

# **L'électricité en France dans 25 ans**

## **Pénurie ou abondance ?**



## Préambule

*Personne ne dira qu'une pomme tombée de l'arbre pourrait y remonter seule. De la même façon, l'électricité obéit à quelques lois de la nature. Elle existe depuis toujours, par exemple sous forme d'éclairs lors des orages. L'homme a simplement appris à la reproduire, la transporter, la transformer et l'exploiter. Même avec des moyens financiers illimités et toute la volonté du monde, l'électricité aura ses limites comme la pomme a ses limites. Quand on possède les principales clefs du domaine de la production d'électricité, on détecte tous les jours des propos très surprenants voire mensongers. L'idée ici est de vous donner les moyens d'y voir plus clair et de retrouver de l'optimisme sur le long terme.*

*Comment choisir les moyens de produire de l'électricité ? Aujourd'hui, on entend fréquemment qu'un pays répond à la majeure partie de ses besoins quotidiens avec une électricité issue d'énergies renouvelables comme celle qui provient du soleil. Il faut évoquer une autre notion importante, très souvent oubliée par les commentateurs : la puissance électrique nécessaire à chaque instant en fonction des machines en service sur le territoire. J'expliquerai la différence entre énergie et puissance disponible, deux notions distinctes aussi essentielles l'une que l'autre, à prendre en compte impérativement pour faire fonctionner nos réseaux. La France a beaucoup d'atouts, beaucoup de ressources inexploitées. Pour mieux comprendre les possibilités offertes, il faut avoir en tête les quelques principes physiques simples et immuables. Il faut prendre en compte le contexte actuel et les besoins naissants. Il ne faut pas jeter ce qui fonctionne et savoir se mobiliser sur les techniques prometteuses.*

*Quelques enjeux forts alimentent tous les débats :*

*La réalité des phénomènes climatiques n'est plus contestable. Nous le savons, il est urgent de bien réfléchir compte-tenu de l'évolution actuelle de la planète. Nous devons agir pour une transition énergétique. Les choix*

*d'aujourd'hui en matière d'énergie électrique auront une forte incidence sur la vie des générations futures.*

*Le coût de l'électricité est un autre enjeu fort. La relance économique mondiale qui s'est engagée en 2021, après la pandémie, a conduit à de fortes demandes de ressources et une augmentation des prix. L'invasion de l'Ukraine a conduit à la raréfaction de certaines matières et donc, une fois encore, à l'augmentation des prix de l'énergie et donc de l'électricité. Le prix de l'électricité impacte très directement la facture des ménages. Ensuite, les entreprises sont contraintes de répercuter les hausses du coût de l'électricité sur le prix de leurs produits.*

*Nous avons oublié un autre enjeu primordial évident. Nous sommes habitués depuis des décennies à voir la lampe s'allumer quand on appuie sur un interrupteur ou à pouvoir augmenter la température à la maison à toute heure. Fin 2022, les appels à la sobriété pour la tenue du réseau électrique ont rappelé l'importance de la disponibilité du produit électricité.*

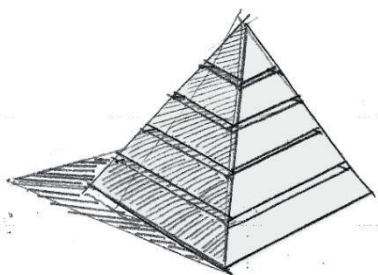
*Tous les pays du monde ne bénéficient pas de la disponibilité de l'électricité telle que nous l'avons connue pendant des décennies. Cela dépend des atouts naturels du pays, des moyens engagés, mais cela résulte aussi de choix technologiques, structurels et économiques. Les décisions prises au sujet des moyens de production d'électricité pour la seconde moitié du 21<sup>e</sup> siècle seront-elles suffisantes et seront-elles suivies des faits ?*

