

Chapitre 1

Historique

Le développement des idées n'est jamais rectiligne et leur progression est souvent une succession d'essais et d'erreurs. Par ailleurs, à des époques où les communications étaient limitées, des travaux similaires furent souvent réalisés en parallèles et ce, en toute ignorance. Certains résultats ne parvenaient pas à se diffuser et il était fréquent de redécouvrir ce que d'aucuns savaient déjà. Ceci explique également pourquoi un cours 100 % historique n'est pas concevable. Mais il est bon de savoir d'où viennent les idées que l'on manipule.

I/ Les observations quotidiennes

Tout le monde a déjà fait la désagréable expérience d'une décharge d'électricité statique en descendant d'une voiture. De même, chacun a déjà remarqué les étincelles qui apparaissent en retirant un chandail en laine ou en fibres synthétiques. On peut encore citer la poussière qui se colle sur les écrans cathodiques de télévision. Tous sont des phénomènes liés à l'électricité statique.

Il ne faut pas confondre les phénomènes électrostatiques et les phénomènes magnétiques¹.

Les phénomènes électrostatiques naturels observés ont tout d'abord été à l'origine de mythologies et autres croyances. Pour les Grecs, la foudre était lancée par Zeus et manifestait la colère du Dieu. Plus exotiques, les feux de Saint-Elme qui apparaissent par temps d'orage sur les mats des bateaux étaient de bons présages. Ils ne sont en fait que des manifestations de ce qu'on appelle l'effet de pointe qui est un phénomène électrique. Il en est de même pour Jules César voyant les pointes des lances de ses légionnaires "s'enflammer" un jour d'orage.

Thalès de Milet (-625 ; -547) (celui du théorème de géométrie) rapporte qu'en frottant de l'ambre avec une peau de chat, elle devient capable d'attirer des brins de paille. C'est la 1^{ère} mention connue de l'observation du phénomène. Au fait, en grec, ambre se dit "elektron" ($\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\omega\nu$). On peut reproduire cette expérience en frottant une règle en plastique sur certains tissus ; elle devient capable d'attirer de petits bouts de papier. C'est la triboélectricité (tribein en grec : frotter). Mais on est encore loin de faire le lien entre les étincelles électriques et l'attraction électrique.

1. Nom dérivé de Magnésie, région de la Grèce où l'on trouve de la magnétite, oxyde de fer naturellement aimanté.

II/ De la curiosité populaire aux premières expériences

Il faut attendre le XVI^e siècle pour progresser dans ce domaine.

William Gilbert (Colchester, 1544 - Londres, 1603) constate que ce qui marchait avec l'ambre marche également avec la résine, le verre, mais il ne parvient pas à électriser² les métaux. C'est lui qui "invente" le mot "électrique".

A partir de là, on va se mettre à frotter tout ce qu'on trouve, afin de reproduire le phénomène et dans le but de l'amplifier.

La première machine électrique est construite en 1660 par Otto von Guericke (Magdebourg, 1602 - Hambourg, 1686)³. Elle est constituée d'une boule de soufre en rotation sur laquelle frotte la main. Il remplacera ensuite le soufre par du verre. Il observe la première étincelle électrique artificielle et constate qu'il y a parfois attraction et parfois répulsion entre corps électrisés. Il pressent l'identité entre la nature des étincelles produites par les machines et l'éclair (cf. son livre "Experimenta nova" 1672).

D'autres ont ensuite perfectionné le dispositif, mais le principe de base demeure la triboélectricité. Citons, en 1776, Jesse Ramsden (1735-1800), en 1880, James Wimshurst (1832-1903) et Robert Jenison Van de Graaff (1901-1967).

Il est important de disposer de machines si on veut faire des expériences et ainsi progresser dans la compréhension du phénomène.

Stephen Gray (1670 - Londres, 1736) montre qu'on peut transporter l'électricité par des fils métalliques et à travers le corps humain. Il distingue ainsi les isolants des conducteurs. Il constate que les conducteurs peuvent être électrisés, mais à condition qu'ils restent isolés du sol. L'électricité devient un fluide qui peut s'écouler.

