

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
HOUARI BOUMEDIENE (U.S.T.H.B./ALGER)

FACULTE DE PHYSIQUE



Mémoire

Présenté Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Spécialité : **Matériaux et composants**

Par : **Rachid TRAICHE**

SUJET :

*Le raisonnement par analogie en physique des matériaux
Cas des milieux diélectriques et magnétiques.*

Soutenue le 02/07/2006 devant la commission d'examen :

Mr. M. DRIR	Professeur, (U.S.T.H.B)	Président
Mr. M. BENDAOU	Professeur, (U.S.T.H.B)	Directeur de Thèse
Mr. A. BENSEGHIR	Professeur, (Univ.Sétif)	Examineur
Mme. A. FRAHI-AMROUN	Professeur, (U.S.T.H.B)	Examinatrice
Mr. A. LOUNIS	Professeur, (ENS, Alger)	Examineur

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été entièrement réalisé au sein de l'Equipe "Diélectriques" du Laboratoire de Physique des Matériaux de la Faculté de Physique de l'USTHB. Je remercie Monsieur M. BENDAOUD, Professeur à l'USTHB, pour l'accueil qu'il m'a réservé dans son laboratoire, et l'aide qu'il m'a apportée.

Je tiens à remercier Monsieur M. DRIR, Professeur à l'USTHB, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury.

Je tiens également à remercier Madame A. FRAHI-AMROUN, Professeur à l'USTHB, pour sa participation à ce jury de thèse.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur A. BENSEGHIR, Professeur à l'université de Sétif, qui a bien voulu examiner ce travail.

Je suis très sensible à la présence dans ce jury de Monsieur A. LOUNIS, Professeur à l'ENS, qui a mis à la disposition de notre équipe des documents sur l'histoire des mathématiques.

Je remercie le Docteur T. Boutekdjirt qui nous a aidés à traduire le texte allemand de l'article de Weber.

Enfin, je tiens à remercier tous les amis du laboratoire pour leur soutien amical et l'ambiance très chaleureuse durant ces deux années, je leur souhaite à tous réussite et bonheur.

Table des Matières

Introduction.....	.1
-------------------	----

Chapitre I : Le Raisonnement Par Analogie

1. Les différents modes de raisonnement.....	.3
1.1. La logique et la science.....	.3
1. 2. La déduction.....	.5
1. 3. L' induction.....	.7
1. 4. L' analogie.....	.9
2. Le raisonnement par analogie dans l'enseignement.....	.11
3. Le raisonnement par analogie en mathématiques.....	.15

Chapitre II : Analogie entre les propriétés magnétiques & diélectriques des matériaux

1. Aperçu historique.....	.21
1.1. Introduction.....	.21
1.2 Les lois de l'électromagnétisme.....	.23
1.3. Les milieux magnétiques	.27
1.4. Les diélectriques.....	.30
2. Théorie d'Ampère sur l'origine du magnétisme.....	.35
2. 1. Etat des connaissances et outils disponibles en 1820.....	.35
2. 2. L'expérience d'Oersted et ses conséquences.....	.37
2. 3. Les courants ampériens.....	.40
2. 4. Théorie d'Ampère sur l'interaction entre deux courants.....	.43
2. 5. Critiques des idées d'Ampère.....	.47
2. 6. Les modes de raisonnement utilisés par Ampère.....	.54
3. Théorie de Weber (1852).....	.56
3. 1. Hypothèses de Weber.....	.56
3. 2. Courbe d'aimantation.....	.57
4. Influence de la température sur le magnétisme.....	.61
4.1. Expériences de Curie 1895	.61
4.2. Analogie géométrique	.68

5. Théories de Langevin et de Debye.....	72
5. 1. Théorie de Langevin (1905).....	72
5. 1. 1. Analogie avec la théorie cinétique des gaz de Boltzmann.....	72
5. 1. 2. Théorie du paramagnétisme.....	73
5. 1. 3. Progrès par rapport à la théorie de Weber.....	75
5. 2. Théorie de Debye (1912).....	76
5. 3. Le raisonnement par analogie chez Langevin et Debye.....	78
6. Conclusion.....	79

