

L'invention de la pile électrochimique par Volta

par Jean-Jacques Samueli, Docteur ès sciences physiques
& Jean-Claude Boudenot, Agrégé de physique

Le mémoire de Volta décrivant, en 1800, son invention de la pile électrochimique a pour titre *On the Electricity excited by the mere Contact of conducting Substances of different kinds*¹, *In a Letter from Mr. Alexander Volta, F. R. S. Professor of Natural Philosophy in the University of Pavia, to the Rt. Hon. Sir Joseph Banks Bart. K. B. P. R. S.* Il a été écrit en français, à l'exception du titre, et a été envoyé par Volta à son ami Cavallo à Londres pour être communiqué à la *Royal Society* qui l'a publié dans ses « Transactions ». Cette publication eut lieu à Londres, en 1800, alors que la France était en guerre contre la seconde coalition. On ne connaît pas de tiré à part du mémoire de Volta. La distribution en Europe du volume *des Philosophical Transactions of the Royal society of London*, volume 90 de 1800 a évidemment été perturbée par l'état de guerre entre la France et l'Angleterre et l'édition originale du papier de Volta est rare².

Ce mémoire est justement célèbre. Soulignant son importance, Carter et Muir en 1967, n'hésitaient pas à écrire dans leur *Printing and the mind of man*³ :

"Le caractère indispensable et universel de l'électricité, sous une forme ou une autre, dans la civilisation occidentale, souligne le fait qu'avant 1800 l'environnement humain et l'existence étaient plus proches de la vie dans l'ancienne Egypte que de la nôtre. L'invention de Volta est l'une des premières et des plus importantes causes de ce changement."

Cette invention fut, en fait, non seulement une contribution majeure à la science mais aussi un véritable séisme dans le monde scientifique car, pour la première fois, l'on disposait d'une source de courant électrique permanent. Il faut rappeler qu'avant 1800, l'électricité n'utilisait que des dispositifs chargés électrostatiquement par diverses méthodes. Elle se manifestait par des étincelles

¹ In *Philosophical Transactions*, 90, part 2, pp. 403-431. London, 1800 [trad. [Sur l'électricité excitée par le simple contact de substances électriques de différentes sortes].

² De plus, ce mémoire a été imprimé dans la deuxième section du volume des *Transactions* et certaines bibliothèques n'en possèdent que la première partie. La B.N.F.-Gallica n'a numérisé que la première partie du volume pour cette raison.

³ *Printing and the mind of man* est un livre publié pour la première fois en 1967 qui est basé sur une exposition tenue en 1963. PMM, comme son titre est habituellement abrégé est considéré comme une référence classique offrant une vue générale de l'impact des livres imprimés sur le développement de la civilisation occidentale.

et des commotions que l'on éprouvait lorsque l'on touchait les deux pôles d'une bouteille de Leyde chargée, que l'on appelait souvent, à l'époque, batterie ou bien accumulateur de charges. Les phénomènes électriques étaient donc uniquement des phénomènes impulsionsnels, discontinus, brefs, souvent bruyants et violents liés à la décharge de ces capacités. A l'inverse, la pile de Volta, source à basse impédance, pouvait fournir un courant élevé et permanent et sa technique de réalisation était très simple et à la portée de n'importe quel expérimentateur.

Le volt, unité de force électromotrice

Historiquement, c'est le premier Congrès international d'électricité, tenu à Paris en 1881, qui a adopté le vocable *volt* pour l'unité de force électromotrice, en l'honneur de Volta, inventeur de la pile électrochimique.

Par ailleurs, deux systèmes CGS (centimètre, gramme, seconde), l'électrostatique, basé sur la loi de Coulomb qui exprime la force F s'exerçant entre deux charges q et q' situées à une distance r , dans le vide, et l'électromagnétique basé sur la loi de force d'Ampère (loi de Laplace + loi de Biot et Savart) entre deux éléments de courant (ou, de manière équivalente, sur la force de Coulomb entre deux pôles magnétiques) existent et donnent des équations aux dimensions de la charge électrique dont le rapport est la vitesse de la lumière.

