Comme montré dans la [Figure 4.6](#), le câble de garde est constitué d'un seul conducteur attaché directement au pylône, et ne transporte aucune énergie; il est relié au réseau de terre, et son but est d'attirer la foudre afin qu'elle ne frappe pas les trois phases de la ligne. Au centre du câble de garde on place parfois un câble en fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant.

4.3.2 Matériels de surveillance et de commande

Protection des réseaux électriques

Tout réseau électrique possède des systèmes de protection pour déconnecter le système de production en cas de défaut sur la ligne. L'objectif est de protéger les trois constituants d'un système électrique, à savoir les alternateurs de production, les composants des réseaux de transport et de distribution, et les équipements des consommateurs.

Matériel de conduite et de surveillance

La conduite s'effectue depuis des centres de conduite régionaux (dispatchings) ou nationaux. Ceux-ci disposent d'instruments de téléconduite comprenant des dispositifs de commander (disjoncteurs, sectionneurs...), de signalisation des dysfonctionnements, et de mesurer la tension, l'intensité, et la fréquence du courant.

4.3.3 Machines électriques

Une machine électrique est un dispositif électromécanique fondé sur l'électromagnétisme, permettant la conversion d'énergie électrique en mécanique. Ce processus est réversible et peut servir à produire de l'électricité.

Pour des applications de forte puissance, les moteurs à courant alternatif sont généralement alimentés par une source triphasé. Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- **Les machines synchrones** : La machine synchrone est souvent utilisée comme génératrice (alternateur). Les centrales électriques utilisent des alternateurs dont les puissances peuvent avoisiner

les 1500 MW pour la production d'électricité. Comme le nom l'indique, la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

- **Les machines asynchrones** : La machine asynchrone, ou machine à induction, est une machine à courant alternatif sans alimentation électrique du rotor. Le terme « asynchrone » provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément synchronisée avec la fréquence des courants qui les traversent. Pour fonctionner en monophasé, ces machines nécessitent un système de démarrage, condensateur en série sur l'un des enroulements. Pour les applications de puissance au-delà de 6 kW, les moteurs asynchrones sont alimentés en triphasés.

4.4 Frontières technologiques en électrotechnique

L'avancement de nouvelles technologies d'énergie est crucial pour tous les domaines. D'énormes ressources sont dédiées à la recherche pour améliorer, optimiser, diversifier notre production d'énergie. Le plus grand défi devant l'humanité aujourd'hui est la question du changement climatique, due à notre consommation d'énergie fossile. Il est donc impératif de changer nos habitudes, et par conséquent, nos technologies pour sauver ce qui reste à sauver sur le long terme. Cette section introduit trois axes qui représentent l'état de l'art des technologies contemporaines de l'énergie, et qui auront le plus d'impact dans notre quotidien aux futures.

4.4.1 Énergies renouvelables

Le domaine des énergies renouvelables est un domaine fleurissant. L'idée de générer de l'électricité à partir de ressources naturelles non polluantes est l'objectif des énergies renouvelables. Aujourd'hui, les techniques les plus prometteuses peuvent être résumées en :

- Rayonnement solaire : panneau, centrale solaire photovoltaïque ou thermodynamique.
- Énergie hydraulique.
- Centrale géothermique.
- Éolienne et courant maritimes.
- Biomasse : bien que la biomasse est une énergie renouvelable, sa transformation reste polluante.

Cependant, il existe plusieurs difficultés et défis devant ces nouvelles technologies, tels que des questions d'efficacité, de stockage à grande échelle, de rentabilités, ainsi que des conflits politiques qui s'opposent d'une part à ces changements, et qui vantent de fausses promesses sur ces technologies, d'une autre part.

4.4.2 Stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie électrique dans des batteries représente la limite devant le développement de plusieurs technologies. Toutefois, il existe de nombreuses technologies de batteries de nouvelle génération qui promettent de révolutionner la capacité de stockage, diminuer le temps de charge, le poids et la taille, et augmenter les cycles de charge (la durée de vie d'une batterie), tout en améliorant la sécurité. Parmi ses technologies, on cite :

- **Batterie en graphène** : Les batteries en graphène sont étudiées et développées dans les laboratoires depuis quelques années. La structure du graphène est très efficace et permet un stockage d'énergie inégalée par d'autres matériaux. En effet, les feuilles de graphène assurent une grande



FIGURE 4.7 – Illustration de la différence entre un circuit en silicium et en nitrure de gallium (GaN) : le GaN permet des circuits plus petits et plus efficaces.

capacité à échanger des ions, le tout, à grande vitesse de charge et de décharge, grâce à sa très bonne conductivité. Ceci réduit les risques d'échauffement, autorisant des charges plus rapides. Plusieurs composites de graphène sont proposés dans la littérature, tels que le silicium, le soufre, et le lithium. Une revue sur l'état de l'art de ce type de batterie est disponible dans [17, 18].

