

# Réseaux publics de distribution d'électricité

## Fonctionnement et protection

**Michel Oddi**





## — Chapitre 1 —

# *Un peu d'histoire*

### **1. ■ De l'Antiquité aux premiers balbutiements**

Le terme d'électricité dérive du mot grec ancien *elektron*, qui signifie ambre jaune. En effet, le philosophe grec Thalès de Millet avait découvert vers six cents ans avant Jésus-Christ qu'un morceau d'ambre frotté sur de la soie attirait des brins de paille et pouvait également engendrer des étincelles. D'autres éléments montrent que le monde antique connaissait déjà l'électricité ; par exemple, les romains préconisaient sous l'empereur Claude, vers cinquante ans après Jésus-Christ, l'utilisation des décharges électriques issues d'un poisson torpille pour lutter contre la goutte et la migraine. Mais ce n'est qu'au xviii<sup>e</sup> siècle, marqué par plusieurs découvertes importantes, que le monde de l'électricité s'est véritablement éveillé.

Stephen Grey a découvert en 1729 la nature soit isolante, soit conductrice, des matériaux. Après avoir constaté que de petits objets pouvaient être attirés par le bouchon en liège d'un tube de verre frotté pour le charger en électricité, il éloigna ces petits objets en les accrochant par des ficelles réalisées en différents matériaux. Il s'aperçut alors que, selon la nature de la ficelle, les objets étaient attirés ou pas. Il réussit à transmettre l'électricité jusqu'à deux cent cinquante mètres et en conclut qu'il existait deux types de matériaux, les conducteurs et les isolants.

Pieter Van Musschenbroek, professeur de physique à l'université de Leyde, cherchait à créer du feu en électrisant de l'eau : pour ce faire, il plongeait une tige métallique reliée à une machine électrique<sup>1</sup> dans l'eau d'une bouteille. Un de ses visiteurs ayant retiré sans précaution la tige de l'une de ces bouteilles ressentit une forte secousse. Van Musschenbroek fit part de cette expérience, objet de la figure

---

1. Cette machine électrique produisait de l'électricité statique par frottement.

1.1, à l'Académie des Sciences de Paris en 1745 et ce type de bouteille, ancêtre du condensateur, sera désormais connue sous le nom de bouteille de Leyde.

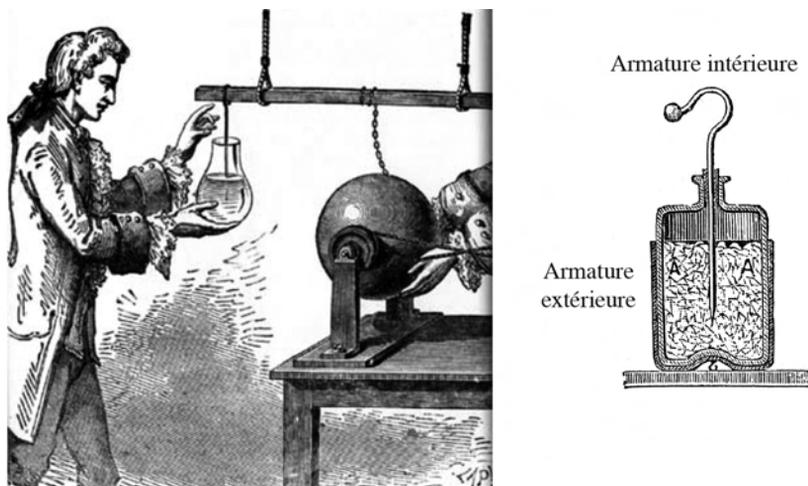


Figure 1.1. Bouteille de Leyde.

Benjamin Franklin s'aperçut, au cours de ses expériences, que ce que l'on appelait alors la force électrique ressemblait à la foudre. Pour montrer la nature électrique des éclairs, il fabriqua en 1752 un cerf-volant relié à un fil de soie muni à son autre extrémité d'une clef métallique et le fit voler par temps d'orage afin qu'il soit foudroyé. En poursuivant ses recherches, il montra que les formes pointues favorisaient l'accrochage de la foudre et imagina le paratonnerre<sup>2</sup>.

Charles-Augustin Coulomb énonça en 1785 la loi qui porte son nom et qui dit que les forces électriques qui s'exercent entre deux charges électriques sont proportionnelles au carré de la distance qui les séparent. Pour le démontrer, il utilisa une balance à torsions, qu'il utilisera également pour étendre sa loi aux interactions entre pôles d'aimant.