Chapitre III : Analogie entre les propriétés électriques & mécaniques des polymères

1. Les polymères.....	82
1.1. Généralités.....	82
1.2. Aperçu historique.....	85
1.3. Comportement thermique des polymères.....	86
1.4. Propriétés diélectriques des polymères.....	88
1.5. Propriétés mécaniques des polymères.....	92
2. Analogie entre les propriétés électriques & mécaniques.....	96
2. 1. L'excitation est constante.....	96
2.2. L'excitation est sinusoïdale.....	97
2.3. Courant & Fluage thermostimulés.....	98
3. Mesures de Courants thermostimulés avec du PVC.....	101
3.1. Principe.....	101
3.2. Analyse d'un spectre élémentaire.....	101
3.3. Le Polymère.....	102
3.4. Dispositif expérimental.....	102
3.5. Résultats.....	104
3.6. Discussions.....	106
Conclusion.....	111
Biographie des savants cités dans le mémoire.....	113
Références.....	121

INTRODUCTION

Dès qu'ils se sont intéressés à l'étude des propriétés de la matière, les scientifiques ont été frappés par la similitude des comportements des matériaux magnétiques et diélectriques. Aussi c'est dans ce domaine que le rôle heuristique du raisonnement par analogie s'est révélé le plus important. D'un autre côté les polymères, dont l'utilisation a connu un essor remarquable durant la deuxième moitié du XX^{ième} siècle, présentent des propriétés mécaniques et diélectriques analogues. Les lois, qui régissent leurs comportements lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations électriques puis mécaniques, sont similaires.

Le but de ce travail est de mettre en évidence l'importance du raisonnement par analogie dans la découverte des lois qui régissent les milieux magnétiques et diélectriques, mais aussi d'en signaler les limites.

Au premier chapitre, après avoir passé en revue les différents modes de raisonnement utilisés en logique et en sciences, nous nous intéresserons particulièrement au raisonnement par analogie qui constitue l'objet de notre travail. Nous verrons une application dans l'enseignement des phénomènes vibratoires à l'université, puis une autre en mathématiques : La représentation géométrique des nombres complexes a été découverte par le mathématicien suisse Jean Robert Argand grâce à un raisonnement par

analogie tel que le définissaient les grecs anciens. Ce chapitre a été rédigé à partir des notes que nous avons prises en suivant le cours qui porte sur les “procédés scientifiques et didactiques” et qui est enseigné, dans notre université, en quatrième année du D.E.S de Physique.

Nous verrons, au second chapitre, comment ces différents modes de raisonnement ont été appliqués, au cours de l’histoire, à l’étude des matériaux magnétiques et diélectriques. Nous consacrons une grande partie de ce chapitre à la théorie du magnétisme d’Ampère qui est basée sur une analogie. Cette théorie, reprise par Weber aboutira, près d’un siècle plus tard à la théorie de Langevin qui servira de modèle à Debye pour expliquer la polarisation dipolaire dans les milieux diélectriques.

Puis nous mettrons en évidence, dans un dernier chapitre, l’analogie entre les propriétés diélectriques et mécaniques des polymères. Ces matériaux répondent de façon similaire à une excitation thermo stimulée. A titre d’exemple, nous présentons quelques mesures de courants thermostimulés que nous avons relevées lors de nos expériences sur du chlorure de polyvinyle. Ces mesures complètent celles que Souad Souilem a obtenues lors de son travail de thèse de Magister¹

¹ Souilem S. Thèse de Magister Alger 2005.

Chapitre I

LE RAISONNEMENT PAR ANALOGIE

1 . Les différents modes de raisonnement. [1-5]

1.1. La logique et la science.

“ Tout dans la nature, Selon Emmanuel Kant¹, aussi bien dans le monde inanimé que dans celui des vivants, se produit selon des règles, bien que nous ne connaissions pas toujours ces règles. La pluie tombe selon les lois de la pesanteur et chez les animaux, la locomotion se produit selon des règles ; et il n’y a nulle part aucune absence de règles. Si nous croyons constater une telle absence, nous pouvons seulement dire en ce cas que les règles nous sont inconnues

.... L’entendement est la faculté de penser, c’est à dire de soumettre les représentations des sens à des règles. Aussi son plus vif désir est-il de chercher des règles et son plus vif plaisir est-il de les avoir trouvées.

