

# L'ampère : la question des unités indépendantes et la naissance du SI

Le courant électrique est aujourd'hui une des sept grandeurs de base du SI, c'est-à-dire que cette grandeur est dimensionnellement indépendante des autres. Ainsi un ampère ne s'exprime pas en fonction des mètres, secondes et kilogrammes. Il s'agit là d'un choix possible parmi d'autres, qui a mis plus d'un siècle à s'imposer, et que nous exposons dans les sections 1 et 2. Il est important de comprendre qu'il n'y a dans ces choix d'unités indépendantes rien de fondamental, mais uniquement des questions pratiques. La partie III explorera cette question plus en détail. Nous allons également voir ici que cette histoire est aussi celle de la naissance du SI. Enfin, le courant électrique est aujourd'hui mesuré de façon très précise via des phénomènes quantiques (section 3), ce qui a mené à une redéfinition de l'unité ampère en 2019 (section 4).

## 1 La question d'une unité électrique indépendante des unités mécaniques, et naissance du SI

### Début de la théorie électrique et premières unités

Les premières théories quantitatives sur l'électricité et l'électromagnétisme naissent au début des années 1800 avec la mise au point de la pile par Alessandro Volta (1800), la compréhension de l'électrolyse par Michael Faraday (1834), et les énoncés des lois de Coulomb (1785) ou d'Ampère, Biot et Savart (1820-27) pour l'électrostatique et la magnétostatique. Les systèmes d'unités électriques sont longtemps restés divers et variés [34] : courants mesurés en

unités d'un galvanomètre quelconque ou en grammes de cuivre déposés par heure dans une cuve d'électrolyse, résistances étalons définies comme celle d'une colonne de mercure de dimensions bien précises, ou encore comme celle d'un kilomètre de câble télégraphique "standard", etc. Les appareils ne sont pas étalonnés et ils ne permettent que des mesures comparatives, c'est-à-dire que si l'aiguille du galvanomètre est deux fois plus déviée alors le courant est deux fois plus important, et non pas des mesures absolues. Les mesures comparatives sont utiles pour établir des lois de proportionnalité, mais ces lois ne peuvent pas faire apparaître les constantes de proportionnalité.

La situation change radicalement dans les années 1880 lorsque l'industrie s'empare du domaine avec la naissance du télégraphe, de l'éclairage, des moteurs électriques et des génératrices. Il faut alors pouvoir comparer les dispositifs, utiliser les mêmes tensions ou courants d'un endroit à un autre, bref, avoir un système d'unités unifié à l'échelle d'un ou de plusieurs pays.

### Vers l'utilisation d'unités absolues basées sur la mécanique

Comment donc mesurer les grandeurs électriques de façon précise et absolue (c'est-à-dire en référence à des unités et des procédures reproductibles partout) ? Cette question s'inscrit dans un mouvement de fond dans la mathématisation des sciences physiques : celui du passage progressif de l'usage de la géométrie et des relations de proportionnalité, à l'usage de l'algèbre avec égalités vraies (et non plus de proportionnalité). Ce mouvement a déjà débuté en mécanique avec les travaux d'Euler entre 1740 et 1765, puis de Lagrange (et son traité paru en 1788) : les grandeurs comme la vitesse, l'accélération, la force, sont mesurées par rapport à des unités absolues et les lois physiques sont des égalités vraies et non plus des relations de proportionnalité. Prenons l'exemple de la chute libre. Galilée écrit dans ses *Discours* [84, 1638] : "nous avons toujours trouvé que les espaces parcourus étaient entre eux comme les carrés des temps". Newton formule aussi ses lois ainsi. Ce n'est qu'autour de l'époque d'Euler qu'apparaissent des écritures comme  $z = gt^2/2$  (et encore pas tout à fait avec le sens actuel). Fourier poursuit ceci pour la théorie de la chaleur avec son ouvrage en 1822. Contrairement à une écriture en relations de proportionnalité, l'écriture avec égalités vraies permet l'utilisation d'un arsenal mathématique bien plus performant : équations différentielles, intégrales... et l'émergence des unités absolues va réellement de pair avec la mise en écriture mathématique de la théorie.