En 1735, Charles Dufay (1698-1739)⁴ et l'abbé Jean-Antoine Nollet (1700-1770) distinguent deux sortes d'électricité. L'électricité vitreuse (celle du verre frotté) s'oppose à l'électricité résineuse (celle de l'ambre frottée).

Mais l'électricité est un fluide fuyant. Il s'accumule par endroit, s'évade par d'autres. On ne parvient pas à le stocker, à l'accumuler de manière importante.

En 1745 à l'université de Leyde (Hollande), Cuénus, l'assistant de Petrus van Musschenbroek (Leyde, 1692 - Leyde, 1761), perfectionnant une expérience précédente, élabora le premier condensateur⁵. C'est une bouteille remplie de feuilles métalliques et entourée d'une feuille d'étain. Il parvient à charger et à décharger la bouteille que la postérité retiendra sous le nom de "Bouteille de Leyde"⁶.

En 1748, Jean-Antoine Nollet construit le premier électroscopie.

En 1752, Benjamin Franklin (Boston, 1706 - Philadelphie, 1790) comprend la nature électrique.

2. électriser, c'est soumettre à une décharge électrique ; électrocuter, c'est faire mourir par décharge électrique.

3. Il est également célèbre pour l'expérience sur le vide au cours de laquelle des chevaux ne parvinrent pas à séparer deux demi-sphères entre lesquelles il avait fait le vide.

4. On dit aussi "Fay de Cisternay", "Cisternay Dufay" ou "du Fay de Cisternay"

5. A l'image du discipulus simplex d'une bande dessinée célèbre, il touche par inadvertance une pièce métallique et décharge le condensateur.

6. Nom proposé par Nollet.

trique de la foudre et invente le **paratonnerre**. Il propose aussi que la neutralité électrique de la matière provient d'une compensation entre les deux types de charges. C'est le concept de conservation de la charge électrique. Il propose par ailleurs, la convention arbitraire retenue depuis : charge positive pour l'électricité vitreuse et négative pour la résineuse. Dès lors, toutes les expériences à base d'électroscopie peuvent être interprétées.

Le XVIII^{ème} siècle restera celui de l'expérimentation de l'électrostatique. Les salons seront d'ailleurs fous de ces expériences. Il était de bon ton de se faire "commotionner". Certains, jouant avec la foudre, y laisseront leur vie comme par exemple Georg Wilhelm Richmann de St. Petersbourg qui fut tué en 1753 en tentant de reproduire l'expérience de Franklin. En 1746, en présence de Louis XV, l'abbé Nollet déchargea une batterie de bouteilles de Leyde en envoyant la décharge dans une chaîne formée de 180 gardes royaux qui ne restèrent pas indifférents au phénomène. Dans une autre expérience, il utilisa du fil de fer pour relier entre eux des moines chartreux et former une chaîne de plus d'un kilomètre de long. Lorsqu'il déchargea une bouteille de Leyde à une extrémité, on rapporte que les moines habillés de blanc auraient tous sauté en l'air simultanément.

III/ De l'expérience à la formulation de lois

John Priestley (1733-1804) pressentit la variation de l'interaction en $1/r^2$, mais il ne publie pas ses résultats.

L'électroscopie permettait de comparer les effets des corps chargés et Henry Cavendish (1731-1810) put ainsi introduire la notion de charge électrique (plus l'influence d'un corps sur l'électroscopie est grande, plus il est chargé). Par certaines expériences et déductions, il établit également la loi de variation en $1/r^2$, mais, lui non plus, ne publia pas ses résultats.⁷

Charles-Augustin de Coulomb (Angoulême, 1736 - Paris, 1806) commença les premières mesures concernant l'attraction et la répulsion électrique et énonça la loi en $1/r^2$ (dans plusieurs articles entre 1785 et 1791).⁸ Les scientifiques donneront ultérieurement son nom à l'unité de charge électrique, le "Coulomb".

Puis, au XIX^{ème} siècle, ce sont les mathématiciens qui prennent le relais et édifient le cadre mathématique de l'électromagnétisme (Lagrange, Laplace, Poisson, Gauss, Green et d'autres).