Cependant, le réel point de départ du développement de l'électricité est l'expérience menée tout au long des années 1780 par le médecin et philosophe italien Luigi Galvani pour étudier les effets de l'électricité sur les animaux.

Il voulait étudier l'action à distance de l'électricité sur ces derniers. Il utilisa une machine électrique capable de créer des étincelles par frottement ; il accrocha un fil métallique à la moelle épinière d'une grenouille décérébrée et mise à l'écart de la machine électrique. Il remarqua que les muscles subissaient de violentes contractions lorsqu'une étincelle était produite par la

2. L'expérience de Benjamin Franklin a suscité différentes polémiques, car son compte-rendu n'a été publié qu'en 1767 ; il est probable qu'il n'ait pas tenu le cerf-volant par la clef, car cela lui aurait été fatal ; la clef était sans doute reliée une bouteille de Leyde.

machine électrique. Il voulut voir si l'électricité atmosphérique, c'est-à-dire l'électricité produite par les éclairs durant un orage, produisait le même effet, et découvrit par hasard le phénomène de pile électrique. En effet, il transporta son expérience sur sa terrasse et constata, alors qu'il n'y avait aucun orage, que les muscles de la grenouille, posée sur les barreaux en fer de sa terrasse, se contractaient vivement lorsque les fils de cuivre accrochés à la moelle épinière de la grenouille étaient en contact avec les barreaux en fer, comme la figure 1.2 le montre. Galvani pensa que l'électricité atmosphérique s'était lentement accumulée au sein de la grenouille et ressortait au moment du contact des fils de cuivre avec le fer de la terrasse. Il recommença alors la même expérience mais à l'intérieur de la maison, avec différents métaux, et obtint les mêmes résultats. Il conclut alors que :

- les animaux possédaient une électricité spécifique émanant du cerveau et distribuée par les nerfs ;
- les muscles recevaient l'électricité comme des bouteilles de Leyde et que leurs décharges provoquaient les mouvements musculaires.

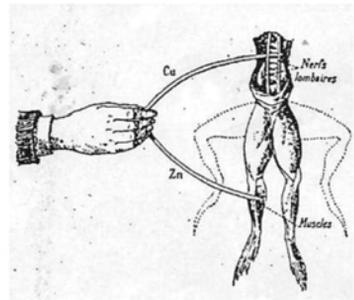
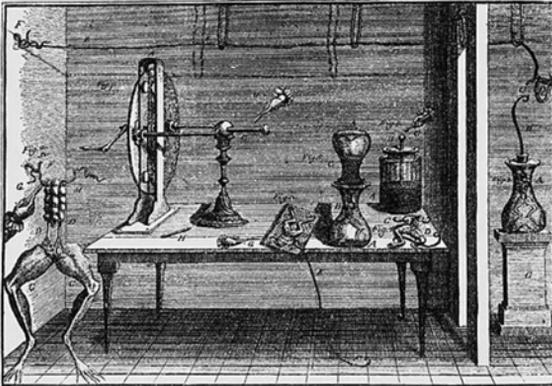


Figure 1.2. Expérience de Galvani.

Un peu plus tard, le physicien italien Alessandro Volta s'opposa à la théorie de Galvani en affirmant que l'électricité était, en fait, produite par la juxtaposition de deux métaux. Il fabriqua la célèbre pile colonne qui porte son nom pour prouver ses dires : il s'agissait d'un empilement de disques successivement de cuivre, de carton mouillé par de la saumure et de zinc, puis à nouveau de cuivre, de carton mouillé, de zinc et ainsi de suite. Il présenta sa pile en novembre 1800 à l'Institut national des sciences, en présence de Napoléon Bonaparte (Figure 1.3). Lorsqu'il rapprocha le fil relié à la partie inférieure de la pile à celui relié à la partie supérieure, une étincelle se produisit.