Concernant le domaine qui nous intéresse ici, l'électromagnétisme, la première méthode provient de l'étude du magnétisme terrestre et concerne la mesure de l'intensité du champ magnétique  $\mathbf{B}$ , dont les mesures se multiplient vers 1800. La période d'oscillation d'une aiguille aimantée dépend de cette intensité du champ magnétique, ce qui peut donc en permettre une mesure. Mais elle dépend aussi du moment magnétique de l'aiguille, qui reste inconnu. On obtient donc une mesure dite relative, ou comparative, car elle

utilise une grandeur locale à l'expérience (le moment magnétique de l'aiguille) qui n'est pas connue et qui s'élimine lorsqu'on fait le rapport de deux mesures :  $B_1/B_2 = (T_2/T_1)^2$  si  $T_1$  et  $T_2$  sont les périodes d'oscillation de la même aiguille dans deux expériences. Il faut donc conserver l'aiguille utilisée, utiliser la même, et être certain qu'elle ne se désaimante pas ! C'est une parfaite illustration de la limitation des mesures comparatives, alors qu'une mesure dans une unité absolue (reproductible partout) permet une pérennité complète et des comparaisons des mesures effectuées à tout endroit et toute époque. Il faut donc une méthode de mesure dite absolue, en référence à des unités définies de façon à être reproductibles partout, comme les unités mécaniques (seconde, kilogramme, mètre).

Le naturaliste Alexander von Humboldt, qui a déjà produit des mesures relatives, interpelle Gauss sur cette question. En 1832, Gauss aidé de Weber, repartent de travaux antérieurs de Poisson et mettent au point une méthode de mesure de  $\mathbf{B}$  à partir d'unités mécaniques absolues [120]. Il faut pour cela mesurer la période d'oscillation d'un aimant permanent  $\mathbf{M}$  dans le champ magnétique  $\mathbf{B}$  à mesurer, ce qui permet d'en déduire le produit  $B \times M$ . Comme le moment magnétique  $\mathbf{M}$  est inconnu, Gauss utilise un second aimant soumis aux actions du champ  $\mathbf{B}$  et de l'aimant  $\mathbf{M}$ , et la traduction de l'équilibre statique de ce second aimant donne une relation entre  $B$  et  $M$  qui, combinée à la connaissance du produit  $B \times M$ , permet d'en déduire l'intensité du champ  $\mathbf{B}$  (voir encadré page 113).

La méthode fait intervenir des grandeurs mécaniques uniquement et permet de mesurer  $\|\mathbf{B}\|$  en fonction de celles-ci : la relation (10.3) montre que la dimension du champ magnétique est  $\text{M}^{1/2} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{L}^{-1/2}$ , ce qui est encore la dimension de  $\mathbf{B}$  dans le système CGS gaussien actuel. Gauss et Weber utilisent le millimètre, le milligramme et la seconde comme unités mécaniques de base pour exprimer leurs résultats [165]. Cette méthode permet des mesures précises et unifiées de  $\mathbf{B}$  dans des observatoires sur toute la surface du globe (la fameuse campagne magnétique coordonnée par Sir Edward Sabine entre 1840 et 1860), et ainsi de comprendre les premiers mécanismes d'évolution du champ magnétique terrestre, notamment en les reliant à l'activité solaire. Entre 1832 et 1851, Gauss et Weber étendent la méthode à toutes les grandeurs électriques. Les domaines de la magnétostatique et de l'électrostatique, encore qualitatifs avant les travaux de Coulomb en 1785, deviennent ainsi pleinement quantitatifs (tout ceci sera détaillé dans la partie IV).

### **Un système complet : le système CGS, où l'ampère est une unité dérivée des unités mécaniques**

Plusieurs systèmes d'unités se développent sur ce modèle. En 1861, la "British Association Standards" mobilise un comité qui a pour objectif de bâtir un système d'unités qui servira de standard en Angleterre. Il comprend Kelvin, Maxwell, Wheatstone..., qui s'appuient sur les travaux de Gauss et Weber

pour exprimer les grandeurs électriques et magnétiques en fonction des grandeurs mécaniques seulement. Le système de grandeurs mécaniques choisi est le système métrique décimal : longueur (avec pour unité de base le mètre en 1861, puis le centimètre lors d'un second comité en 1873<sup>1</sup>), masse (gramme) et durée (seconde). Il faut ensuite choisir une équation de la théorie de l'électromagnétisme qui relie une grandeur électrique à une grandeur mécanique, et ils prennent pour cela la loi de la force d'Ampère entre deux fils rectilignes infinis séparés d'une distance  $d$  et parcourus par des courants  $I_1$  et  $I_2$  :

$$\frac{dF}{dl} = \frac{2I_1I_2}{d} \quad (10.1)$$

(le facteur 2 est là par choix de convention). La force par unité de longueur  $dF/dl$  et la distance  $d$  sont des grandeurs mécaniques mesurables indépendamment, ce qui permet par cette formule *d'en déduire une mesure du courant électrique*. Soulignons que le choix du préfacteur 2 sans dimension est libre, et qu'il permet de fixer la manière de mesurer le courant. Ainsi, d'après la relation (10.1), le courant a pour unité  $\text{g}^{1/2} \cdot \text{cm}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Toutes les autres unités électriques sont déduites de ceci de façon dite *cohérente*, c'est-à-dire à travers les formules de la théorie, qui sont aussi celles qui en permettent la mesure :