- **Batteries Lithium-Ion de nouvelle génération** : la technologie Li-ion devrait atteindre une limite d'énergie dans les années à venir. Néanmoins, les découvertes très récentes de nouvelles familles de matériaux actifs devraient ouvrir les limites actuelles. Ces composés innovants permettent de stocker plus de lithium dans les électrodes positives et négatives.

Ces technologies promettent une longévité supérieure avec des performances nettement supérieures aux batteries traditionnelles.

4.4.3 Circuits en Nitrure de Gallium

De nouveaux circuits électroniques de puissance à base de Nitrure de gallium (GaN) font leur apparition dans les produits de consommation. Le GaN est un semi-conducteur utilisé en optoélectronique et dans les dispositifs de grande puissance, ou de haute fréquence. Les transistors GaN ont une haute efficacité, et conviennent aux applications haute fréquence, haute tension, et haute température. La Figure 4.7 illustre l'avantage de circuit GaN comparé à ceux en silicium conventionnel. Lecteurs intéressés sont référés à [19].

4.5 Métiers et carrières en génie électrotechnique

Veuillez-vous reporter à l'[Appendice A](#).

Conclusion

Dans ce chapitre, les principes de base des choix techniques dans les réseaux électriques ont été présentés. Les réseaux électriques ont une hiérarchie qui sert à délivrer de l'électricité aux clients finaux. L'électricité est transmise en triphasé par une tension sinusoïdale d'une fréquence de 50 Hz (60 Hz dans quelques pays). Chaque type de réseau est défini par ses tensions et sa topologie, selon le cas d'usage. Les réseaux électriques sont surveillés et protégés par des équipements de surveillance et de commandes. Un réseau de télécommunications bien établi doit être mis en œuvre en instance avec le réseau électrique, pour accomplir les tâches de surveillance et commande. Finalement, trois exemples de

technologies qui représentent l'état de l'art de la discipline sont présentés dans la [section 4.4](#). Ces technologies révolutionneront notre manière d'exploiter l'énergie électrique, tout en ouvrant de nouveaux horizons dans tous les domaines, allant de l'électrification de nos moyens de transport, l'amélioration de nos produits de consommation, jusqu'à la réduction des émissions de carbone.

Pour enrichir vos connaissances en électrotechnique, il existe différents ouvrages de référence, notamment en électronique de puissance [20], et les fondamentaux de l'électrotechnique [21, 22, 23].

Chapitre 5

Génie Automatique

Introduction

L'automatique est une filière qui traite de la modélisation, l'analyse, et la commande des systèmes. L'automatique permet de commander un système selon certains critères (rapidité, précision, stabilité). Un exemple simple d'automatisme est celui d'un pilote automatique dans un aéronef, ou un régulateur de vitesse d'un véhicule, qui permet de réguler la vitesse du véhicule à une valeur prédéterminée par le conducteur. Les objectifs de ce chapitre se résument en :

- Décrire les concepts et le vocabulaire de base de l'automatique.
- Différencier et classer les systèmes selon leurs propriétés et caractéristiques.
- Cerner le fonctionnement des systèmes automatisés et des automates programmables industriels.
- Décrire les métiers et les employeurs dans le secteur de l'automatique.
- Se familiariser avec les frontières technologiques de la discipline.

5.1 Généralités et concepts

5.1.1 Les systèmes

Un système est une modélisation d'un processus fonctionnel remplissant une fonction de nature mécanique, électrique ou chimique. Les systèmes peuvent être classés en systèmes linéaires, ou non linéaires. Un système est dit linéaire si'il est modélisé par des équations linéaires. Comme montrée sur la [Figure 5.1](#), un système possède une ou plusieurs entrées, et une ou plusieurs sorties :

- **SISO (Single Input Single Output)** : le système a une entrée et une sortie est un système mono-variable.
- **MIMO (Multiple Input Multiple Output)** : le système a plusieurs entrées et plusieurs sorties est un système multivariable.
- **SIMO** : le système a une entrée et plusieurs sorties.
- **MISO** : le système a plusieurs entrées et une sortie.

Les systèmes peuvent être classés aussi par leurs évolution dans le temps comme des systèmes à temps continu, et systèmes à temps discret, ou invariant dans le temps :

- **Systèmes à temps continu** : ce sont les systèmes naturels.
- **Systèmes à temps discret** : pour lequel le temps est une variable discrète.