Parallèlement se développe aussi l'étude des courants électriques et de leurs effets (et notamment le magnétisme) qui sont hors du cadre de l'électrostatique.

James Clerk Maxwell (Edimbourg 1831 - Cambridge 1879) unifiera tous les phénomènes électriques et magnétiques. Les équations dites de Maxwell⁹ (hors du cadre de ce module) sont la synthèse de l'électromagnétisme.

Pour mémoire, rappelons que l'électron ne sera découvert qu'en 1897 par Joseph John Thomson (1856-1940) en travaillant sur les rayons cathodiques. Le proton ne sera découvert qu'en 1919 par Ernest Rutherford (1871-1937) qui travaillait sur la transmutation. Quant au

7. C'est Maxwell qui déchiffrera ses archives et les publia vers 1875.

8. 100 ans après les *Principia* de Newton (1687), il établit une seconde loi d'interaction fondamentale en $1/r^2$.

9. Electricity and Magnetism 1873.

neutron, c'est en 1932 que James Chadwick (1891-1974) le mit en évidence. Toute la conquête de l'électromagnétisme s'est donc faite sans savoir ce qui transportait la charge électrique.

Par ailleurs, c'est seulement en 1909 que Robert Andrews Millikan (1868-1953) mit en évidence la quantification de la charge électrique. Ses premières mesures estimèrent la charge élémentaire à $1,592 \cdot 10^{-19}$ C.

Quand naît la notion de champ ? Elle est déjà présente au XVI^{ème} chez Gilbert puisqu'il s'agit d'une interaction à distance, mais cette idée est loin de s'imposer dès le début car on ne conçoit pas facilement une action à distance sans support matériel (visible ou non). Elle deviendra plus évidente avec les travaux de Newton sur la gravitation. Par ailleurs, la similarité des expressions des deux interactions fit que l'électrostatique bénéficia largement des concepts développés dans le cadre de la gravitation.

Quand naît la notion de potentiel ? C'est Lagrange qui introduisit cette notion par analogie à ce qu'on pouvait faire avec la gravité. De cette fonction scalaire, on pouvait déduire la force. En 1782, Laplace en définit quelques propriétés (elle vérifie l'équation de Laplace). En 1828, Green lui donna le nom de potentiel électrique.

ELECTROSTATIQUE : QUELQUES DATES

Phénomènes naturels

- foudre, feux de St-Elme
- 600 av. J.-C. : Thalès de Millet
 - ✓ ambre frottée attire les brins de paille (triboélectricité)
 - ✓ ambre = « ηλεκτρον » en grec

Les observations empiriques

- XVI^{ème} siècle : William GILBERT (1544 - 1603)
 - ✓ électrise la résine et le verre
 - ✓ introduit le mot « électrique »
- 1660 : Otto von GUERICKE (1602 - 1686).
 - ✓ 1^{ère} machine électrique
 - ✓ 1^{ère} étincelle artificielle
 - ✓ attraction ET répulsion
 - ✓ machines ultérieures :
 - 1776 : Jesse RAMSDEN (1735-1800)
 - 1880 : James WIMSHURST (1832-1903)
 - XX^{ème} siècle : Robert Jenison Van de GRAAFF (1901-1967)
- Stephen GRAY (1670 - 1736)
 - ✓ transport d'électricité
 - ✓ différence entre isolants et conducteurs
 - ✓ l'électricité devient un fluide
- 1735 : Charles DUFAY (1698 - 1739) et l'abbé Jean-Antoine NOLLET (1700 - 1770)
 - ✓ 2 sortes d'électricité (vitreuse et résineuse)
- 1745 : Petrus van MUSSCHENBROEK (1692 - 1761) et son assistant CUENUS, à l'université de Leyde (Hollande),
 - ✓ 1^{er} condensateur appelé « Bouteille de Leyde » par Nollet
- 1748 : Jean-Antoine NOLLET (1700 - 1770)
 - ✓ 1^{er} électroscope
- 1752 : Benjamin FRANKLIN (1706 - 1790)
 - ✓ nature électrique de la foudre (paratonnerre)
 - ✓ conservation de l'électricité (neutralité = compensation entre 2 sortes d'électricité)
 - ✓ convention : électricité vitreuse : « + » et résineuse : « - »