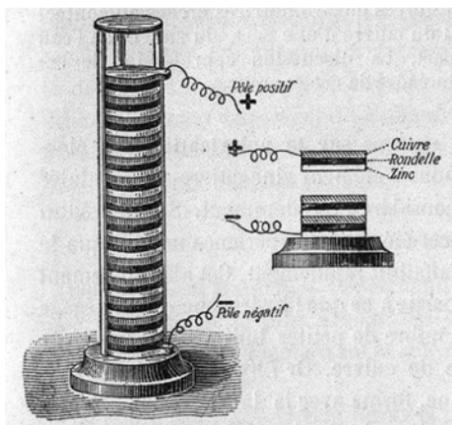


Figure 1.3. Pile de Volta.

## 2. ■ L'arrivée de l'électromagnétisme et de nouvelles découvertes

Le magnétisme était connu depuis l'antiquité ; son nom provient de la ville de Magnésie située alors en Grèce, ville où l'on trouvait des aimants naturels que l'on appelait pierres de Magnésie. Les premiers à utiliser les propriétés du magnétisme furent les Chinois. Des écrits chinois du IV<sup>e</sup> siècle avant Jésus-Christ font état d'une « flèche du sud » qui indiquait sa position à l'utilisateur. Mais ce n'est qu'au tout début des années mille que l'on trouve, dans un ouvrage militaire chinois, la description d'un « poisson du sud », c'est-à-dire un poisson placé dans un bol rempli d'eau et indiquant à tout instant le sud. On peut considérer ce système comme l'ancêtre de la boussole, mais il faut attendre l'année 1190 pour trouver trace des premières utilisations de boussoles en Europe.

Si l'invention de la boussole relança les recherches autour du magnétisme, ce n'est qu'au début du XIX<sup>e</sup> siècle qu'un lien fût établi entre électricité et magnétisme, en ouvrant la voie aux sciences de l'électromagnétisme et de l'électrodynamique. Les découvertes s'enchaînèrent rapidement, depuis la création d'un champ magnétique par un courant jusqu'aux lois de Maxwell, en passant par la fabrication du premier moteur électrique et de la première génératrice.

Le physicien et chimiste danois Hans Christian Ørsted avait découvert, en 1820, le lien entre électricité et magnétisme en s'apercevant qu'un fil métallique relié aux deux pôles d'une pile électrique et placé au-dessus d'une boussole provoquait le déplacement de son aiguille. François Arago et André-Marie Ampère reproduisirent cette expérience, ce qui fit conclure à Ampère que le courant était le même partout dans un circuit et qu'il représentait le débit d'électricité. En poursuivant leurs expériences, Arago et Ampère montrèrent, également en 1820, que deux circuits bobinés en spirale et parcourus par des courants électriques

soit s'attiraient, soit se repoussaient, à l'identique de deux aimants. La figure 1.4 montre le montage utilisé ainsi que le célèbre bonhomme d'Ampère : un observateur est placé le long d'un conducteur de façon que le courant circule de ses pieds vers sa tête ; s'il regarde un point M, le champ magnétique en M est dirigé vers sa gauche<sup>3</sup>.

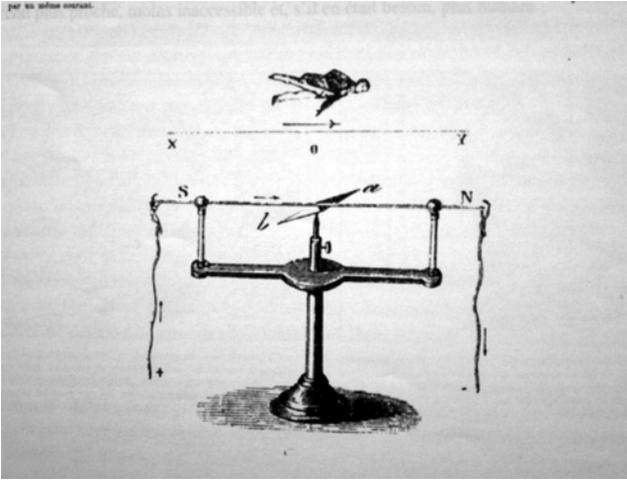


Figure 1.4. Expérience d'Arago et Ampère.

Le physicien anglais Peter Barlow est à l'origine de ce que l'on considère être le premier moteur électrique, connu sous le nom de roue de Barlow. L'expérience eut lieu en 1822. Le pivot d'une roue métallique dentée était relié au pôle d'une pile électrique. Un aimant en forme de fer à cheval était placé de telle sorte que ses deux pôles fussent situés de part et d'autre de la roue. Le bout des dents de la roue trempaient dans du mercure relié à l'autre pôle de la pile comme indiqué sur la figure 1.5. Lorsque le circuit électrique était établi, la roue se mettait à tourner.