- **Systèmes à événements discrets** : dont le fonctionnement peut être modélisé par des événements discrets comme un feu de circulation, par exemple.
- **Système invariant** : dont les paramètres sont stationnaire, c.-à-d. ne varient pas dans le temps.

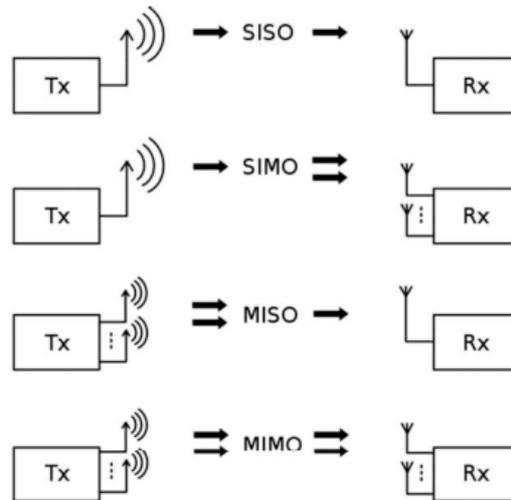


FIGURE 5.1 – Systèmes monovariables et multivariables.

5.1.2 Système automatisé

Les systèmes automatisés sont des systèmes électroniques qui exécutent des tâches précises, suivant une programmation informatique sans une intervention externe. Les systèmes automatisés sont dotés généralement de systèmes de retour d'information en formes de capteurs pour ajuster, contrôler ou déclencher des tâches, selon l'usage. Un système automatisé est construit autour de deux parties principales :

- **Une partie de commande (PC)** : est un système électronique piloté par un logiciel informatique qui commande une partie opérative (tel un actionneur, moteur ...etc.), en exécutant un programme informatique qui prend en considération les informations provenant d'autres sous-systèmes.
- **Une partie opérative (PO)** : est commandée par la partie de commande pour exécuter une opération. Généralement, la partie opérative est dotée d'un système mécanique, en plus d'actionneurs et capteurs. Le tout est alimenté par un système d'énergie.

5.1.3 Régulation automatique

Un système automatisé peut servir comme un système de régulation automatique pour réguler et maintenir une valeur d'une entité physique, tel qu'une pression, puissance, vitesse...etc. Un régulateur de vitesse dans un véhicule est un exemple de systèmes de régulation.

5.1.4 Robotique

La robotique est le domaine de spécialisation concerné par la conception et la réalisation de système automatisé ou robots. Il existe plusieurs sous-disciplines en robotique selon les applications, citons ici : la robotique industrielle, domestique, médicale, militaire, minière, et scientifique. Les robots fonctionnent de façon séquentielle par acquisition des entrées, traitement, et exécution. Dans un robot

autonome, une intelligence artificielle prend en charge les fonctions de traitement et de programmation, ou décisions.



FIGURE 5.2 – Exemples de types de robot : (a) robot industriel et (b) robot de prototypage et développement.

5.2 Automate programmable industriel

Un automate programmable industriel (API), communément connu sous PLC—Programmable Logic Controller en anglais, est un dispositif de traitement séquentiel de programme pour la commande de processus pour usage industriel. L'API commande la PO à partir de données d'entrées de la PC, grâce à un programme informatique. Leur principal usage est dans les chaînes industriels pour la commande et pilotage des machines et systèmes automatisés. Les API sont caractérisés par une conception électronique qui favorise la robustesse et la réactivité. La [Figure 5.4](#) illustre le fonctionnement d'un API.

Comparés aux calculateurs et ordinateurs conventionnels, les API se caractérisent par une fiabilité accrue grâce à une conception favorisant la robustesse, en utilisant des composants électroniques de qualité, et en respectant des standards de fabrication pour résister aux vibrations, température, émission électromagnétique externe, décharge électrostatique, et poussière. Les API sont conçus comme des systèmes modulaires avec des redondances, pour faciliter la maintenance et assurer une continuité de fonctionnement. Les API ont deux formes : en boîtier standalone de forme compacte, ou en boîtier modulaire conçu pour un placement sur rack industriel (voir [Figure 5.3](#)).



FIGURE 5.3 – Exemples de types d'API : (a) API modulaire, et (b) boîtier simple[24].