Les lois physiques et les modèles mathématiques

- John PRIESTLEY (1733 - 1804) :
 - ✓ pressent une variation de l'interaction en $1/r^2$, mais ne publie pas ses résultats.
- Henry CAVENDISH (1731 - 1810) :
 - ✓ pressent une variation de l'interaction en $1/r^2$, mais ne publie pas ses résultats.
 - ✓ introduit la notion de capacité et de charge électrique
- entre 1785 et 1791 (dans plusieurs articles) : **Charles-Augustin de COULOMB (1736 - 1806)**
 - ✓ sur la base de mesures, formule la loi en $1/r^2$
 - ✓ cette loi porte son nom
- XIX^{ème} siècle :
 - ✓ LAGRANGE, LAPLACE, POISSON, GAUSS, GREEN et d'autres édifient le cadre mathématique de l'électromagnétisme
 - ✓ étude des courants électriques et du magnétisme qui sont hors du cadre de l'électrostatique.
 - ✓ 1873 : James Clerk MAXWELL (1831 - 1879) unifie les phénomènes électriques et magnétiques (équations de Maxwell).
- 1897 : découverte de l'électron par Joseph John THOMSON (1856 - 1940)
- 1909 : mise en évidence de la quantification de la charge électrique par Robert Andrews MILLIKAN (1868 - 1953). Ses premières mesures estiment la charge élémentaire à $1,592 \cdot 10^{-19}$ C.
- 1919 : découverte du proton par Ernest RUTHERFORD (1871 - 1937)
- 1932 : découverte du neutron par James CHADWICK (1891 - 1974)

Chapitre 2

Electrisation, charge électrique, loi de Coulomb

L'interaction électromagnétique est l'une des interactions fondamentales, avec la gravitation et les interactions nucléaires faibles et fortes. Elle décrit l'interaction entre deux charges électriques. Lorsque les charges électriques sont immobiles, on est dans le domaine de l'électrostatique et la force d'interaction est décrite par la loi de Coulomb.

I/ Aspects expérimentaux

1) Triboélectricité

Les premières observations de phénomènes électriques artificiels remontent à l'Antiquité : en frottant un bloc d'ambre (en grec, ambre se dit "elektron" $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\omega\nu$), celui-ci attire de petits morceaux de paille.

Par frottement, certains objets se chargent électriquement. C'est la ~~triboélectricité~~.
On peut déposer ces charges sur des objets isolés. Deux objets chargés à partir d'un même troisième se repoussent.

Par contre de l'ébonite chargée par frottement avec une peau de chat, repousse du verre chargé par frottement avec de la laine.

Par convention, l'ébonite est chargée $(-)$ ~~négativement~~, le verre $(+)$.

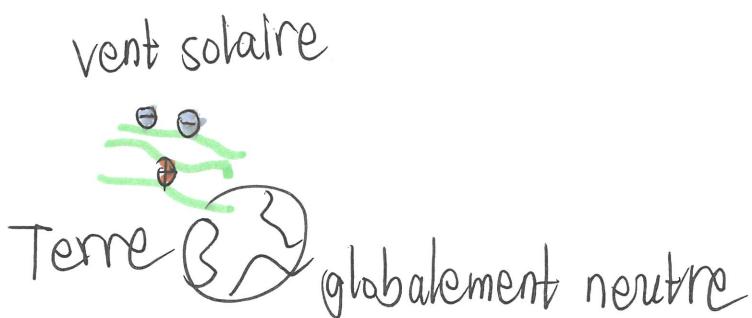
Les métaux ne peuvent se charger par frottements et lorsqu'on dépose des charges sur un métal relié à la terre, celles-ci s'évacuent vers la terre : on a alors un courant éphémère de charges.