*Trois enjeux principaux doivent donc guider les décisions sur les investissements : la protection de l'environnement, le pouvoir d'achat et l'économie plus généralement, la disponibilité de l'électricité. D'autres enjeux doivent également être pris en compte avant d'implanter une installation (la baisse de débit des cours d'eau, le développement de l'emploi local, l'impact sur le tourisme, ...).*

*Tout moyen de production doit être évalué, avec ses avantages, ses inconvénients, avec réalisme et de façon dépassionnée. Mais, une chose est sûre. Nous souhaitons tous une électricité peu onéreuse, en quantité*

suffisante, disponible à tout moment, de bonne qualité, produite à partir de ressources inépuisables et sans contribution au dérèglement climatique. Aucune technologie existante ne remplit toutes ces conditions pour une production en France. Cependant, la France a beaucoup d'atouts.

Il n'est pas question ici de transformer chacun en spécialiste. Il n'y a pas de formule mathématique dans ce livre, pas de notion complexe. Il s'agit juste de rassembler et d'ordonner des informations que vous avez déjà entendues et d'ajouter quelques notions simples, faciles à retrouver par vous-mêmes. Je préciserai au fur et à mesure celles qu'il faut maîtriser pour comprendre la structure des réseaux électriques et les contraintes à prendre en compte pour



choisir un moyen de production.

Tout ce livre a été relu chapitre après chapitre par des personnes non spécialistes du domaine, afin de vérifier que le niveau technique soit abordable pour tous. Je les en remercie.

Ma conviction profonde est que la France dispose d'atouts considérables pour produire de l'électricité tout en répondant bien mieux que d'autres pays aux enjeux des décennies à venir et de ce siècle. Le réel objectif est de vous permettre de détecter les fausses bonnes idées, de mieux comprendre les décisions prises aux niveaux local, national, international, de percevoir ce qui pourrait se produire à moyen et long terme.

# SOMMAIRE

<b>CHAPITRE 1 - LES CONNAISSANCES DE BASE.....</b>	<b>10</b>
NOTIONS GENERALES	10
L'ENERGIE ET LA PUISSANCE	14
LES MACHINES INCONTOURNABLES DANS L'INDUSTRIE ELECTRIQUE	17
<b>CHAPITRE 2 - LES MOYENS DE PRODUIRE DE L'ELECTRICITE.....</b>	<b>21</b>
LES MOYENS PILOTABLES OU LES MOYENS INTERMITTENTS (NON PILOTABLES)	21
LES MOYENS FONCTIONNANT AVEC UN ALTERNATEUR	22
LES MOYENS FONCTIONNANT SANS ALTERNATEUR	42
<b>CHAPITRE 3 - L'ELECTRICITE, TOUT SAUF UNE MARCHANDISE .....</b>	<b>47</b>
UNE PRODUCTION A FLUX TENDU	47
LE STOCKAGE INTERMEDIAIRE AU QUOTIDIEN	47
LES CONTRAINTES DE PRODUCTION	49
LES RESERVES SOUS DIVERSES FORMES	54
<b>CHAPITRE 4 - LES ENJEUX AU FIL DU TEMPS .....</b>	<b>57</b>
L'ELECTRICITE DEVENUE INDISPENSABLE	57
LA NECESSITE DE COORDONNER LES PRODUCTEURS	60
LE POUVOIR D'ACHAT ET L'ECONOMIE D'UN PAYS	64
L'INDEPENDANCE ENERGETIQUE	74
LES PREOCCUPATIONS LOCALES	76
L'EPUISEMENT DES RESSOURCES NATURELLES	79
LE DEREGLEMENT CLIMATIQUE	81
<b>CHAPITRE 5 - LES MODELES DANS LE MONDE .....</b>	<b>86</b>
LES PAYS SOUVENT CITES EN EXEMPLE	86