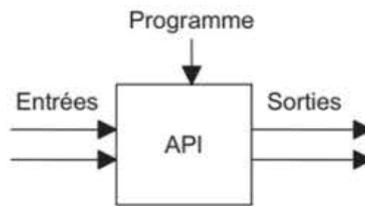


FIGURE 5.4 – Principe de fonctionnement d'un API : des entrées de la PC vers la PO en sortie

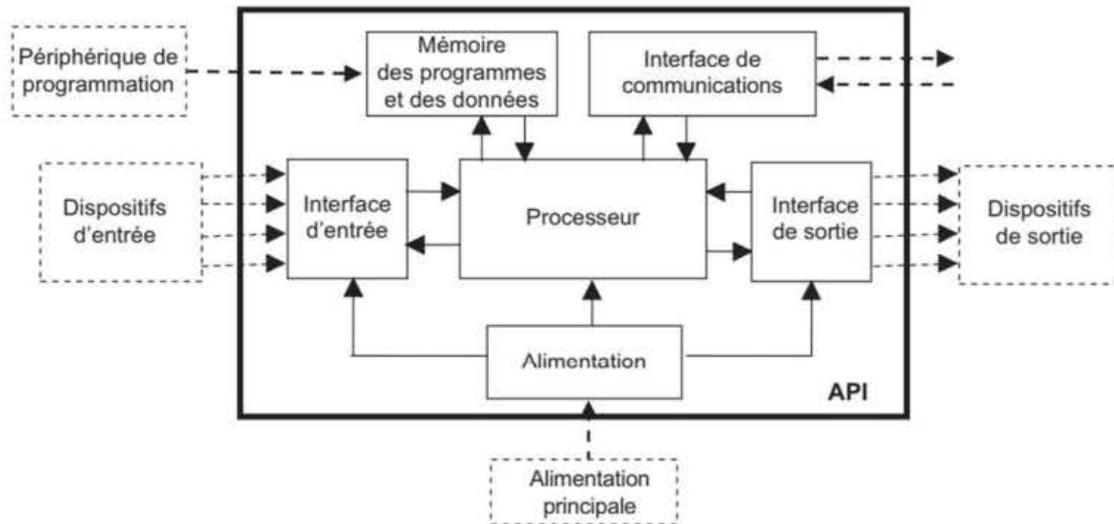


FIGURE 5.5 – Structure d'un API [24].

5.2.1 Structure d'un API

Comme illustré par la Figure 5.5, les API sont structurés comme un ordinateur conventionnel. Le traitement est effectué par un processeur dédié (avec une architecture processeur spécifique aux API). Les API sont dotés de mémoire RAM pour exécuter les programmes, et une mémoire ROM contenant le firmware développé par le constructeur de l'API. De plus, Les API ont une ou plusieurs unités d'alimentation redondantes, des interfaces d'entrées-sorties, d'interface de communication filaire ou sans-fils, et un dispositif de programmation.

5.2.2 Programmation

La programmation des API s'effectue en utilisant un langage de programmation. Les langages de programmation des API sont standardisés par la commission de l'électrotechnique internationale. Les langages à contacts sont adoptés pour faciliter la programmation aux automaticiens. En plus, les langages de programmation ont des fonctions et blocs fonctionnels préprogrammés. Les langages les plus utilisés sont :

- langage à contacts (LAD, Ladder Diagram)
- les listes d'instructions (IL, Instruction List)
- les graphes de fonction séquentielle (SFC, Sequential Function Charts)
- le texte structuré (ST, Structured Text)
- les diagrammes de schémas fonctionnels (FBD, Function Block Diagram)

5.3 Frontières technologiques en automatique

5.3.1 Exosquelettes

Un exosquelette est un squelette robotique externe, qui assiste le corps humain dans ses mouvements, ou bien qui permet une mobilité aux personnes avec une déficience physique. Comme montrée dans la [Figure 5.6](#), les exosquelettes sont utilisés dans le domaine médical pour aider les personnes à mobilité réduite, et dans le domaine industriels pour aider les ouvriers dans les tâches fortement mobilisatrices. Dans le domaine militaire, les exosquelettes sont utilisés par les soldats pour les aider à traverser de longues distances avec un matériel lourd, ou pour soulever des poids sans incidence physique. Il existe des exosquelettes militaires capables de s'auto-alimenter en récupérant de l'énergie grâce aux mouvements des jambes. Autre part, on parle d'exosquelettes biomécaniques lorsqu'on implémente des électrodes dans le corps humain par une procédure médicale de pointe. Ce procédé est un vaste domaine de recherche qui vise à donner une mobilité aux personnes tétraplégiques.



FIGURE 5.6 – Exemples d'applications d'exosquelette : application (a) médicale, (b) industriel, et (c) militaire.

5.3.2 Augmentation bionique

La robotique est exploitée dans le domaine médical et bio-ingénierie pour concevoir des implants robotiques, des organes artificiels, ou des prothèses biomécaniques. Ce domaine de recherche promet des progrès consistent avec le développement d'implants en conjonction avec des processus logiciels et mécanique, pour optimiser au mieux les interventions.