2) Electroscop

Un électroscop est constitué d'une partie métallique, donc conductrice, contenue dans une enceinte isolante et dont une partie en forme de plateau dépasse de l'enceinte. La partie métallique contenue dans l'enceinte comporte une aiguille mobile autour d'un axe fixe.

Lorsqu'on approche un corps chargé par frottements du plateau sans les mettre en contact, l'aiguille s'écarte de la verticale. Si on éloigne le corps chargé, l'aiguille revient à sa position de départ. Si on met en contact l'objet avec le plateau, des charges passent sur le plateau et l'aiguille s'écarte de la verticale. Lorsqu'on retire l'objet, l'aiguille reste inclinée.

Plus on frotte l'objet, plus la déviation de l'aiguille sera grande : c'est de là que provient la notion de



3) Conservation

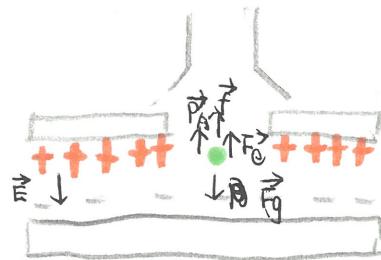
L'électroscop permettant de "voir" les charges, on se rend compte que les charges se déplacent, mais ne disparaissent pas. Si on approche l'objet chargé d'un électroscop 1 sans les mettre en contact, on relève l'indication de la charge initiale. Puis, on l'approche d'un électroscop 2 en les mettant en contact, une charge apparaît sur celui-ci. Enfin, on approche à nouveau l'objet chargé de l'électroscop 1 et on relève l'indication de la charge finale. On constate que la charge finale est inférieure à la charge initiale : les charges se sont déplacées.

Ainsi, les charges se déplacent, se compensent éventuellement, mais on ne crée pas de charges.

Que ce soit dans ces expériences de triboélectricité, en chimie, ou en physique nucléaire, la charge totale se conserve toujours : c'est le

4) Expérience de Millikan 1909 (Nobel de physique 1923)

Le principe (simplifié) de cette expérience est le suivant. On injecte des gouttelettes d'huile entre les plaques d'un condensateur où règne un champ électrique uniforme. Ces gouttelettes sont électrisées par frottements avec le gicleur (ou par rayons X dans le cas de l'expérience originale). On observe leur mouvement à l'aide d'un microscope. Avec ce même microscope, on mesure leur rayon R .



Dans la version originale, Millikan mesure pour un champ donné leur vitesse de dérive qui est constante et fait intervenir les frottements liés à la viscosité de l'air. On peut obtenir la même conclusion en essayant d'immobiliser les gouttelettes en faisant varier \vec{E} (la méthode est plus simple mais moins précise).

Entre les plaques du condensateur, elles sont soumises à 4 forces :

- leur poids $\vec{F}_g = \nabla \rho g = \boxed{\frac{4\pi R^3}{3} \rho_{huile} g(1-\hat{z})}$ (avec ρ_{huile} , la masse volumique de l'huile)
- la poussée d'Archimède $\vec{P}_A = \nabla \rho_{air} g(\hat{z})$ *bonne approximation* (avec ρ_{air} , la masse volumique de l'air)
- la force électrique $= \frac{4\pi R^3}{3} \rho_{air} g \hat{z}$
- les frottements avec l'air $\vec{F} = -\vec{F}_v = -6\pi \eta R \vec{v}$ (avec η , la viscosité de l'air).

Pour une gouttelette immobile, $\vec{F} = 0$ et $\vec{P}_A + \vec{F}_e + \vec{F}_g = 0$

De cette dernière relation, on tire :

$$q = -\frac{4\pi}{3} R^3 \frac{(\rho_{huile} - \rho_{air})}{E}$$

En réalisant l'expérience sur un grand nombre de gouttes, on constate que la charge q est un multiple entier d'un nombre e .

Millikan a initialement mesuré $e = 1,592 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (l'erreur étant due à l'époque à une valeur erronée de la viscosité de l'air).