Pour aboutir aux lois ou aux règles qui régissent le monde, dans lequel nous vivons, le savant part de l’observation des faits. Mais la seule observation est insuffisante, il faut alors recourir à l’expérience et au raisonnement.

Nous allons considérer, dans ce paragraphe, les différents modes de raisonnement tels qu’ils sont définis en logique et en sciences.

¹ E. Kant : *Logique, introduction I*, (Vrin 1982) cité dans Chabin [1] page136

La logique est la partie de la philosophie qui traite du raisonnement. Ce dernier consiste en un enchaînement de propositions en vue d'aboutir à une conclusion. Cet enchaînement est basé sur la cohérence c'est à dire la non-contradiction. Kant définit la logique comme " *la science des règles de l'entendement en général* ²"

La science peut être définie comme l'ensemble des connaissances que l'homme a acquises par le raisonnement et l'expérience et qui obéissent à des lois.

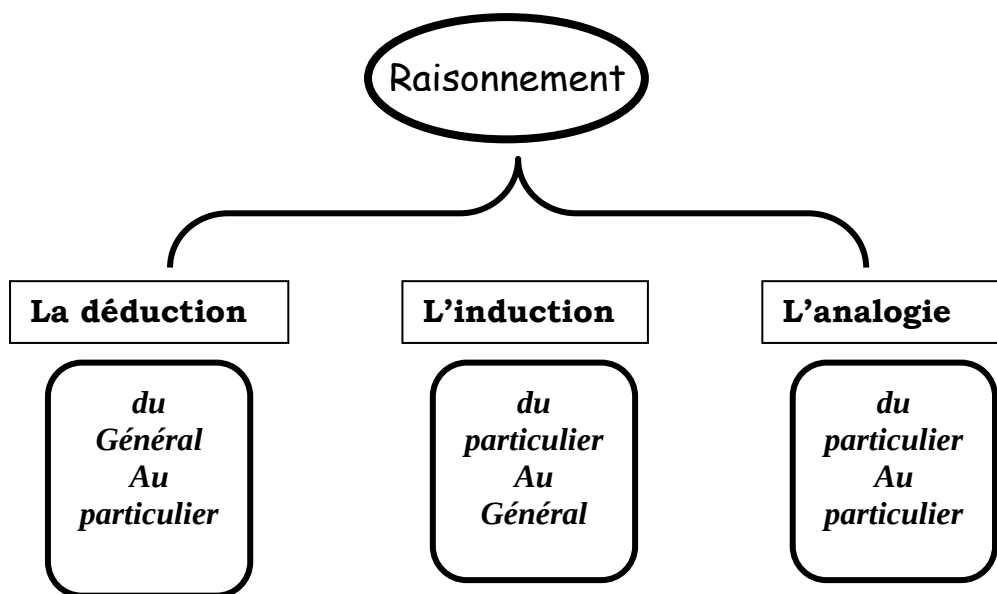


Figure I. 1 : Les modes de raisonnement

En physique, on utilise trois modes de raisonnement : la déduction, l'induction et le raisonnement par analogie (Figure 1).

Les mathématiques sont essentiellement basées sur le raisonnement déductif, mais on utilise d'autres modes de raisonnement comme : l'induction, l'analogie, les raisonnements par récurrence, par l'absurde etc..

² E. Kant : *Critique de la raison pure*, (P.U.F 1981) cité dans Cavailler page 160 [5]

I. 2. La déduction.

En logique :

Le raisonnement déductif part d'une ou de plusieurs propositions , les prémisses, et aboutit à une conclusion. Dans le cas d'une seule prémisses, la déduction est immédiate, ou inférence. S'il y en a plusieurs, la déduction est médiate. C'est le cas du syllogisme, développé par Aristote dans son "organon", qui comporte deux prémisses et une conclusion logique.

Exemple de syllogisme:

Tous les hommes sont mortels,

Socrate est un homme,

Socrate est mortel,

Le syllogisme peut être considéré comme un raisonnement mathématique.