FIGURE 5.7 – Prothèse robotique avec retour de sensations, où le patient peut sentir le toucher de la prothèse.

5.3.3 Robotique avancée

Les systèmes de robotiques avancés sont prêts à transformer les opérations industrielles. Comparés aux robots conventionnels, les robots avancés ont une perception, une intégrabilité, une adaptabilité et une mobilité supérieures. Ces améliorations permettent une configuration, une mise en service et une reconfiguration plus rapide, ainsi que des opérations plus efficaces et plus stables. Les coûts de la robotique du future diminuera à mesure que le logiciel remplace de plus en plus le matériel en tant que principal moteur de fonctionnalités. Les axes suivants sont les motifs derrière les efforts en recherche et développement de la robotique avancée :

- **Intuitif** : La programmation de nouvelles tâches par les opérateurs ne nécessite plus de détailler les instructions de programmation.
- **Rapide** : Grâce aux progrès de l'électronique et des moteurs, la robotique du futurs sera plus rapides.
- **Collaboratif** : La communication et l'interaction entre les robots permettent le partage d'informations pour améliorer l'apprentissage.
- **Compact et léger** : Plus petit et facilement redéployée.
- **Agile** : Augmentation de la dextérité pour exécuter des opérations délicates.
- **Modulaire** : Configurations adaptables pouvant être modifiées en fonction de l'application.
- **Auto-surveillance** : Maintenance prédictive et alertes de panne pour augmenter la fiabilité et l'efficacité.

5.4 Emplois et carrières dans l'industrie automatique

Veillez-vous reporter à l'[Appendice A](#).

Conclusion

Le domaine de spécialisation en automatique est gouverné par le contrôle, la régulation, l'asservissement, tout en interagissant avec l'intelligence artificielle, et génie informatique. Les robots sont un concentré de systèmes de contrôle, de régulation, et de systèmes automatisés. La convergence de la robotique, de l'informatique, et de l'intelligence artificielle donnera naissance à des robots autonomes capables de remplir des tâches de façon dynamique sans intervention humaine ; un exemple ici est les sondes et capsules spatiales autonomes, capable de voler, atterrir, parcourir et remplir des missions sur une planète ou astéroïde distant avec une autonomie absolue.

Les lecteurs intéressés par les API sont référés a [24]; et [25, 26] pour une introduction aux composantes de l'automatique.

Annexe A

Employeurs et carrières dans l'industrie du génie électrique

Les deux principaux types de postes techniques disponibles dans les secteurs du génie électrique sont l'ingénieur et le technicien.

A.1 Ingénieurs

Les ingénieurs conçoivent des équipements et des systèmes électroniques et électriques. Ils possèdent une maîtrise (master) ou un doctorat, ce qui leur confère une solide base théorique en sciences et mathématique, combinée à une formation spécialisée dans les circuits et équipements. Dans des postes d'ingénierie, les ingénieurs créent de nouveaux équipements et systèmes à partir de spécifications, qui sont ensuite fabriqués ou implémentés. D'autres ingénieurs sont employés dans la fabrication et dans des postes de service.

A.2 Techniciens

Les techniciens sont le plus souvent employés dans des emplois de service. Le travail implique généralement l'installation des équipements, le dépannage et la réparation, les tests et mesures. Les techniciens peuvent également être impliqués dans l'ingénierie. Ils fabriquent et dépannent des prototypes et participent souvent à la conception des équipements. À ce titre, le technicien est connu en tant que technicien de laboratoire, assistant en ingénierie ou ingénieur associé.

La formation d'un technicien en fondements théoriques et sciences n'est pas aussi approfondie que celle d'un ingénieur. Une formation pratique spécialisée à un équipement ou à un système est souvent plus adéquate.

A.3 Autres positions

Il existe d'autres emplois dans l'industrie autres que ceux d'ingénieur ou de technicien. Par exemple, il existe de nombreux emplois dans les ventes, puisque le matériel et les systèmes complexes nécessitent généralement une formation technique. Le travail consiste à déterminer les spécifications des équipements suivant les besoins des clients, à rédiger des propositions techniques, et à faire des présentations de vente

aux clients. Un autre poste est celui de rédacteur technique. Les rédacteurs techniques génèrent la documentation technique relative aux équipements et systèmes électroniques et électriques, produisant des manuels d'installation et d'entretien, des procédures de maintenance et des manuels d'exploitation pour les clients.

Avec la complexité des équipements et des systèmes, il existe un besoin important de formation, d'où les postes de formateurs. Le travail d'un formateur implique généralement le développement de programmes et manuels de formation.

A.4 Les principaux employeurs

La structure globale de l'industrie est illustrée par la [Figure A.1](#). Les quatre principaux segments de l'industrie sont les fabricants, les revendeurs, les entreprises de services et les utilisateurs et clients finaux.