5) Courant électrique

En 1800, Volta met au point le premier générateur électrique (la pile électrochimique). Cela permet de maintenir un déplacement constant de charges électriques à travers des matériaux conducteurs. Nous reviendrons plus en détails sur cet aspect lorsque nous parlerons des champs magnétiques.

En électrostatique, les charges sont ~~supposées~~ être immobiles

II/ Notion de charge électrique

1) Définition et propriétés

Les constituants de la matière sont caractérisés par une propriété physique appelée

- L'unité internationale de charge électrique est *le coulomb*

- Cette charge est Elle est

$$e =$$

- Elle peut être
- Le principe

2) Les unités de charge électrique

- Le Coulomb est la charge véhiculée par un courant d'un Ampère pendant une seconde au travers d'une section du conducteur :

- Le Faraday, utilisé parfois en électrolyse, est la charge d'une mole de charges élémentaires :

$$1 \text{ Faraday} = N_A e \approx 96485 \text{ C}$$

- l'ampère-heure est utilisé, dans la pratique, pour désigner la charge d'un accumulateur :

$$1 \text{ A}\cdot\text{h} = 3600 \text{ C}$$

3) Porteurs de charge

Les porteurs de charges sont :

- soit des particules élémentaires (électron, proton, positron, ...) dont la taille est de l'ordre du
- soit des ions (cations ou anions) dont la taille est de l'ordre de

A l'échelle macroscopique, ces porteurs de charges pourront être considérés comme

Remarque :

Certains matériaux conduisent les charges, ce sont au rang desquels figurent les métaux. D'autres ne laissent pas passer les charges, ce sont En pratique, les conducteurs parfaits et les diélectriques parfaits n'existent pas.

III/ Force électrostatique

1) Observations expérimentales

Expérimentalement, on constate que deux charges q_1 et q_2 , ponctuelles et immobiles, placées respectivement en Q_1 et Q_2 s'attirent si elles sont de signes contraires et se repoussent si elles sont de mêmes signes. Par ailleurs, la force agissant est dirigée selon la droite passant par les deux charges. Son intensité est proportionnelle à chacune des charges et varie comme l'inverse du carré de la distance $r = Q_1Q_2$ les séparant. De ces observations, on déduit l'expression suivante de la force, connue sous le nom de **loi de Coulomb**

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2} \hat{u}_{1 \rightarrow 2}$$

$$0 \text{D}\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \frac{N}{m} = \frac{10^9}{36\pi} \frac{A^2 S^4}{kg m^3}$$

2) Loi de Coulomb

Remarque :

Si deux charges d'1 Coulomb chacune sont séparées d'1 mètre, la force d'interaction vaut $9.10^9 \text{ N}!!$ Un tel système est instable. Les charges se mettront en mouvement et l'on sort du cadre de l'électrostatique.

3) Additivité

On observe expérimentalement que les forces électrostatiques sont additives. Cela signifie que, si une charge q est placée en Q , dans le voisinage de deux charges q_1 et q_2 placées respectivement en Q_1 et Q_2 , alors elle subit une force totale

Cette propriété se généralise à un nombre N quelconque de charges

TD ELECTROMAGNETISME n°1
Forces de Coulomb

Exercice 1 :

- 1) Quelle est la charge totale positive des protons d'une mole d'atomes d'hydrogène ?
- 2) Quelle est la charge totale des électrons de 10 g de cuivre ?

On donne : $Z_{Cu} = 29$, $M_{Cu} = 63,5$ g/mole.

Exercice 2 :

Soit \vec{V}_1 , le vecteur de composantes (1, 3, 2) dans la base cartésienne $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ du repère orthonormé direct ($Oxyz$). Soit \vec{V}_2 , le vecteur de composantes (-1, 5, 1).

Exprimez les vecteurs \vec{V}_1 , \vec{V}_2 et $\vec{V} = \vec{V}_1 + \vec{V}_2$ dans la base proposée et calculez leur norme.

Exercice 3 :

Soient les points A de coordonnées (2, 3), $B(-2, 3)$ et $M(-2, 0)$ dans le repère orthonormé direct (O, x, y) où (\vec{e}_x, \vec{e}_y) représentent les vecteurs unitaires de base.