- l'unité de charge est celle déposée par une unité de courant pendant une seconde (relation  $q = I \times t$ ),
- le champ électrique est mesuré par exemple via la loi de Coulomb ( $q_1 E = F_{2 \rightarrow 1} = c^2 q_1 q_2 / d^2$ , les charges étant connues et  $c$  étant la vitesse de la lumière dans le vide, on peut en déduire  $E$ ),
- le potentiel électrique est déduit d'une mesure du champ électrique et d'une longueur ( $\Delta V = E \times l$ ),
- la résistance est mesurée en utilisant la loi d'Ohm,
- et ainsi de suite pour toutes les grandeurs.

Par exemple l'unité de charge est celle du courant multipliée par des secondes, donc le  $\text{g}^{1/2} \cdot \text{cm}^{1/2}$ , ou encore on montre que celle de résistance est le  $\text{cm}/\text{s}$ . On crée en plus un système dit "pratique" où on donne des noms à des multiples intéressants, par exemple 1 ohm =  $10^9 \text{ cm}/\text{s}$ . C'est ici que commence la tradition de donner des noms de scientifiques aux unités : ohm, weber et volt pour les unités de résistance, de courant et de tension. Enfin, des réalisations pratiques sont fabriquées, par exemple des résistances étalons de 1 ohm sont déposées à Londres. Ainsi est né en 1862 le système CGS<sup>2</sup>, qui perdure encore aujourd'hui dans certaines contrées ou dans certains domaines. Les constantes  $\mu_0$  et  $\varepsilon_0$  n'existent pas dans ce système. Voir le tableau 10.1 page 124 pour un rapide tour d'horizon.

1. Le choix du centimètre se fait à une voix près, sur une insistance de Kelvin pour que la masse volumique de l'eau vaille 1 dans les unités de base [165].

2. Il existe plusieurs versions du système CGS, celui-ci est le CGS électromagnétique non rationalisé.

Les Anglais sont donc en avance avec leur système CGS, et il serait souhaitable qu'une telle uniformisation s'étende au continent européen. La France, forte de la tenue de la Convention du mètre en 1875 et de la création du BIPM et de la CGPM, organise à Paris en 1881 le premier Congrès International d'Électricité. Les meilleurs physiciens de l'époque y participent : Kelvin, William Siemens, Helmholtz, Clausius ou encore Kirchhoff [34], et en effet, il s'agit de questions qui nécessitent d'être parfaitement au fait de la théorie. On adopte alors le système CGS pratique anglais : un ohm =  $10^9$  unités CGS (donc  $10^9$  cm/s), un volt =  $10^8$  unités CGS, etc.

On précise des réalisations pratiques, par exemple une colonne de mercure aux dimensions bien précises possède une résistance d'un ohm, la f.é.m. d'une pile bien décrite permet de réaliser le volt, et une certaine masse de métal déposée à une électrode permet de réaliser l'ampère. On prend cependant bien soin de distinguer les définitions des réalisations pratiques, les secondes restant des approximations des premières. On crée également un laboratoire national de contrôle des instruments de mesure. Les noms de Joule et de Watt sont donnés au volt-coulomb et au volt-ampère. D'autres congrès des électriciens se tiendront pour progresser dans cette unification<sup>1</sup>.

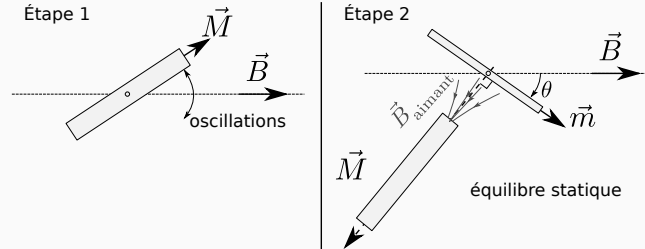
Il est intéressant de noter que si les électriciens possèdent alors un système d'unités cohérent et clairement défini, ce n'est pas le cas du côté des mécaniciens, qui pourtant avaient pris de l'avance avec la convention du mètre en 1875. Mais cette dernière n'a réglementé que mètre, kilogramme et seconde, et pas les autres unités : on trouve alors le kilogrammètre comme unité de travail (1 kilogrammètre = 9,81 joules), le cheval-vapeur comme unité de puissance (1 cheval-vapeur = 736 watts), etc. [34], et les lycéens français apprendront jusque dans les années 1970 à effectuer des conversions (cf. suite)!