Initialement, la *British Association for the Advancement of Science* (L'Association britannique pour l'avancement des sciences) avait repris en 1862 le principe de mesurer une grandeur électrique ou magnétique à l'aide des grandeurs fondamentales de la mécanique : longueur, masse et temps. L'unité de force électromotrice (fem) cgs était basée sur une idée du physicien Franz Neuman, formulée en 1825. Le Congrès international d'électricité de 1881, suivant l'idée de Neuman, a défini le volt comme égal à 108 unités cgs de fem .

La définition actuelle du volt dans le système international (SI) est la suivante: "Le volt est la force électromotrice entre deux points d'un conducteur supportant un courant de 1 ampère quand la puissance dissipée entre ces deux points est de 1 watt". Donc il est homogène en unités SI à $1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$, et peut également être représenté par 1 joule d'énergie par coulomb de charge.

La réalisation du volt dans ce système international repose donc sur la comparaison d'une force électrostatique à une force mécanique, et les incertitudes liées à ceci sont trop grandes par rapport aux exigences de l'instrumentation scientifique moderne. Aussi, utilise-t-on depuis eux décennies une autre manière de réaliser – ou de conserver le volt, comme on « conservait » le mètre-étalon (l'unité du mètre est elle aussi maintenant conservée en lien avec la fréquence de l'atome de Césium). Cette conservation

du volt repose sur la stabilité des références de tension basées sur « l'effet Josephson », qui dépend uniquement de la stabilité de la fréquence et qui peut facilement atteindre 10^{-12} .

L'effet Josephson est un effet de la supraconductivité, phénomène quantique qui apparaît à très basse température dans certains métaux. Dans l'état supraconducteur, les électrons s'attirent deux à deux et forment des paires, qui sont appelées paires de Cooper. L'effet Josephson est associé au passage de ces paires, par effet tunnel, au travers d'une barrière isolante placée entre deux supraconducteurs, appelée jonction Josephson.

Les laboratoires nationaux de métrologie ont commencé, depuis la 18^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures (tenue en 1987) à utiliser l'effet Josephson alternatif comme représentation du volt et ont adopté par un accord international une valeur conventionnellement vraie pour la constante Josephson K_J , $K_{J-90} = 483\,597,9$ GHz/V avec comme date d'application le 1^{er} janvier 1990. L'exactitude de la relation tension-fréquence $V = (h/2e) \times f$ et son indépendance vis à vis des conditions expérimentales lorsque l'on applique une tension alternative à une jonction Josephson ont amené à considérer la jonction Josephson comme un convertisseur tension-fréquence de précision, et c'est pourquoi aujourd'hui l'effet Josephson est utilisé pour la conservation du volt. La constante de proportionnalité entre la fréquence et la tension est appelée *constante Josephson*.

Nous disons aujourd'hui que Volta avait découvert la différence de potentiel, dite effet Volta, que réalise la réunion de deux métaux ayant des travaux d'extraction différents (énergie nécessaire à l'extraction d'un électron à sa surface) ; il avait découvert ainsi la génération électrochimique du courant électrique. Certes, on ne peut comprendre la théorie de ces phénomènes qu'avec le concept chimique de l'atome (à l'époque quasi-inconnu) et de quantification de l'énergie des couches électroniques de l'atome ; Volta ne pouvait donc, en 1800, élaborer une théorie correcte du phénomène. Il chercha donc en une longue phrase d'environ 270 mots — dont le style est digne de Marcel Proust — à décrire sa découverte expérimentale :