- 1) Représentez ces points dans le repère proposé.
- 2) Exprimez les composantes des vecteurs \overrightarrow{OA} , \overrightarrow{BO} et \overrightarrow{AM} .
- 3) Calculez leur norme.
- 4) Quelle est la norme de \overrightarrow{AB} ?
- 5) Quelle est la longueur du segment $[BA]$?

Exercice 4 :

On considère les vecteurs $\vec{A} = \begin{pmatrix} 4 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix}_{(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})}$ et $\vec{B} = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}_{(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})}$.

- 1) Déterminez les modules des vecteurs \vec{A} et \vec{B} .
- 2) Calculez la somme $\vec{S} = \vec{A} + \vec{B}$.
- 3) Calculez la différence $\vec{D} = \vec{A} - \vec{B}$.
- 4) Calculez le vecteur unitaire \vec{u} porté par le vecteur \vec{D} .
- 5) Calculez le produit scalaire des vecteurs \vec{A} et \vec{B} .
- 6) Calculez le produit vectoriel des vecteurs \vec{A} et \vec{B} .
- 7) Calculer l'angle α formé par les vecteurs \vec{A} et \vec{B} .
- 8) Calculer l'angle β formé par les vecteurs \vec{S} et \vec{D} .

Exercice 5 :

Dans la base $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, soit le vecteur $\vec{V} = 2\vec{i} - \vec{j} + 2\vec{k}$. Déterminez le vecteur unitaire de même direction mais de sens opposé à \vec{V} .

Exercice 6 :

Soit une droite (OM) placée de façon quelconque dans l'espace 2D de votre feuille à l'aide de deux points O et M disposés de façon quelconque également.

- 1) Comment faut-il procéder pour indiquer le sens d'orientation de cette droite ?
- 2) Combien de sens de propagation sur cette droite pouvez-vous définir ?
- 3) Définissez un vecteur unitaire associé à chacun d'eux.
- 4) Quelle est la norme de celui-ci ?
- 5) Soient C et D , deux points disposés sur (OM) et séparés de la distance a . Exprimez le vecteur \overrightarrow{CD} en fonction des différents cas possibles. Quelle est la norme de \overrightarrow{CD} ?

Exercice 7 :

- 1) Soit un atome d'hydrogène formé d'un proton et d'un électron. La distance moyenne entre les deux constituants est $a_0 = 0,529 \text{ \AA}$. Calculez l'intensité de la force coulombienne. Comparez cette valeur au poids de l'atome d'hydrogène et à l'attraction gravitationnelle entre ces deux constituants.

(On donne : $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ USI}$, $m_{e^-} = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)

- 2) Trois charges ponctuelles $q_1 = 2 \mu\text{C}$, $q_2 = -3 \mu\text{C}$ et $q_3 = -5 \mu\text{C}$ sont placées sur un axe orienté (Ox), respectivement en $x_1 = 0$, $x_2 = 40 \text{ cm}$ et $x_3 = 120 \text{ cm}$. Calculez la force totale subie par la charge q_2 .
- 3) Soit un carré $ABCD$ de côté a . On dispose les charges $q_A = +q$, $q_B = -q$, $q_C = -2q$ et $q_D = 2q$ aux 4 coins de ce carré.
 - a. Calculez la force totale subie par q_D .
 - b. Application numérique : $q = 1 \text{ nC}$ et $a = 5 \text{ cm}$.

Exercice 8 :