LES PAYS SOUVENT DECRIES	89
LA FRANCE	91
<b>CHAPITRE 6 - LES BESOINS EN ELECTRICITE EN FRANCE.....</b>	<b>92</b>
LA CONSOMMATION CES DERNIERES ANNEES	92
LES NOUVEAUX BESOINS EN ELECTRICITE	94
<b>CHAPITRE 7- LA SITUATION ACTUELLE .....</b>	<b>101</b>
LES GRANDES POLEMIQUES	101
LES FORCES ET FAIBLESSES DES MOYENS EXISTANTS	107
LA RECHERCHE	109
<b>CHAPITRE 8- LES GRANDES INCERTITUDES SUR L'AVENIR.....</b>	<b>122</b>
L'EVOLUTION DE LA CONSOMMATION	122
L'EVOLUTION DES MOYENS DE PRODUCTION	125
L'EVOLUTION DES IMPORTATIONS	131
<b>CHAPITRE 9- LE SYSTEME ELECTRIQUE ENVISAGE.....</b>	<b>134</b>
LE CONTEXTE ET LES CONTRAINTES	134
LE CHALLENGE POUR TOUT GOUVERNEMENT	136
LES DECISIONS RECENTES	142
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>147</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>150</b>

# CHAPITRE I - LES CONNAISSANCES DE BASE

---

## NOTIONS GENERALES

### L'ENERGIE ET LA PUISSANCE

### LES MACHINES INCONTOURNABLES DANS L'INDUSTRIE ELECTRIQUE

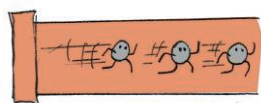
Il ne s'agit pas de vous transformer en expert. Vous ne trouverez pas de formule compliquée dans cet ouvrage.

Avec ce premier chapitre, j'attire votre attention sur les bases en électricité. Si vous êtes vraiment débutant ou si vous avez des connaissances profondément enfouies dans votre mémoire, vous avez peut-être parfois des difficultés pour bien comprendre ce que vous entendez sur le sujet au quotidien. Il est donc important de parcourir les notions de base avant de poursuivre la lecture.

De nombreuses notions ont été volontairement simplifiées afin de vous donner un maximum d'information.

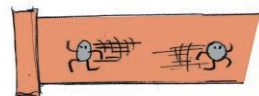
Je fais un zoom sur l'énergie et la puissance qui sont deux notions souvent confondues. Je rappelle le fonctionnement général de quelques machines incontournables.

## NOTIONS GENERALES



**L'électricité ou le courant électrique :** en réalité, l'électricité, ce sont des petites particules, des électrons, qui circulent dans les fils et les câbles électriques.

**Le courant continu et le courant alternatif :** lorsque les électrons parcourent le fil toujours dans le même sens, continuellement, le courant est dit continu. Lorsque les électrons changent de sens périodiquement, le courant est dit alternatif.



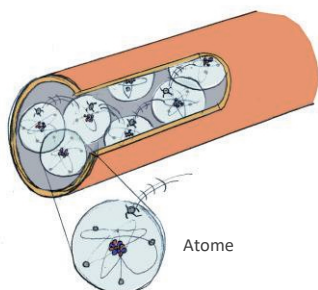


### La fréquence mesurée en Hertz (Hz) :

La fréquence représente le nombre de changements de sens de circulation des électrons dans le circuit par seconde. En France, elle est de 50Hz (50 changements de sens par seconde).

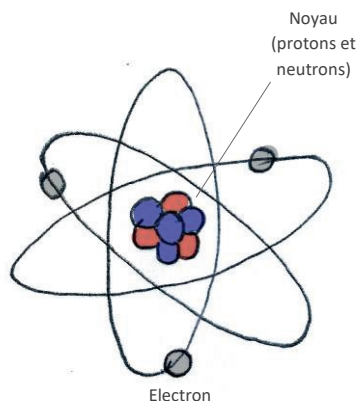
### La matière :

Toute la matière autour de nous est formée d'atomes. Un gramme de cuivre est constitué de milliards et de milliards d'atomes. Quand un courant électrique circule dans un fil, au niveau microscopique, des électrons passent d'un atome à l'autre à très grande vitesse (plus de 200000 km par seconde). Le bois, l'eau, l'air que nous respirons, tout est constitué d'atomes, liés entre eux par des forces qui donnent, selon le cas, l'état solide, liquide ou gazeux.