---

1. Ou pour régresser. En 1893, sous la pression de certains membres, le Congrès International des Électriciens prend comme *définition* des unités de courant électrique, de tension et de résistance, non plus les relations de la théorie mais des réalisations pratiques indépendantes : un ohm est la résistance d'une colonne de mercure de 106,3 cm de longueur et de masse 14,4521 g, un ampère est le courant qui dépose 0,00118 g/s d'argent à la cathode d'un électrolyseur à nitrate d'argent, et un volt est la fraction 1000/1434 de la f.é.m. d'une pile de Clark [34, 165]. Cette indépendance est bien sûr impossible car ces trois grandeurs sont liées par la loi d'Ohm, qui du coup n'était plus valable! On retourne ainsi à des mesures comparatives. Ces unités, dites "unités internationales", restent en vigueur jusqu'à leur abolition en 1929 par la CGPM (qui se proclame enfin compétente en 1927 pour statuer sur les unités électriques) pour un retour aux unités dérivées définies par les relations de la théorie.

**Encadré : méthode de Gauss de mesure de  $B$** 

Notons  $B$  le champ magnétique à mesurer. Il s'agit en réalité de la composante horizontale du champ, la seule à pouvoir être mesurée par cette méthode. On se munit d'un barreau aimanté de moment magnétique  $M$ .



**Étape 1 :** on fait osciller le barreau  $M$  dans le champ magnétique  $B$ . Le champ  $B$  exerce un couple  $\Gamma = M \wedge B = -BM \sin \theta e_z$  sur le barreau. En notant  $J$  le moment d'inertie du barreau par rapport à l'axe  $Oz$ , on en déduit l'équation du mouvement :  $J\ddot{\theta} = -MB \sin \theta$ , soit pour des oscillations de faible amplitude une pulsation  $\omega_0 = \sqrt{\frac{BM}{J}}$ . Problème pour l'instant, on peut mesurer  $\omega_0$  et  $J$ , mais le moment magnétique  $M$  est inconnu.

**Étape 2 :** on prend une aiguille aimantée de moment magnétique  $m$ . On se place dans une situation comme sur la figure. On fait en sorte que, l'aiguille étant immobile, l'angle entre  $M$  et  $m$  soit droit (simplification des calculs). Ceci se produit pour un certain angle  $\theta$ . L'aiguille  $m$  est à l'équilibre, le couple exercé par  $B$  et celui exercé par l'action de  $M$  se compensent :

$$-mB \sin \theta = - \underbrace{\frac{2mM}{r^3} \left( 1 + \frac{a}{r^2} + \frac{b}{r^4} + \dots \right)}_{\text{couple de } M \text{ sur } m \text{ si } M \perp m}. \quad (10.2)$$

Le développement ci-dessus, permettant de connaître le couple de  $M$  sur  $m$ , est la source principale d'incertitude. Sa détermination théorique nécessite de connaître la répartition volumique d'aimantation du barreau et de l'aiguille, ce qui n'est pas évident. On a par exemple  $a \approx 5L^2/4$  pour un barreau de longueur  $L$  et une aiguille de longueur  $L/2$ , choix pertinent car il annule presque  $b$ .

Notons  $f_{a,b}(r)$  la parenthèse de l'équation ci-dessus. Des deux étapes :

$$B = \omega_0 \sqrt{\frac{2Jf_{a,b}(r)}{r^3 \sin \theta}}, \quad (10.3)$$

d'où la mesure de  $B$  par des mesures mécaniques seulement. On vérifie que l'unité de  $B$  est bien le  $\text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1/2}$ .

**Remarque :** en unités MKSA, il faut ajouter un facteur  $\mu_0/(4\pi)$  au membre de droite de l'équation 10.2.

### Vers le système MKSA et le SI avec l'ampère unité indépendante

Jusqu'ici nous avons présenté, pour en comprendre le principe, un seul système CGS. D'autres choix sont en réalité possibles : par exemple prendre la loi de Coulomb comme relation liant grandeurs mécaniques et électriques, et imposer son préfacteur à 1 :

$$F = \frac{q_1 q_2}{d^2}. \quad (10.4)$$

Cette relation permet une définition et une mesure de la charge  $q$ , puisque  $F$  et  $d$  sont des grandeurs mécaniques définies et mesurables. Ceci donne le système dit électrostatique, qui est développé dès les années 1840 par Gauss, Kelvin ou Weber, pour la théorie électrostatique. L'existence de deux systèmes était inévitable, car les théories de l'électrostatique d'un côté, et de la magnétostatique, de l'induction ou des circuits d'un autre, sont historiquement distinctes. D'autres systèmes de ce type s'ajoutent, dont celui de Hertz en 1863. Puis arrive le débat de la "rationalisation" des systèmes, c'est-à-dire de l'imposition, ou non, de préfacteurs  $1/4\pi$  dans les définitions des lois afin de s'affranchir de leur apparition dans les équations de Maxwell ou dans des expressions intégrées sur une sphère (par exemple notre SI est "rationalisé"). Il y a donc au moins six systèmes CGS (cf. table 10.1), et passer de l'un à l'autre n'est pas un simple changement d'unités puisque les équations n'ont pas la même forme...