"Oui, l'appareil dont je vous parle, et qui vous étonnera sans doute, n'est que l'assemblage d'un nombre de bons conducteurs de différente espèce, arrangés d'une certaine manière, 30, 40, 60 pièces ou davantage, de cuivre, ou mieux d'argent, appliquées chacune à une pièce d'étain, ou, ce qui est beaucoup mieux, de zinc, et un nombre égal de couches d'eau, ou de quelque humeur qui soit meilleur conducteur que l'eau simple, comme l'eau salée, la lessive, etc. ou des morceaux de carton, de peau, etc. bien imbibés de ces humeurs; de telles couches interposées à chaque couple ou combinaison de deux métaux différents, une telle suite alternative, et toujours dans le

même ordre, de ces trois espèces de conducteurs, voilà tout ce qui constitue mon nouvel instrument; qui imite, comme je l'ai dit, les effets des bouteilles de Leyde, ou des batteries électriques, en donnant les mêmes commotions que celles-ci; qui, à la vérité reste beaucoup en dessous de l'activité des dites batteries chargées à un haut point, quant à la force et au bruit des explosions, à l'étincelle, à la distance à laquelle peut s'opérer la décharge, etc. égalant seulement les effets d'une batterie chargée à un degré très faible, d'une batterie pourtant ayant une capacité immense; mais qui d'ailleurs surpasse infiniment la vertu et le pouvoir de ces même batteries, en ce qu'il n'a pas besoin, comme elles, d'être chargé d'avance, au moyen d'une électricité étrangère; et en ce qu'il est capable de donner la commotion, toutes les fois qu'on le touche convenablement, quelques fréquents que soient ces atouchements."

Tout était dit dans cette unique phrase : la pile de Volta y est définie comme un générateur autonome, de faible différence de potentiel mais de haut débit, et surtout délivrant un courant permanent. Pour le reste, il restait à donner un nom à l'objet. Volta, assurant que son dispositif est semblable à une bouteille de Leyde ou à l'*organe électrique naturel* du poisson-torpille, le baptise *organe électrique artificiel*.

(...) cet appareil, que j'ai nommé « organe électrique artificiel », et qui, étant dans le fond le même que l'organe naturel de la torpille, lui ressemble encore pour la forme, comme j'ai déjà avancé.

Le poisson-torpille

La torpille ou raie électrique est un gros poisson pouvant délivrer des impulsions électriques atteignant 6 kW en crête avec une tension maximale de l'ordre de 200 volts. Les torpilles produisent de la bioélectricité avec leur organe électrique, qu'évoquait Volta. Cet organe est constitué de cellules capables de contractions. Comme toutes les cellules biologiques, celles de la torpille sont entourées d'une membrane qui isole l'intérieur de la cellule ou cytoplasme du milieu extracellulaire. La composition ionique de ces deux milieux étant différente, il existe une différence de potentiel électrochimique aux bornes de la cellule. Dans le cas de la torpille, les cellules ont une grande concentration en canaux ioniques qui sont une catégorie de protéines membranaires perméables à un ou plusieurs ions. L'organe électrique agit donc comme un condensateur qui peut décharger des chocs électriques sous forme d'impulsions initiées par contraction. L'organe électrique de la torpille est très utilisé aujourd'hui dans la recherche en neurosciences pour l'identification des canaux ioniques. Un canal ionique peut être perméable sélectivement à un seul ion tel que le sodium, le calcium, ou le potassium mais peut être perméable à plusieurs ions à la fois. Les canaux ioniques sont présents dans la membrane de toutes les cellules et ont un

rôle important dans la physiologie des cellules excitables électriquement comme, par exemple, les neurones.

Le texte de Volta n'est pas un papier de physique théorique, mais celui d'un expérimentateur de génie. A plusieurs reprises, sous différentes formes, il insiste sur la nécessité d'avoir une solution d'eau salée dans la pile pour qu'elle fonctionne mieux :

« Les disques métalliques bien propres et secs, et les autres non-métalliques bien imbibés d'eau simple, ou, ce qui est beaucoup mieux, d'eau salée ».

« la colonne (...) se trouve en communication avec la couple suivante, par une couche suffisante d'humeur, qui soit de l'eau salée »

« mais, ce qui rend (l'eau) beaucoup meilleure encore, ce sont presque tous les sels, et notamment le sel commun ».

Et être expérimentateur, c'est aussi prendre des risques, notamment en électricité, puisque Volta teste sa pile en plongeant son doigt dans la solution et en évaluant par lui-même la « commotion » électrique qu'il ressent !