3. Deux autres règles équivalentes ont été écrites, celle de la main droite et celle du tire-bouchon de Maxwell. Celle de la main droite explique que lorsque sa paume est tournée vers le point M et que les doigts sont placés sur le conducteur dans le sens du courant, le sens du champ magnétique est donné par le pouce. Pour progresser dans le sens du courant, un tire-bouchon doit tourner dans le sens du champ magnétique.

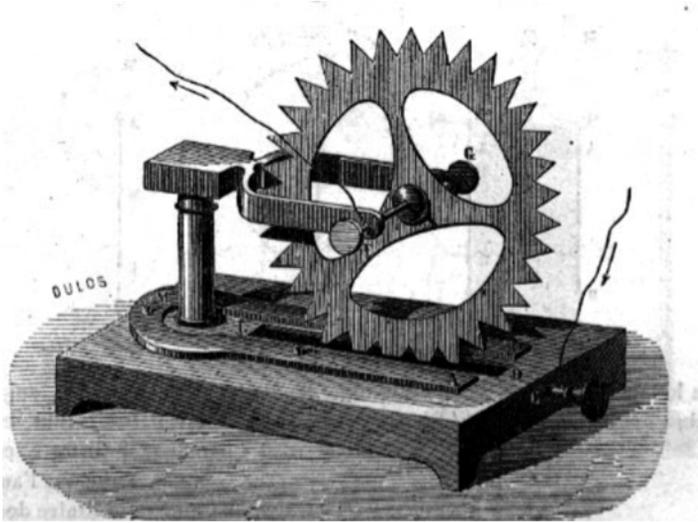


Figure 1.5. Roue de Barlow.

Le physicien allemand Georg Simon Ohm énonça dans son traité *Le circuit galvanique étudié mathématiquement*, publié en 1827, la célèbre loi qui porte son nom et qui dit que la différence de potentiel aux bornes d'une charge électrique est proportionnelle au courant qui le traverse (Figure 1.6).

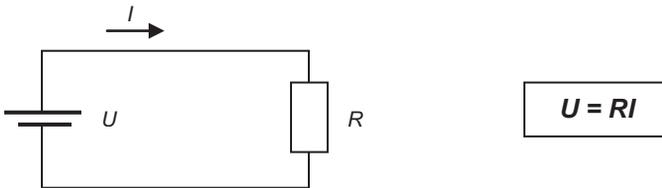


Figure 1.6. Loi d'Ohm.

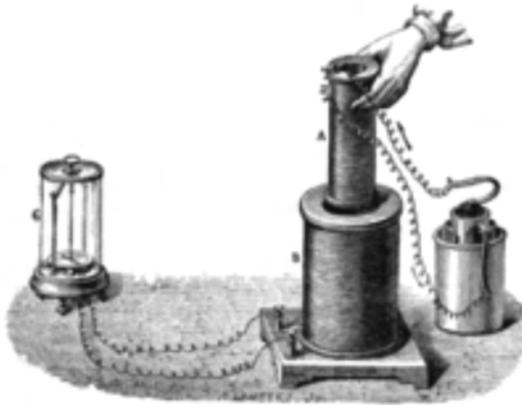
On doit à Michaël Faraday, physicien anglais, les premières lois sur l'électrolyse, qu'il édicta en 1834. Les phénomènes d'électrolyse étaient déjà connus, mais Faraday réussit à montrer que :

- la masse de produit déposé sur une électrode était proportionnelle à la quantité du courant d'électrolyse, indépendamment des formes de la cuve d'électrolyse ou des caractéristiques de l'électrolyte ;
- les équivalents électrochimiques coïncidaient avec les équivalents chimiques<sup>4</sup>.

4. Cette formulation est celle de l'époque : les chimistes avaient constaté que lors d'une réaction chimique, les corps se combinaient toujours dans des rapports constants, par exemple 1 g d'hydrogène et 8 g d'oxygène donnent toujours 9 g d'eau, d'où le nombre 1 comme équivalent chimique de l'hydrogène et celui de 8 pour l'oxygène.