De l'avis de beaucoup, la situation n'est plus tenable. Autre désavantage des systèmes CGS : les grandeurs manipulées sont soit très grandes soit très petites, d'où d'ailleurs l'utilisation de variantes. De plus, ces systèmes ne permettent pas tout à fait naturellement de prendre en compte la permittivité et la perméabilité d'un milieu (même si cela est tout à fait possible).

Dès les années 1890, le métrologue italien Giovanni Giorgi, soutenu aussi pas des arguments de Olivier Heaviside, propose un système d'unités où le courant électrique est une grandeur dimensionnellement indépendante, tout comme dans le SI actuel. Ceci nécessite l'introduction de constantes dimensionnées dans les équations qui relient les grandeurs mécaniques aux grandeurs électriques, qui s'écrivent alors ainsi :

$$\frac{dF}{dl} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{d} \quad (\text{loi d'Ampère}), \quad (10.5)$$

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{d^2} \quad (\text{loi de Coulomb}), \quad (10.6)$$

avec  $\mu_0$  et  $\epsilon_0$  les constantes encore utilisées aujourd'hui, qui deviennent des propriétés électromagnétiques du vide. Elles sont dimensionnées afin de rendre l'ampère indépendant des grandeurs mécaniques. Par exemple l'unité de  $\mu_0$  est le  $\text{N} \cdot \text{A}^{-2} = \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2} = \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Giorgi propose de prendre le mètre et le kilogramme comme unités de base de longueur et de masse afin d'avoir des valeurs numériques raisonnablement

grandes ou petites. Et il introduit les facteurs  $4\pi$  (système “rationalisé”) afin de les faire apparaître uniquement dans les équations (10.5) et (10.6), et pas dans les équations de Maxwell ou autres. Les unités d'énergie sont les mêmes en mécanique et en électromagnétisme. Il s'agit alors du système MKSA (mètre, kilogramme, seconde, ampère).

Le chemin sera long et les discussions vives avant son acceptation définitive, et les arguments divers et variables. Par exemple à l'époque de Maxwell, il est courant de penser avec la théorie de l'éther que tous les phénomènes sont réductibles à la mécanique, et que les grandeurs longueur, temps et masse ont réellement une “nature” fondamentale, si bien qu'il est attendu de définir les grandeurs électriques en fonction de ces trois-là. Au contraire, un peu plus tard au début de 1900, on pensera que les champs électromagnétiques et les grandeurs électriques ont “quelque chose qui leur est propre” et qu'il faut donc au moins une grandeur de base indépendante électrique. Ou encore, Sommerfeld et d'autres voient les puissances demi-entières des unités CGS (par exemple l'unité de courant du système CGS électromagnétique s'écrit  $\text{g}^{1/2} \cdot \text{cm}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) comme le signe de trop de contraintes et préfèrent le MKSA car toutes les puissances sont entières... Autant d'arguments bien faibles physiquement ! Nous verrons en réalité dans le chapitre 15 que ce choix est arbitraire, cosmétique, et certainement pas lié à de telles considérations de “naturalité”.

Un début d'accord est finalement obtenu entre les différents comités en 1939 [64]. La Guerre passe, puis il est décidé lors de la 9<sup>e</sup> CGPM (1948, [49] résolution 6 p. 64) d'aller vers un système à quatre unités de base tel que celui initié par Giorgi, et ce malgré les réticences des habitués au système CGS. En 1954, lors de la 10<sup>e</sup> CGPM, une longue discussion prend place (retranscrite dans le compte-rendu [50, p. 71 à 80]) : certains souhaitent faire du coulomb l'unité de base, d'autres la perméabilité magnétique du vide... mais c'est bien l'ampère qui est finalement adopté. L'ampère devient donc une quatrième unité de base, aux côtés du mètre, du kilogramme et de la seconde (et de la température thermodynamique et de l'intensité lumineuse, introduites également en 1954). Les unités mécaniques et électriques sont également enfin unifiées et deviennent toutes cohérentes, c'est-à-dire définies par les relations des théories : l'unité de force devient le newton (défini via  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$  : un newton est la force à appliquer à une masse de 1 kg pour qu'elle accélère de  $1 \text{ m/s}^2$ , ce qui finalement revient aux premières définitions de Newton et des dynamiciens qui l'ont suivi). Le joule qui était défini du côté des électriciens comme l'énergie dégagée pendant une seconde par un courant d'un ampère traversant une résistance d'un ohm, devient également le travail d'une force d'un newton déplaçant son point d'application d'un mètre dans sa direction ( $\delta W = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l}$ ). Le watt est utilisé avec la même signification en électricité et en mécanique.