« Or, cette force est telle, que je parviens à recevoir d'une telle colonne, formées de 20 paires de plateaux, des commotions qui prennent tout le doigt, et l'affectent même assez douloureusement »

« Les commotions seront déjà beaucoup plus fortes, et s'étendront dans les deux bras jusqu'à l'épaule »

« mais, si l'on ne plonge qu'un doigt seul, en tout ou en partie, les commotions concentrées presque dans lui seul, en seront d'autant plus douloureuses, et si cuisantes qu'elles deviendront insupportables »

LES RECHERCHES DE VOLTA CONCERNANT L'ELECTRICITE

Dès 1769, à l'âge de 24 ans, Alessandro Volta avait effectué des recherches sur l'électricité. Sa première publication insérée dans une revue scientifique est rendue publique en 1775. Elle est relative à l'*Electrophore*, une source d'électricité créée par influence.

En 1778, dans une lettre à Horace de Saussure, intitulée *Sur la capacité des conducteurs électriques*, Volta introduit la notion de "tension électrique". Ce concept lui permet d'exprimer la tendance qu'a un fluide en excès dans un corps à passer dans un second corps qui en est dépourvu. On connaît la postérité qu'a cette notion de tension, mesurée par le *volt*.

Continuant ses travaux sur l'électricité, il met au point une balance électrométrique, qui lui permet, en 1787, pour la première fois, de définir une unité de mesure de la tension. Il appelle "degré fondamental", la trente-cinquième partie de la tension qui "fait lever le plat de sa balance électrométrique du plan déférant 12 grammes de poids" (ce degré équivaut à 13,35 de nos volts).

Mais, en 1791, Luigi Galvani, un anatomiste italien, publie un ouvrage intitulé *Sur les forces de l'électricité dans les mouvements musculaires*⁴. Il y énonce sa théorie de l'*électricité animale* : lorsque l'on touche les nerfs et les muscles d'une grenouille morte avec un compas dont les deux extrémités sont faites de deux métaux différents, l'électricité que Galvani croit présente en permanence dans le corps de l'animal se décharge, entraînant la contraction des muscles. A l'université de Pavie, Alessandro Volta interprète l'expérience de Galvani, non par l'électricité animale, mais par l'électricité due au contact des deux métaux du compas utilisé. Volta, qui vient d'être élu à la Royal Society (1791), attaque donc, dans son *Mémoire second sur l'électricité animale* (1792), cette théorie du "fluide électrique animal" de Galvani. Il stipule que c'est "la diversité des métaux qui agit". Il démontre sa théorie par le fait qu'un arc comportant deux métaux soudés produit, par exemple, une saveur acide lorsqu'il est mis en contact avec les deux faces de la langue.

En 1794, les travaux de Volta sur le condensateur sont récompensés par l'attribution de la prestigieuse médaille Copley de la *Royal Society*. Mais la controverse avec Galvani s'amplifie: ce dernier, avec ses disciples Aldini et Valli, opposent à Volta une série d'expériences qui "démontrent", disent-ils, l'existence du "fluide électrique" dans les grenouilles. Notre physicien réplique dans une série de trois lettres adressées à Friedrich Gren de Halle, portant *Sur l'électricité excitée par le contact des conducteurs dissemblables*. Galvani réitère, en 1797, ses thèses dans ses *Mémoires sur l'électricité animale* dédiés à Spallanzani. Volta répond dans ses *Lettres du citoyen N.N. de Côme* adressées à Aldini. La querelle entre les deux hommes ne prend fin qu'à la mort d'un des protagonistes, Luigi Galvani, le 4 décembre 1798. Quant à Volta, il est forcé de quitter l'université de Pavie, supprimée à la suite de l'invasion de la Lombardie en avril 1799 par les Austro-Russes, et retourne à Côme. "Vers la fin de l'année 1799, dit Volta, [j'ai

⁴ *De Viribus Electricitatis in Motu Musculari Commentarius*, Bologna, Ex typographia instituti scientiarum, 1791.

fait] un grand pas qui m'a conduit à la construction d'un appareil bouleversant". Il vient d'inventer la pile ; il a cinquante-cinq ans.