A.4.1 Les fabricants

Les fabricants traduisent les besoins des clients en produits. Il existe trois types de fabricants :

- **Les fabricants de composants** transforment les matières premières comme le cuivre, silicium..., pour créer des composants.
- **Les fabricants d'équipements** fabriquent des produits complets, par exemple des ordinateurs, des smartphones, des appareils militaires...etc.
- **Les fabricants de systèmes** intègrent les composants et l'équipement en systèmes, tels que les systèmes satellitaires, systèmes de surveillance, système d'énergie...etc.

Il existe de nombreux emplois dans ce secteur pour les ingénieurs, les techniciens, les vendeurs et le personnel de service technique, les rédacteurs techniques et les formateurs.

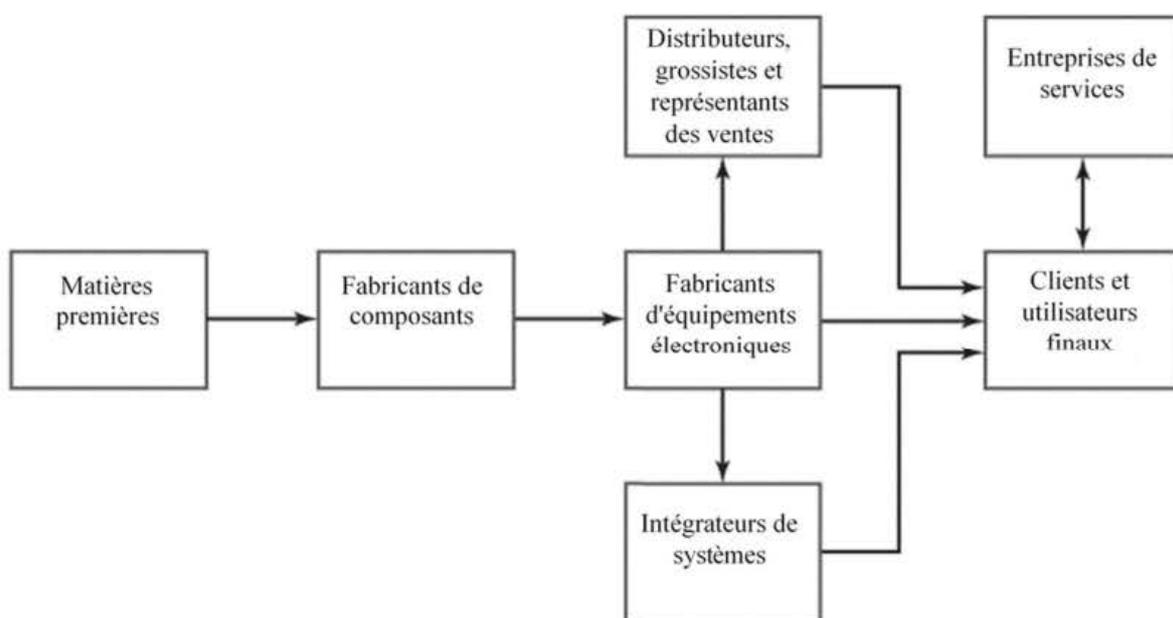


FIGURE A.1 – La structure globale de l'industrie de l'électronique.

A.4.2 Les revendeurs

Les fabricants vendent directement leurs produits aux utilisateurs finaux ou à des revendeurs, qui les revendent à leur tour à l'utilisateur final. Le revendeur ne vend pas seulement l'équipement, mais s'occupe également de l'installation, de l'entretien et des réparations. Un fabricant d'équipements électroniques généralement a un distributeur qui s'occupe des ventes et du service après ventes. La plupart des emplois disponibles dans ce secteur sont dans les ventes, les services et la formation.

A.4.3 Organisations de service

Ces sociétés effectuent généralement des services tels que la réparation, l'installation ou la maintenance. Un exemple est un intégrateur de systèmes, une entreprise qui conçoit et assemble un équipement ou un système complet en utilisant les produits d'autres sociétés. Les intégrateurs de systèmes mettent en place des systèmes pour répondre à des besoins spécifiques. D'autres types d'organisation de services sont les fournisseurs de services de télécommunication, tels que les opérateurs des réseaux cellulaires (par exemple, Mobilis, Djezzy...), les fournisseurs Internet (Algérie Télécom), et fournisseur d'énergie (Sonelgaz).