C'est donc en 1954 que, pour la première fois dans l'histoire de la physique et des techniques, un système d'unités cohérent et complet s'applique à la fois aux théories de la mécanique et de l'électromagnétisme.

En 1960, lors de la 11<sup>e</sup> CGPM, ce système MKSA prend le nom de Système international, ou SI. Il a pour but d'embrasser tous les domaines de la science et de la technologie. Il est promulgué en France en 1961 <sup>a</sup>. C'est alors seulement que les étudiants peuvent cesser d'apprendre les conversions entre cheval-vapeur et watt ou entre les différents systèmes CGS.

La thermodynamique y a été incluse dès 1954 par l'ajout de la température thermodynamique, et la chimie le sera en 1971 par l'ajout de la quantité de matière.

<sup>a</sup>. "Décret n°61-501 du 3 mai 1961 relatif aux unités de mesure et au contrôle des instruments de mesure", <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000006061026>.

L'adoption du MKSA au quotidien n'est pas immédiate. On relève par exemple dans les années 1950, dans le Bulletin de l'Union des physiciens (BUP), des interrogations de la part des enseignants sur la pertinence de celui-ci [132, 191]. Les anciens systèmes restent utilisés en parallèle, et les professeurs se plaignent d'une place importante des efforts consacrés à l'étude des systèmes d'unités : "leur étude est en effet assez fastidieuse, et elle n'enthousiasme pas les élèves" [132, 191]. On constate à ce propos la présence de chapitres conséquents sur les systèmes d'unités dans beaucoup d'ouvrages de référence (Jackson [104], Bruhat [31]), avec des pages entières de tables de conversions. Moins documentées, les polémiques entre chercheurs sont parfois vives. Certains refusent de se "soumettre à la domination des électriciens" et n'utiliseront jamais le système MKSA. Tous ont conscience qu'il s'agit moins de physique que de choix cosmétiques, tout en ayant un avis bien tranché sur ces choix... Et dans l'enseignement secondaire, les conversions entre différents systèmes sont abandonnées avec les programmes issus de la commission Lagarrigue en... 1978.

Tout ceci semble désuet aujourd'hui, tant nous sommes habitués au système MKSA ou SI, coordonné par les décisions internationales du BIPM. N'oublions pas pour autant que certains pays utilisent encore le système CGS (les États-Unis par exemple), et qu'en 1999 la sonde Mars Climate Orbiter [145] s'est écrasée car un des logiciels de navigation utilisait les livres-force anglaises, le reste du système comprenant ceci comme des newtons...

## 2 Entrée dans le SI et définition avec $\mu_0$ en 1954

L'ampère entre donc officiellement dans le SI en 1948, avec la définition suivante :

“L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à  $2 \times 10^{-7}$  newton par mètre de longueur”.

Étant donné que, dans cette expérience idéale, cette force s'exprime comme

$$\frac{dF}{dl} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I^2}{d}, \quad (10.7)$$

ceci revient à fixer la valeur numérique de la perméabilité magnétique du vide à  $\{\mu_0\} = 4\pi \times 10^{-7}$  lorsqu'exprimée en henrys par mètre, c'est-à-dire en  $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$ . Il s'agit de la première constante fondamentale fixée dans le cadre de la définition d'une unité, bien avant  $c$  (le caractère fondamental de  $\mu_0$  peut toutefois être discuté, cf. chapitre 13).

Cette définition est restée en vigueur jusqu'en 2019. Elle suggère une mise en pratique qui consiste à reproduire l'expérience idéalisée décrite dans la définition. On utilise pour cela une balance d'Ampère, dans laquelle on compare la force qui s'exerce entre deux bobines parcourues par un courant à la force exercée par une masse dans le champ de pesanteur. L'incertitude relative sur la réalisation de l'ampère est alors de  $10^{-6}$ , limitée principalement par les mesures de force [157, 69]. Néanmoins, la définition est plus large si on la considère sous l'angle de la fixation de la valeur numérique de la constante fondamentale  $\mu_0$ , et elle permet alors d'autres mises en pratique. Comme la valeur numérique de  $c$  est également fixée depuis 1983, celle de  $\varepsilon_0$  l'est aussi par la relation de définition  $\mu_0 \varepsilon_0 c^2 = 1$ . On peut ainsi réaliser le farad à l'aide de condensateurs à géométrie contrôlée, dont la capacité ne dépend que de  $\varepsilon_0$  et de longueurs (par exemple pour un condensateur plan idéal, de surface  $S$  et de séparation  $l$  entre les électrodes :  $C = \varepsilon_0 S/l$ , donc la connaissance de  $\varepsilon_0$ ,  $S$  et  $l$  permet de réaliser une capacité étalon  $C$  connue), l'ohm par comparaison à l'impédance d'un condensateur, le volt via le champ électrique compensant une force appliquée sur les armatures d'un condensateur (balance dite du volt), puis l'ampère par la loi d'Ohm, le tout avec des incertitudes-types relatives de l'ordre de  $10^{-7}$  à  $10^{-8}$  [69].