LA PILE ELECTROCHIMIQUE

En 1796, Volta avait recherché la *force électromotrice* (f.e.m.), selon son propre terme, de diverses combinaisons de métaux. Il lui reste à trouver comment additionner les f.e.m. de divers couples. Il constate très tôt qu'empiler les disques de métaux ne donne rien et que des circuits réalisés uniquement avec des métaux produisaient une f.e.m. égale à celle que les disques des deux extrémités donneraient s'ils étaient mis en contact direct. Où et comment l'idée lui est venue d'intercaler des disques humides ? On l'ignore. Mais le 20 mars 1800, il écrit ce présent mémoire sur la pile et l'envoie à son ami Cavallo à Londres pour être communiqué à la *Royal Society*, où il est lu le 26 juin. Il contient la première description de la pile électrochimique qui délivre un courant continu. Avec un tel générateur, l'âge électrique va pouvoir débiter.

En 1802, Volta écrit⁵ que l'ensemble de ses expériences "prouve donc que 1/60 environ de degré de mon électromètre à paille, constitue la *tension électrique* occasionnée par le contact mutuel du zinc et de l'argent⁶; cette électricité, comme je l'ai déjà dit plusieurs fois est positive dans le premier, négative dans le second."

⁵ *De l'électricité dite galvanique*. Annales de chimie, Paris, tome 40, page 243, 30 Frimaire an X.

⁶ La littérature autour de la pile de Volta n'est pas toujours uniforme sur le second métal (qui d'ailleurs ne joue pas de rôle dans la réaction), mentionnant parfois le cuivre parfois l'argent. Volta lui-même dans son texte, comme on l'a vu plus haut, mentionne les deux métaux : ses dessins en fin d'article étant faits avec une pile zinc/argent, on a gardé l'argent comme second métal dans le présent texte.