### L'électron dans son milieu, l'atome :

L'atome est souvent représenté simplement, comme un petit système solaire (modèle du physicien Niels Bohr). Il est composé d'un noyau et d'électrons qui gravitent autour de celui-ci. Dans le noyau, on trouve des protons et des neutrons.



### La matière :

Dans le langage courant, on parle de matière. Cet objet est en fer, celui-ci est en bois. Le fer pur est composé d'atomes de fer uniquement. Le bois est une matière composée d'atomes différents (atomes de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'azote). C'est tout simplement le nombre de protons dans le noyau qui différencie le fer, l'oxygène, le cuivre, le carbone, ... Exemples :

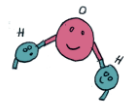
- Hydrogène : symbole H, 1 proton dans le noyau ;
- Lithium : symbole Li, 3 protons ;

- Bore : symbole B, 5 protons ;
- Carbone : symbole C, 6 protons ;
- Azote : symbole N, 7 protons ;
- Oxygène : symbole O, 8 protons ;
- Silicium : symbole Si, 13 protons ;
- Fer : symbole Fe, 26 protons ;
- Cuivre : symbole Cu, 29 protons ;
- Zinc : symbole Zn, 30 protons ;
- Uranium : symbole U, 92 protons.

### Les corps composés :

La molécule est un corps composé de plusieurs atomes qui partagent des électrons.

La molécule la plus connue est celle de l'eau ( $H_2O$ ). Deux atomes d'hydrogène (H) mettent en commun des électrons avec un atome d'oxygène (O).



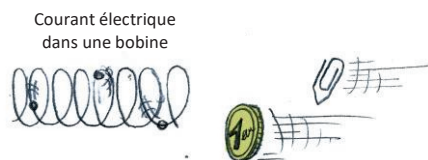
Autre exemple, le  $CO_2$ , le dioxyde de carbone, composé d'un atome de carbone (C) et de deux atomes d'oxygène (O).

### L'électricité dans la nature :

L'électricité n'a pas été créée par l'homme. Le savant grec Thales avait constaté que les objets pouvaient s'attirer (électricité statique). Plus tard, Benjamin Franklin a mis en évidence la présence d'électricité dans l'air lors des orages. Il a inventé le paratonnerre pour se protéger de la foudre (phénomène électrique naturel). Il existe d'autres exemples dans la nature. Certains poissons sont capables de provoquer de petites décharges électriques.



## Le magnétisme créé par un courant électrique :

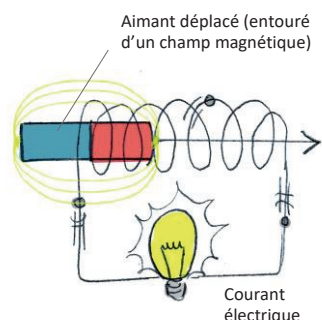


De nombreux inventeurs ont fait progresser le domaine de l'électricité. Je pourrais citer Hans Christian Orsted qui établit une relation entre l'électricité et le magnétisme (les aimants) en 1820. Quant à André-Marie Ampère, il

constate qu'un courant électrique parcourant un fil enroulé autour d'une bobine agit comme un aimant et attire des objets métalliques.

## Le courant électrique créé par le mouvement d'un aimant :

En 1831, Michael Faraday découvre l'induction électromagnétique, la création d'un courant électrique continu dans un fil enroulé en forme de bobine par le rapprochement d'un aimant. Un rapprochement puis un éloignement de cet aimant crée un courant alternatif.