A.4.4 Les utilisateurs finaux

Les utilisateurs finaux sont un employeur majeur. Aujourd'hui, presque chaque personne et organisation est un utilisateur final d'équipements électroniques. Les principales catégories d'utilisateurs finaux peuvent être des consommateurs, industriels, militaires, ou des gouvernements. Il existe un nombre considérable de prestations envers les utilisateurs finaux. La plupart sont du type service : installation, réparation, maintenance et exploitation des équipements.

Bibliographie

- [1] S Gibilisco. *Beginner's guide to reading schematics*. 2018.
- [2] Ryan Roberts. *Libguides : Electrical engineering : Standards*.
- [3] Technology Overview. *The D-Wave 2000QTM Quantum Computer*.
- [4] John M. *Practical electronics : components and techniques*. O'reilly Media, Inc, 2015.
- [5] Jean Duveau, Marcel Pasquinelli, and Michel Tholomier. *Electronique : IUT 1re annee [GEII]*. DUNOD, 2017.
- [6] P Horowitz and W Hill. *The art of electronics*. University Press, 1989.
- [7] Tahar Neffati. *Electricite generale : analyse et synthese des circuits : cours et exercices corriges*. Dunod, 2008.
- [8] Pierre Mayé. *Électronique par l'expérience*. " Dunod, 2007.
- [9] Anant Agarwal and Jeffrey Lang. *Foundations of analog and digital electronic circuits*. Elsevier, 2005.
- [10] Eric R Johnson, Nic Harrigan, and Mercedes Gimeno-Segovia. *Programming quantum computers : essential algorithms and code samples*. O'reilly Media, Incorporated, 2019.
- [11] Daniel R Tomal and Aram S Agajanian. *Electronic troubleshooting*. Mcgraw-Hill Education, Cop, 2014.
- [12] Michael Jay Geier. *How to diagnose and fix everything electronic*. Mcgraw-Hill Education, 2016.
- [13] Andreas F Molisch. *Wireless communications*, volume 34. John Wiley & Sons, 2012.
- [14] Theodore S Rappaport et al. *Wireless communications : principles and practice*, volume 2. prentice hall PTR New Jersey, 1996.
- [15] Claude Servin. *Reseaux et telecoms*. Dunod, 2013.
- [16] Stephane Lohier and Dominique Present. *Reseaux et transmissions : protocoles, infrastructures et services*. Dunod, Dl , Cop, 2016.
- [17] MR Al Hassan, A Sen, T Zaman, and MS Mostari. Emergence of graphene as a promising anode material for rechargeable batteries : A review. *Materials today chemistry*, 11 :225–243, 2019.
- [18] Chunlong Dai, Guoqiang Sun, Linyu Hu, Yukun Xiao, Zhipan Zhang, and Liangti Qu. Recent progress in graphene-based electrodes for flexible batteries. *InfoMat*, 2(3) :509–526, 2020.

- [19] Engadget. Will gallium nitride electronics change the world?
- [20] Guy Segulier, Francis Labrique, and Philippe Delarue. *Electronique de puissance : structures, commandes, applications*. Dunod, DI , Cop, 2015.
- [21] Frederic De Coulon and Marcel Jufer. *Introduction a l'electrotechnique*. Presses Polytechniques Et Universitaires Romandes, 1995.
- [22] Luc Lasne. *Exercices et problemes d'electrotechnique : notions de base, reseaux et machines electriques*. Dunod, Impr, 2011.
- [23] Max Marty, Daniel Dixneuf, and Delphine Garcia Gilabert. *Principes d'electrotechnique : cours et exercices corriges*. Dunod, 2005.
- [24] W Bolton and Herve Soulard. *Automates programmables industriels*. Dunod, 2019.
- [25] Yves Granjon. *Automatique : systemes lineaires, non lineaires, a temps continu, a temps discret, representation d'etat : cours et exercices corriges*. Dunod, Impr. , Cop, 2010.
- [26] Patrick Prouvost. *Automatique : controle et regulation : cours et exercices corriges*. Dunod, 2010.