- 1) Trois charges ponctuelles $q_O > 0$, $q_A < 0$ et $q_B < 0$ sont placées aux points O , A et B situés dans cet ordre sur un axe orienté ($x'ox$).
 - a. Réalisez un schéma sur lequel vous ferez figurer les différents points, un vecteur unitaire indiquant le sens d'orientation de l'axe et la résultante des forces que subit la charge q_A .
 - b. A partir de ce schéma, peut-on prédire un déplacement éventuel de l'atome situé en A sous l'effet des charges existantes sur ses deux voisins ? Quelle serait alors l'orientation de ce déplacement ?
 - c. Exprimez le vecteur force électrostatique totale en A en fonction du vecteur unitaire choisi.
 - d. De la même façon, déterminez l'expression de la force que subit l'atome situé au point O .
 - e. AN : Calculez les normes de ces deux forces : $q_O = 2 \mu\text{C}$ en $x_O = 0$, $q_A = -3 \mu\text{C}$ en $x_A = 40 \text{ cm}$ et $q_B = -5 \mu\text{C}$ en $x_B = 120 \text{ cm}$.
- 2) Deux ions sont positionnés en C et D sur un axe ($y'oy$) perpendiculaire au point O à ($x'ox$). Ces deux ions sont représentés par leur charge ponctuelle $q_C < 0$ et $q_D < 0$.
 - a. Par une analyse comparable à celle effectuée au 1), déterminez l'orientation de la force totale que subit q_O .
 - b. Quelle est la norme de celle-ci ?
 - c. AN : calculez cette norme en considérant : $q_C = -3 \mu\text{C}$ en $y_C = 40 \text{ cm}$ et $q_D = -5 \mu\text{C}$ en $y_D = 120 \text{ cm}$.

Exercice 9 :

Deux charges ponctuelles q_1 et q_2 positives sont placées respectivement au point O et au point A d'abscisse $L > 0$ de l'axe (Ox). On place sur cet axe une charge q_3 en un point quelconque M d'abscisse x .

- 1) En vous appuyant sur un schéma représentant les forces subies par q_3 en fonction de sa position sur l'axe, déterminez dans quelle(s) région(s) elle peut se trouver en équilibre. Vous envisagerez deux cas selon le signe de q_3 .
- 2) Donnez la condition d'équilibre et déduisez-en l'équation du second degré dont x est solution.
- 3) Application numérique : trouvez les valeurs possibles de x si $q_1 = 1 \text{ nC}$, $q_2 = 9 \text{ nC}$, $L = 4 \text{ m}$.

Exercice 10 :

Trois charges ponctuelles q_1 , q_2 et q_3 sont placées respectivement en trois points A , B et C d'une droite, dans l'ordre ACB . On donne $q_1 = 1 \text{ nC}$, $q_2 = 4 \text{ nC}$ et $AB = 10 \text{ cm}$.

A quelle distance $AC = x$ doit on placer q_3 pour que la force de Coulomb totale s'exerçant sur elle soit nulle ?

Exercice 11 :

Deux petites sphères pleines en aluminium (masse volumique $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$) parfaitement isolées ont un diamètre $d = 3 \text{ mm}$. On communique à l'une d'elle une charge $q_1 = 167 \text{ nC}$ et à l'autre une charge négative inconnue q .

- 1) Calculez q pour que, lorsque les deux sphères sont placées sur la même verticale à $l = 50 \text{ cm}$ l'une de l'autre, leur attraction réciproque suffise à maintenir en équilibre la sphère inférieure.
- 2) Les deux sphères sont mises en contact, puis on les éloigne à nouveau de 50 cm. Quelle est la force qui s'exerce alors entre elles ?

Exercice 12 :

Deux billes identiques de masse m , portant la même charge q , sont suspendues à l'aide de deux fils de même longueur L depuis un même point placé sur l'axe (Oy). On désignera par α , l'angle entre la verticale et chacun des fils à l'équilibre. On supposera que cet angle est suffisamment petit pour pouvoir poser $\alpha \approx \sin \alpha \approx \tan \alpha$.

- 1) Montrez en effectuant le bilan des forces et en explicitant la condition d'équilibre que $d = (q^2 L / 2\pi\epsilon_0 mg)^{1/3}$, avec d , la distance entre les deux charges.
- 2) Application numérique : que vaut q si $d = 5 \text{ cm}$, $L = 120 \text{ cm}$ et $m = 10 \text{ g}$?
- 3) L'angle α n'est maintenant plus petit. Quelle est l'expression de q en fonction de m , g , α , L et ϵ_0 ? Application numérique : $L = 120 \text{ cm}$, $m = 10 \text{ g}$ et $\alpha = 30^\circ$.