### 3 L'ère quantique supplante le SI, les unités hors SI de 1990

Les niveaux d'incertitude précédents deviennent vite grossiers lorsque sont découverts et exploités les effets quantiques Hall et Josephson, que nous avons brièvement présentés dans les encadrés page 87 et 86, et auxquels nous renvoyons. Nous décrivons dans cette section 3 comment la situation a évolué entre les années 1990 et 2019.

#### Les unités 1990

Avec les effets Hall et Josephson il est possible de mesurer les grandeurs  $R/R_K$  et  $U \times K_J$  avec des incertitudes-types relatives de l'ordre de  $10^{-10}$ , bien mieux que les mesures classiques. Mais ceci ne donne pas les valeurs en ohms ou en volts dans le SI, car il faut pour cela multiplier par les valeurs de  $R_K$  ou de  $K_J^{-1}$ . Or celles-ci font intervenir  $h$  et  $e$ , qui sont connus dans le SI d'avant 2019 avec des incertitudes-types relatives de  $10^{-8}$  pour  $h$  ou  $10^{-7}$  seulement pour  $e$  (mesuré via l'ancienne définition de l'ampère). La conversion fait donc perdre en précision.

C'est pourquoi en pratique les mesures électriques de précision étaient réalisées hors SI de la façon suivante. Il a été décidé en 1990 de définir de nouvelles unités électriques qui existeront en parallèle des unités SI : le ohm-90, le volt-90, l'ampère-90, etc.

Le ohm-90 est défini en fixant la valeur numérique de  $R_K$  selon

$$R_K = 25\,812,807 \, \Omega_{90} \quad (\text{définition de l'unité } \Omega_{90}), \quad (10.8)$$

et le volt-90 en fixant celle de  $K_J$  selon

$$K_J = 483\,597,9 \times 10^9 \, \text{Hz/V}_{90} \quad (\text{définition de l'unité } V_{90}). \quad (10.9)$$

Les valeurs numériques sont choisies pour que les unités 90 correspondent aux unités SI en 1990 :  $1 V_{90} \approx 1 \text{ V}$ , etc. Une résistance est alors exprimée en ohm-90. Par exemple  $R = 1,23456 \, \Omega_{90}$  signifie que  $R$  a été mesurée en utilisant l'effet Hall quantique pour obtenir une valeur expérimentale  $a$  du rapport  $R/R_K = a$ ; puis qu'on a utilisé  $R = a \times R_K = a \times 25\,812,807 \, \Omega_{90} = 1,23456 \, \Omega_{90}$ . Ou dit autrement,

$$R = 1,23456 \, \Omega_{90} = 1,23456 \frac{R_K}{25\,812,807}, \quad (10.10)$$

ce qui permet de faire la conversion en ohms si on connaît la valeur de  $R_K$  en ohms. De même pour les tensions exprimées en  $V_{90}$ , puis par suite pour toutes les autres grandeurs électriques.

Ces unités sont évidemment hors SI, et diffèrent légèrement des ohm et volt du SI. On a par exemple, avec les mesures de 2014 [102, équ. 275] :

$$1 V_{90} = (1 + 9,83(61) \times 10^{-8}) \text{ V} \quad \text{et} \quad 1 \Omega_{90} = (1 + 1,765(23) \times 10^{-8}) \Omega.$$

Elles sont usuellement notées en italique.

Si le fait de définir des unités qui fixent les valeurs numériques de  $R_K$  et  $K_J$  a eu pour avantage de ne pas avoir à changer les certificats d'étalonnage à chaque actualisation des valeurs de  $h$  et de  $e$  par le CODATA, et ainsi de rendre les mesures publiées facilement traçables, la situation n'en restait pas moins complexe et peu satisfaisante. Elle était du reste semblable à la situation des années 1900 à 1960 où l'angström était une unité déconnectée du SI et utilisée en spectroscopie, situation qui avait mené à une redéfinition du mètre en termes de longueur d'onde.