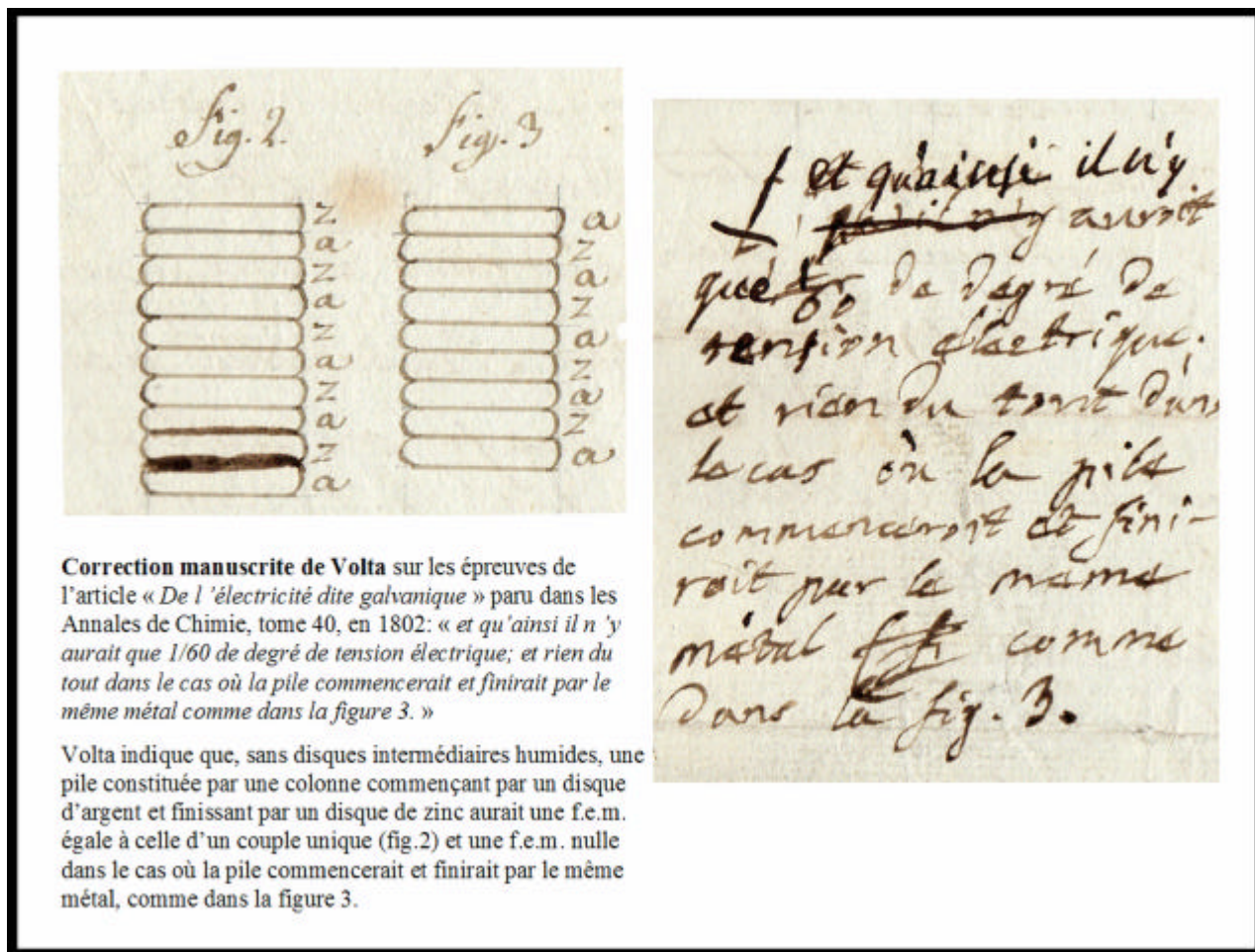


Figure 1. Correction manuscrite de Volta sur son manuscrit de 1802 (coll. privée)

L'EFFET VOLTA

Le travail d'extraction d'un métal est l'énergie minimale nécessaire pour extraire un électron depuis un solide jusqu'à un point extérieur à sa surface. On appelle *effet Volta* la différence de potentiel qui apparaît lorsque deux métaux ayant des travaux d'extraction différents sont mis en contact. Un métal extrait alors des électrons de l'autre et les charges nettes opposées croissent jusqu'à ce que la différence de potentiel entre les deux métaux atteigne la différence des valeurs des travaux d'extraction des métaux. Ce travail, exprimé en électron-volt, est de 4,5 pour le cuivre, 4,26 pour l'argent, 5,1 pour l'or, 3,3 pour le Zinc.

La relation entre l'effet Volta et le seuil de l'effet photoélectrique a été donnée par Einstein en 1906.⁷ Il y indique que la différence des fréquences seuils

⁷ Annalen der Physik, vol 20, pp.199-206, 1906.

de l'effet photoélectrique sur deux métaux est proportionnelle à la différence des travaux d'extraction de ces deux métaux.

En fait, le fonctionnement de la pile de Volta est le suivant : l'oxydation d'un atome de zinc produit deux électrons : $\text{Zn} \longrightarrow 2 \text{e}^- + \text{Zn}^{2+}$ (réaction d'oxydation à l'anode, pôle positif) qui entrent en réaction avec les molécules d'eau dans la solution conductrice : $2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \longrightarrow 2 \text{HO}^- + \text{H}_2$ (réaction de réduction à la cathode, pôle négatif). Au total, il y a réaction d'oxydo-réduction avec apparition d'une différence de potentiel et d'un courant : on constate qu'il y a production d'hydrogène et que le disque de zinc est, petit à petit, consommé.

Utilisant la pile de Volta, dès 1800, le chirurgien anglais Anthony Carlisle (1768-1842) découvre avec William Nicholson (1753-1815), l'électrolyse de l'eau en faisant traverser celle-ci par un courant électrique, qui la décompose en ses éléments constituants, l'hydrogène et l'oxygène. De son côté, Humphry Davy dispose à la *Royal Institution*, dès 1807, d'une batterie de 3000 unités grâce à laquelle il découvrira cette année-là, par électrolyse, le sodium et le potassium à partir de la soude et de la potasse. L'année suivante, il découvrira le magnésium, le strontium et le calcium.