Table des figures

1.1	Effets physiologiques du courant électrique.	7
1.2	Diagramme et schémas électroniques : (a) diagramme en blocs, (b) schéma électronique et (c) diagramme pictural.	8
2.1	Fonctionnement de base d'un système électronique	11
2.2	Disciplines et filières de l'industrie de l'électronique	12
2.3	Différentes variétés de résistances.	13
2.4	Différentes variétés de condensateurs.	14
2.5	Symboles et formes des bobines.	14
2.6	Transformateur de base avec un noyau en fer.	15
2.7	Représentation de base d'une diode.	16
2.8	Transistor NPN. E = émetteur, B = base et C = collecteur.	16
2.9	(a) Circuits intégrés boîtier DIP (Dual Inline Package) et (b) puce de surface SMD. . .	16
2.10	Des microprocesseurs gravé sur un wafer de silicium qui sert à leur fabrication.	18
2.11	Exemples de processeurs commercialisés en 2020 : (a) SoC M1 de Apple d'une architecture ARM (5nm, 16 milliard de transistors), (b) SoC ARM Snapdragon 888 de Qualcomm pour les smartphones (5nm, fabriqué par Samsung), et (c) Processeur AMD de type Zen 3 d'une architecture x86 (7nm, fabriqué par TSMC).	18
2.12	Exemples de processeurs et SoC commercialisés en 2021 et 2022 : (a) Processeur AMD de type Zen 3+ d'une architecture x86 (6nm, fabriqué par TSMC), (b) SoC ARM Snapdragon 898 de Qualcomm (4nm, fabriqué par Samsung), et (c) SoC mediatek Dimensity 2000 (4nm, fabriqué par TSMC).	18
2.13	Molécule de graphène	19
2.14	Exemples de circuits flexible.	19
2.15	Ordinateur quantique D-Wave-2000Q : (a) QPU (Quantum Processing Unit) et (b) ordinateur quantique D-Wave-2000Q, où à partir de la température ambiante en haut (en Kelvin), la température diminue à chaque niveau jusqu'à ce qu'elle soit proche du zéro absolu au niveau du QPU .[3]	20
2.16	Exemple de carte IA automobile : NVIDIA DGX spécialisée dans l'entraînement et l'optimisation des réseaux de neurones. Cette carte équipe la majorité des véhicules avec une autonomie de niveau 3, 4 et 5.	21
3.1	Schéma de base d'une liaison de télécommunication.	23
3.2	Communication simplex : diffusion télévision.	23

3.3	Communication Duplex. (a) Full duplex (deux voie simultanées). (b) Half duplex (une voie à la fois).	24
3.4	Les média de transmission.	24
3.5	Spectre électromagnétique et bandes fréquentiels des différents systèmes des télécommunications. ©2018 IEEE. Reprinted, with permission.	26
3.6	Technologie MIMO massive : (a) illustration du principe, et (b) une implémentation dans un réseau 5G.	29
3.7	Internet des objets.	30
4.1	Système triphasé équilibré : lorsque les trois conducteurs sont parcourus par des courants de même valeur efficace, le système est dit équilibré. ©Contenu soumis à la licence CC-BY-SA 3.0. Source : Article Réseau électrique de Wikipédia en français.	32
4.2	Tensions et fréquences des réseaux électriques dans le monde. ©Contenu soumis à la licence CC-BY-SA 3.0. Source : Article Réseau électrique de Wikipédia en français.	33
4.3	Structures des réseaux électriques : (a) structure maillée (b) structure radiale, où les postes rouges représentent les apports d'énergie et (c) structure arborescente (le poste rouge représente l'apport d'énergie). ©Contenu soumis à la licence CC-BY-SA 3.0. Source : Article Réseau électrique de Wikipédia en français.	34
4.4	(a) Types de prises domestiques et (b) type de prises par pays. ©Contenu soumis à la licence CC-BY-SA 3.0. Source : Article Réseau électrique de Wikipédia en français.	36
4.5	Poste électrique (on trouve ce genre d'infrastructure aux bornes des villes).	36
4.6	Pylône de lignes électriques : câble de garde en haut (couleur magenta) et des ternes en bleu et rouge. ©Contenu soumis à la licence CC-BY-SA 3.0. Source : Article Réseau électrique de Wikipédia en français.	37
4.7	Illustration de la différence entre un circuit en silicium et en nitrure de gallium (GaN) : le GaN permet des circuits plus petits et plus efficaces.	39
5.1	Systèmes monovariabiles et multivariabiles.	42
5.2	Exemples de types de robot : (a) robot industriel et (b) robot de prototypage et développement.	43
5.3	Exemples de types d'API : (a) API modulaire, et (b) boitier simple[24].	43
5.4	Principe de fonctionnement d'un API : des entrées de la PC vers la PO en sortie	44
5.5	Structure d'un API [24].	44
5.6	Exemples d'applications d'exosquelette : application (a) médicale, (b) industriel, et (c) militaire.	45
5.7	Prothèse robotique avec retour de sensations, où le patient peut sentir le toucher de la prothèse.	45
A.1	La structure globale de l'industrie de l'électronique.	48

Liste des tableaux

1.1	Valeur efficace des signaux alternatifs simples.	6
1.2	Estimations de résistance pour diverses conditions de contact avec la peau.	7
1.3	Estimation de la résistance de divers matériaux (130 cm ²).	8
3.1	Domaines du spectre électromagnétique.	25
4.1	Couleur standard des conducteurs de prises murales.	35