## 4 Retour au SI avec la redéfinition de 2019

Nous arrivons ainsi à la redéfinition de 2019. Elle fixe les valeurs numériques de  $h$  et  $e$ , et donc de fait les valeurs numériques des constantes  $R_K = \frac{h}{e^2}$  et  $K_J = \frac{2e}{h}$ . Les unités 1990 deviennent donc obsolètes. Et il n'y a plus de perte de précision lors de l'utilisation des effets Hall et Josephson pour mesurer résistances et tensions, puisque les facteurs  $R_K$  et  $K_J$  sont sans incertitude dans ce SI. On reste donc à des niveaux d'incertitudes-types relatives de  $10^{-10}$ . Ceci permet par suite de mesurer des courants.

Notons qu'avant de faire ceci, il a fallu confirmer les expressions théoriques  $R_K = \frac{h}{e^2}$  et  $K_J = \frac{2e}{h}$  qui interviennent dans les descriptions des effets Hall et Josephson. Ceci implique d'effectuer des mesures indépendantes de  $h$  et de  $e$  d'une part, et de  $R_K$  et  $K_J$  via des courbes d'expériences de Hall et Josephson d'autre part (par exemple mesure de la hauteur des paliers). On avait en 2018 [157] :

$$\begin{aligned} R_K &= \frac{h}{e^2}(1 + \varepsilon_K) \quad \text{avec} \quad \varepsilon_K = (2,2 \pm 1,8) \times 10^{-8}, \\ K_J &= \frac{2e}{h}(1 + \varepsilon_J) \quad \text{avec} \quad \varepsilon_J = (-0,9 \pm 1,5) \times 10^{-8}. \end{aligned} \tag{10.11}$$

La valeur 0 est donc compatible avec les incertitudes pour  $\varepsilon_K$  et  $\varepsilon_J$ , et à ce stade aucun terme correctif n'est nécessaire.

Au-delà de cette sortie des unités 90, la redéfinition de 2019 permet également la mise au point future d'autres réalisations pratiques. Ainsi, les technologies se développent vers plus de portabilité de l'effet Hall, avec des matériaux utilisables à températures plus élevées comme le graphène, ou vers plus de polyvalence, par exemple avec des réseaux de jonctions Josephson commandées

permettant de générer des tensions alternatives. Les technologies quantiques se multiplient. Par exemple, un comparateur cryogénique de courant (CCC) permet de comparer deux courants avec une très grande précision en utilisant la comparaison des flux magnétiques qu'ils produisent à travers un supraconducteur. Citons également les projets de réalisation directe d'un étalon de courant qui consiste à compter individuellement les électrons émis via un phénomène d'effet tunnel (SET : single electron tunneling). Le courant est alors donné par  $I = f \times e$ , où  $f$  est la fréquence d'émission [161] et où  $\{e\}$  est fixée. Ceci permettrait de réaliser indépendamment l'ohm (effet Hall), le volt (effet Josephson) et l'ampère (SET). Cette "fermeture du triangle électrique" permettra un test poussé des théories impliquées dans ces trois réalisations.

### Histoires de constantes : $e$

Expérimentalement, on constate que la charge électrique est quantifiée : toute charge libre ne varie que par palier fini, que l'on note  $e$  et nomme "charge élémentaire". (La charge des quarks varie par tiers de  $e$ , mais les quarks restent confinés au sein des hadrons et ne sont pas "libres".)

L'histoire de  $e$  est essentiellement celle de la découverte de l'électron et de la réalisation que  $e$  est universelle et "élémentaire" (charge des ions, des protons...).

#### L'électricité

Le concept d'électricité est ancien. Par exemple Thalès rapporte, vers  $-600$ , que frotter de la laine et de l'ambre fait que ce dernier attire ou repousse les petits corps. L'ambre se dit *electron* en grec, et c'est ce qui donnera le terme *électricité* employé pour la première fois par Gilbert en 1600. Les recherches sont nombreuses et nous ne pouvons pas les décrire ici. Mentionnons Franklin qui, vers 1750, arrive à la conclusion que la quantité d'électricité – conçue comme deux types de fluides – dans un système isolé est invariable.

#### Électrolyse : la charge élémentaire transportée par les molécules

L'étude de l'électrolyse permet à G. J. Stoney d'être le premier, en 1874, à conceptualiser l'existence d'une charge élémentaire. Il réalise en effet que la charge transférée par "liaison chimique brisée" est toujours la même pour une quantité de matière donnée (par exemple la décomposition de HCl correspond à une liaison brisée, celle de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  à deux ; en écriture moderne :  $Q = ne\xi$  avec  $\xi$  l'avancement et  $n \in \mathbb{N}$ ). La charge élémentaire indivisible de Stoney est celle transportée par un ion chargé minimalement. Il l'appelle d'abord l'électrine, puis en 1891 l'électron [178, 179] (mais cela n'a rien à voir avec l'électron comme particule élémentaire !). En mesurant la charge débitée (par mesure du courant sur une certaine durée), et le