L'ACCUEIL FAIT A LA DECOUVERTE

Revenons à Volta. Après la victoire de Marengo contre les Autrichiens (14 juin 1800), Napoléon rouvre l'université de Pavie et réintègre les professeurs. En juin, il confirme par décret Volta à son poste de professeur de physique expérimentale et président du cabinet de physique. Notre physicien se rend, en septembre 1801, à Paris pour présenter au Premier consul les hommages de l'université de Pavie. Le 7 novembre 1801 (*cf.* photo ci-dessous) il fait une démonstration de ses expériences à l'Académie des sciences devant Napoléon, qui est membre de l'Institut. Il lit également son important mémoire intitulé *De l'électricité dite galvanique* déjà cité. On remarquera que Volta utilise le terme *électricité galvanique* pour insister sur le fait qu'il n'y a pas de différence de nature entre le courant évoqué par Galvani et celui généré par sa pile⁸.

Napoléon propose à l'Académie de lui décerner la médaille d'or (ce qui sera fait le 2 décembre) et de le nommer membre étranger (ce qui sera également

⁸ Volta fera paraître en 1814 un important ouvrage pour démontrer cette identité : *L'identità del fluido elettrico col così detto fluido galvanico vittoriosamente dimostrata con nuove esperienze ed osservazione. Memoria comunicata al Signore Pietro Configliachi*. Pavie, 1814.

fait le 5 septembre 1803) en lui assignant une donation et une rente viagère⁹. Il nommera Volta membre de l'Institut National Italien en 1802, puis il lui décernera la Légion d'honneur en 1805 ; il le fera sénateur du royaume d'Italie en 1809 et enfin comte du royaume d'Italie l'année suivante.

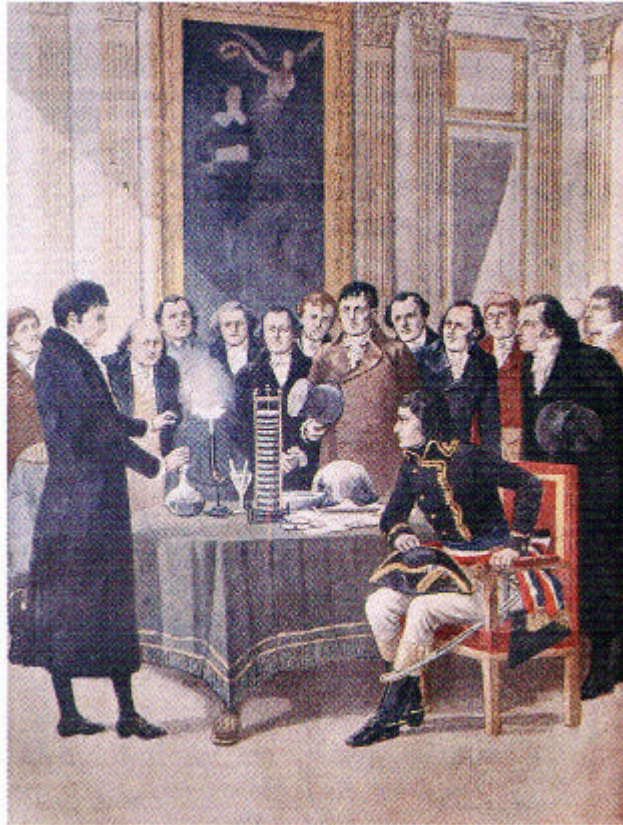


Figure 2. Volta présente sa pile au Premier consul Bonaparte.

L'admiration de Napoléon pour Volta

Arago, dans son *Eloge historique* d'Alexandre Volta, montre bien l'admiration que Napoléon vouait à Volta : "D'après l'invitation du général Bonaparte, conquérant de l'Italie, Volta revint à Paris en 1801. Il y répéta ses expériences sur l'électricité par contact devant une commission nombreuse de l'Institut. Le premier consul voulut assister en personne à la séance dans laquelle les commissaires rendirent un compte détaillé de ces grands phénomènes. Leurs conclusions étaient à peine lues qu'il proposa de décerner à Volta une médaille en or destinée à consacrer la reconnaissance des savants français. Les usages, disons plus, les règlements académiques, ne permettaient guère de donner suite à cette demande ; mais les règlements sont faits pour des circonstances ordinaires, et le professeur de Pavie venait de se placer hors de ligne. On vota