## La tension ou force électromotrice mesurée en volts (V) :

Pour faire circuler les électrons dans un circuit, il faut une certaine force que l'on appelle force électromotrice.

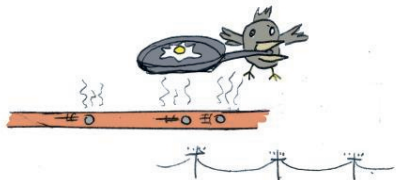
On dit couramment que l'on met les appareils sous tension. Le Volt est l'unité de mesure de la tension électrique. Dans la vie courante, à la maison ou au bureau, la plupart des appareils fonctionnent avec une tension de 220 V.

## La résistance :

Tout objet résiste plus ou moins au passage du courant électrique. Le matériau est déterminant. Le cuivre est choisi en électricité pour sa faible résistance au courant électrique. De même, l'eau résiste peu au courant. Par conséquent, la résistance du corps humain est plus faible par temps humide que par temps sec. D'autres facteurs interviennent sur la résistance d'un objet. La résistance d'un câble au passage du courant électrique augmente si la longueur



de ce câble augmente. Sa résistance au passage du courant diminue si le diamètre du câble augmente (il est plus facile pour le courant de passer).

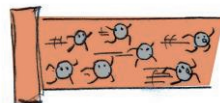


### **L'échauffement des câbles électriques :**

La circulation du courant électrique dans un câble électrique provoque son échauffement. Cette chaleur se dissipe dans l'air. Une partie de l'énergie électrique qui circule est transformée en chaleur (énergie calorifique perdue). Plus la résistance d'un câble augmente, plus il s'échauffe. Notons que le courant alternatif permet de transporter l'électricité avec moins de pertes calorifiques que le courant continu.

### **L'intensité du courant électrique mesurée en Ampère (A) :**

L'intensité d'un courant électrique est une image du nombre d'électrons qui passent dans un câble par seconde. L'unité de mesure est l'Ampère (A). La valeur de l'intensité dans un appareil dépend de la tension qu'on lui applique, de sa résistance au courant (voir ci-dessus).



## **L'ENERGIE ET LA PUISSANCE**

### **L'énergie mesurée en Joule (J), en calorie (Ca) pour l'alimentation :**



Les machines ou les phénomènes naturels permettent de passer d'une forme d'énergie à une autre. Par exemple, nous utilisons de l'énergie électrique pour chauffer de l'eau. Elle se transforme en énergie calorifique. L'unité de mesure de l'énergie est le Joule (J) ou kJ pour kiloJoules).

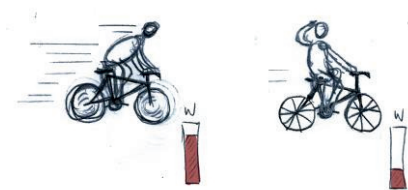
Lorsque nous mangeons, nous emmagasinons également de l'énergie. Lorsque nous bougeons, nous puisons dans ce stock d'énergie. Voici ci-contre une représentation d'une étiquette sur un emballage de produit alimentaire du commerce. Elle indique, entre autres informations, les valeurs d'énergie pour 100 grammes du produit absorbé. Dans l'alimentaire une seconde unité est utilisée, la Calorie (ou kiloCalories kcal). 1 calorie équivaut à 4,18 Joule.

Valeur nutritionnelle pour 100 g	
Energie	1447kJ /344 kcal
Matières grasses	6 grammes
Fibres	15 grammes
Protéines	12 grammes
Sel	0,02 gramme

Exemple d'étiquette sur un emballage de produit alimentaire

### La puissance mesurée en Watt (W) :

La puissance est une notion à bien comprendre afin de ne pas mal interpréter les informations abondantes et souvent erronées sur le sujet. La puissance introduit une notion de rapidité pour accumuler ou dépenser de l'énergie.