Faraday multiplia les expériences entre 1831 et 1839 et découvrit notamment le phénomène de l'induction. En partant des expériences d'Ampère et Arago qui montraient qu'un courant agissait sur un aimant, il imagina qu'un aimant devait donc pouvoir agir sur un circuit électrique. Après plusieurs tâtonnements il réalisa deux expériences très importantes :

- un aimant ou une bobine alimentée par une pile était rapidement plongé dans une bobine raccordée à un galvanomètre : l'aiguille du galvanomètre déviait immédiatement ; l'aimant ou la bobine était ensuite retiré et l'aiguille déviait aussitôt dans la direction opposée (Figure 1.7) ;
- les deux fils d'une roue de Barlow étaient connectés à un galvanomètre ; lorsque la roue était tournée manuellement, l'aiguille du galvanomètre déviait.



**Figure 1.7.** Découverte de l'induction par Faraday.

Ces deux expériences montrèrent, d'une part, qu'un courant pouvait être induit dans un circuit électrique via le déplacement d'un aimant, voire, d'un autre circuit électrique et, d'autre part, qu'un moteur pouvait aussi se comporter comme un générateur d'électricité.

James Prescott Joule révolutionna le monde de la thermodynamique et contribua grandement à la connaissance de l'électricité. Lavoisier avait énoncé que la chaleur était un fluide alors que Joule considérait, lui, que l'énergie mécanique pouvait se convertir en chaleur. N'étant pas considéré comme un savant reconnu, Joule rencontra beaucoup de difficultés à faire admettre sa théorie. Aussi, pour la démontrer, il réalisa en 1845 sa célèbre expérience décrite par la figure 1.8 : une masse entraînait, en tombant, une machine à aubes qui brassait l'eau contenue dans un calorimètre. Connaissant la valeur de la masse et sa hauteur de chute et en mesurant l'élévation de température de l'eau, Joule établit l'équivalence travail chaleur et pût évaluer la valeur du coefficient d'équivalence. Joule travailla également sur l'énergie électrique et énonça, en 1860, sa célèbre loi qui établit que

**Michel Oddi** est ingénieur diplômé de l'École supérieure d'électricité. Au sein du groupe EDF, il a exercé durant quarante ans son activité dans le domaine des réseaux de distribution électrique, pour leur ingénierie, en tant qu'exploitant et en tant que chercheur senior. Il est l'auteur de plusieurs publications sur ces sujets et continue d'enseigner les réseaux électriques.

### Réseaux publics de distribution d'électricité - Fonctionnement et protection

Les « smart grids » ou « réseaux intelligents » sont présentés comme les réseaux électriques publics d'avenir, mais ils ne peuvent pas être créés ex-nihilo. Ils devront s'appuyer sur les réseaux existants, fruit de plus d'un siècle d'optimisation et de progrès successifs, avec leur réalité physique et leurs lois que l'ingénieur, concepteur ou exploitant, doit connaître pour les comprendre et les maîtriser.

Cet ouvrage revient ainsi aux sources des réseaux électriques publics de distribution. Il s'attache à expliquer comment ils se sont constitués au fil du temps, comment ils doivent être conçus pour garantir la qualité et la fiabilité de l'énergie distribuée ainsi que la sécurité des personnes et des biens, comment ils doivent être protégés et comment et sous quelles conditions ils pourraient évoluer en « smart grids ».

Fort d'une expérience de quarante ans dans le domaine des réseaux électriques publics de distribution et d'une connaissance étendue des pratiques à l'étranger, l'auteur a rassemblé l'ensemble de son savoir dans ce livre, dont l'organisation permet une progression graduelle tout au long de la lecture. Un rappel systématique des **principes théoriques et des théorèmes** de base facilitent la compréhension des explications et des calculs exposés. Les **normes applicables** aux réseaux publics de distribution sont citées et les **principales données numériques** relatives à ces réseaux sont fournies. Enfin, de nombreux **exemples concrets** permettent d'illustrer les différentes théories et méthodes qui y sont développées.

L'étudiant trouvera dans cet ouvrage, véritable référence en matière de réseaux publics de distribution électrique, une théorie complète de ces réseaux, le concepteur et l'exploitant y trouveront des réponses à leurs questions sur leur fonctionnement et leur protection ainsi que des explications sur les risques de dysfonctionnements ; quant à l'ingénieur chercheur développeur, il pourra s'enquérir de l'environnement dans lequel les produits dont il a la charge évolueront et des contraintes de toutes natures qu'ils seront susceptibles de subir.