⁹ Napoléon ordonne la construction en 1813 d'une grande batterie, de 600 unités, dans les sous-sols de l'École Polytechnique.

donc la médaille par acclamation ; et comme Bonaparte ne faisait rien à demi, le savant voyageur reçut le même jour, sur les fonds de l'État, une somme de 2000 écus pour ses frais de route. La fondation d'un prix de soixante mille francs en faveur de celui qui imprimerait aux sciences de l'électricité ou du magnétisme une impulsion comparable à celle que la première de ces sciences reçut des mains de Franklin et de Volta, n'est pas un signe moins caractéristique de l'enthousiasme que le grand capitaine avait éprouvé. Cette impression fut durable. Le professeur de Pavie était devenu pour Napoléon le type du génie. Aussi le vit-on, coup sur coup, décoré des croix de la Légion D'honneur et de la Couronne de Fer ; nommé membre de la consulte italienne ; élevé à la dignité de comte et à celle de sénateur du royaume lombard. Quand l'institut italien se présentait au palais, si Volta, par hasard, ne se trouvait pas sur les premiers rangs, les brusques questions : « Où est Volta ? Serait-il malade ? Pourquoi n'est-il pas venu ? » montraient avec trop d'évidence, peut-être, qu'aux yeux du souverain, les autres membres, malgré tout leur savoir, n'étaient que de simples satellites de l'inventeur de la pile. « Je ne saurais consentir », disait Napoléon en 1804, « à la retraite de Volta. Si ses fonctions de professeur le fatiguent, il faut les réduire. Qu'il n'ait, si l'on veut, qu'une seule leçon à faire par an ; mais l'Université de Pavie serait frappée au cœur le jour où je permettrais qu'un nom aussi illustre disparût de la liste de ses membres ; d'ailleurs, ajoutait-il, un bon général doit mourir au champ d'honneur. » Le bon général trouva l'argument irrésistible, et la jeunesse italienne, dont il était l'idole, put jouir encore quelques années de ses admirables leçons."

La pile électrochimique de Volta fut à l'origine d'une cascade de découvertes qui auraient été impossibles sans cette source permanente d'énergie électrique.

Pour ne citer que quelques unes d'entre elles, faites dans les premières décennies du dix-neuvième siècle:

1802: *Humphry Davy*, invention de l'électrolyse et de l'électrochimie, grâce auxquelles il découvre les éléments chimiques suivants : sodium, potassium, calcium, magnésium.

1820: *Hans Christian Oersted*, déviation de la boussole par un courant électrique

1820: *André Ampère*, force sur un courant dû à un champ magnétique

1820: *Biot and Savart*, loi de la force entre un courant et un champ magnétique

1821: *Michael Faraday*, premier moteur électrique

1823: *Johann Schweigger*, galvanomètre

1827: *Georg Ohm*, loi d'Ohm de la résistance électrique

1831: *Michael Faraday*, induction électromagnétique

- 1831:** *Michael Faraday*, lignes de forces électromagnétiques
- 1831:** *Michael Faraday*, dynamo électrique
- 1831:** *Michael Faraday*, transformateur électrique
- 1833:** *Michael Faraday*, lois de l'électrolyse
- 1833:** *Joseph Henry*, self inductance
- 1834:** *Heinrich Lenz*, Lois des forces électromagnétiques
- 1840:** *Joule and Helmholtz*, l'électricité est une forme d'énergie
- 1843:** *James Joule* équivalent mécanique et électrique de la chaleur.

Il est à noter qu'en 1836, l'Anglais John F. Daniell (1790-1845) inventa la pile qui porte son nom et qui utilise deux électrolytes, le sulfate de cuivre et le sulfate de zinc. La pile Daniell, plus sûre et moins corrosive, remplaça alors la pile Volta Zn/Ag.

De nos jours, environ sept milliards de piles sont produites chaque année.

NdA : Les auteurs remercient vivement Alexandre Moatti pour sa participation à la rédaction de la présente analyse.