Exemple : un coureur cycliste qui sprinte dépense beaucoup d'énergie en peu de temps. Il fait appel à toute sa puissance. Un cyclotouriste dépense l'énergie plus lentement, il fait moins appel à sa puissance. La puissance représente le besoin à chaque instant alors que l'énergie introduit une notion de besoin sur le temps long.

L'unité de mesure de puissance est le Watt (W). Il est souvent décliné en sous-unités comme le kiloWatt (kW) ou le GigaWatt (1 GW = 1 milliard de Watts). Certains domaines, comme la mécanique, utilisent d'autres unités comme le cheval (CV). On parle d'un moteur de 100 CV, plus rarement d'un moteur de 75 kW.

Un réfrigérateur peut, par exemple, avoir besoin de 200 W à un moment donné, une machine à laver de 2500 W.



Plus il y a d'appareils de grosse puissance dans une maison, plus l'installation doit permettre d'appeler une grande puissance totale au cas où tout fonctionne simultanément.

Au niveau du territoire national, la puissance électrique à fournir par les producteurs est la somme de toutes les puissances appelées à chaque instant par les clients en fonction des appareils en service.

### **L'énergie électrique mesurée en Watt.heure (Wh) :**

Il est essentiel de faire une parenthèse sur les unités de mesure de l'énergie en électricité. En effet, les unités sont propres à ce domaine. Pourquoi faire simple quand on peut faire compliqué.

Je l'ai indiqué ci-dessus, l'unité de mesure de l'énergie universelle est le Joule et en alimentation on quantifie souvent l'énergie en Calorie. L'unité de mesure utilisée en électricité est également spécifique. C'est le Watt.heure. L'énergie électrique est obtenue par la multiplication d'une puissance en Watt par un temps en heure (Watt x heures). On écrit plus simplement W.h ou Wh. On doit prononcer « Wattheure ». On entend souvent des commentateurs parler, par erreur, de « Watt par heure » (Le mot « par » renvoie à une division). C'est une confusion qui provient probablement d'une grandeur plus connue, la vitesse. En effet, on obtient une vitesse en divisant une distance par un temps.

1kilowatt.heure (kWh) équivaut 1000 W.h, 1 mégawatt.heure (MWh) équivaut à 1 million de Wh, 1 Gigawatt.heure (GWh) équivaut 1 milliard de Wh, 1 terawatt.heure (TWh) équivaut à 1000 milliards de Wh.



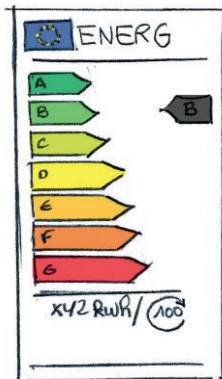
### **La consommation électrique d'une lampe :**

Contrairement à une machine à laver par exemple, la puissance nécessaire pour faire fonctionner une lampe est constante. Si une lampe d'une puissance de 7W fonctionne pendant 4 heures, l'énergie électrique consommée est de 28 Wh ( $7 \times 4$ ).

## La consommation électrique d'une machine à laver :

La machine à laver n'appelle pas la même puissance pour chauffer l'eau que pour faire tourner le tambour. Exemple simplifié :

- Partie chauffage de l'eau 1500W pendant 0,1 heure : Energie 150Wh ( $1500 \times 0,1$ )
- Partie rotation du tambour : 2500 W pendant 0,5 heure : Energie consommée 1250Wh ( $2500 \times 0,5$ )



Les étiquettes ont évolué en 2021 pour les appareils très consommateurs. Nous trouverons désormais au milieu de celles-ci un nombre de kWh d'énergie pour 100 utilisations. C'est plus parlant pour le consommateur. Il vous reste à multiplier par le coût d'un kWh pour avoir le coût en euros pour 100 lavages.

## LES MACHINES INCONTOURNABLES DANS L'INDUSTRIE ELECTRIQUE

### Le générateur :

Le générateur est l'appareil qui fabrique, qui génère le courant électrique. Il provoque la circulation des électrons.