En effet si on pose :

Mortel = (A) , Homme = (B) , Socrate = (C)

$B \in A$

donc $C \in A$

$C \in B$

C'est un raisonnement formel qui n'ajoute rien au contenu de la pensée, la conséquence est implicitement contenue dans les principes.

En sciences :

Le raisonnement déductif part d'un principe général et aboutit à des résultats particuliers, il consiste à tirer les effets d'une cause. Il conduit à une conclusion dont le contenu est tout à fait nouveau par rapport à la proposition de départ. L'opération par laquelle une proposition est établie à partir d'une autre est , par définition, la démonstration.

C'est le mode de raisonnement le plus rigoureux. Les principes, c'est à dire les propositions de départ, sont des propositions indémontrables car, comme le fait remarquer Aristote³, il est impossible de tout démontrer, sinon on irait à l'infini et il n'y aurait plus de démonstration.

On distingue trois sortes de principes : l'axiome, le postulat et la définition .

Selon Legendre " ⁴*l' axiome est une proposition évidente par elle même* " , par exemple : " *Deux grandeurs égales respectivement à une même troisième sont égales entre elles.*"

Le terme "postulat " dérive du mot latin postulare qui signifie "demander".

Le postulat est une proposition que le savant "demande" de lui accorder.

Le cinquième " Postulat d'Euclide", par exemple, s'énonce : " *Par une point pris hors d'une droite, on ne peut tracer qu'une seule parallèle à cette droite..*

Toute la géométrie classique est basée sur les postulats d'Euclide. Mais au XIX^{ième} siècle, des géométries non euclidiennes ont été élaborées, par Lobatchevski et Riemann, avec leurs propres postulats. C'est la géométrie de Riemann qui a permis à Einstein de construire la théorie de la relativité générale.

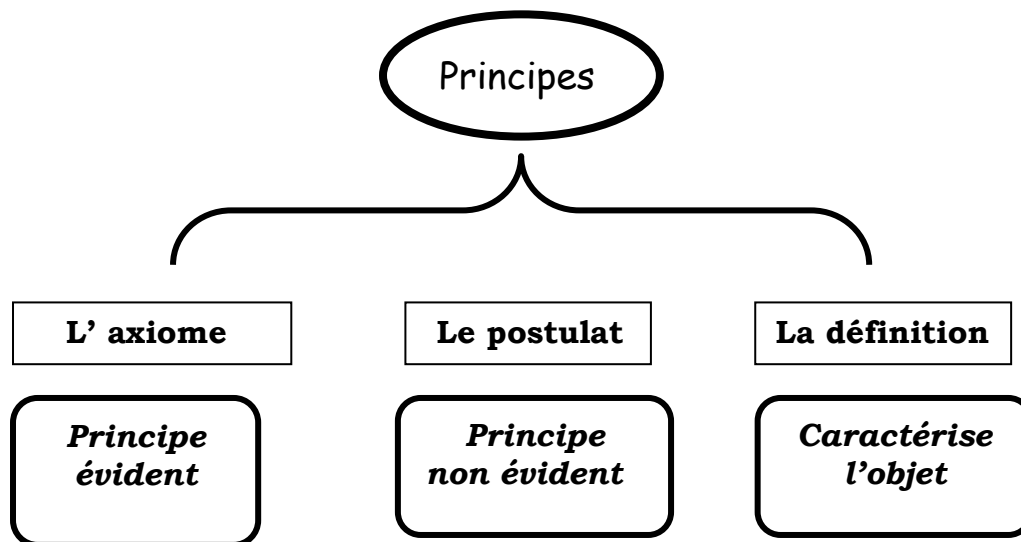


Figure I. 2 : Les principes

³ Aristote : Métaphysique Vrin P. 197 & 198

⁴ Legendre : "Eléments de géométrie" , cité dans Cuviller, page 406 [2]

La définition détermine les caractères essentiels de l'objet défini, par exemple : *“ Le cercle est le lieu des points situés à une égale distance d'un point fixe appelé centre”*.

Certains savants pensent que cette distinction entre ces trois principes n'est pas essentielle et proposent d'étendre le mot axiome à tout principe indémontrable. Selon H. Poincaré [6] *“ un postulat n'est qu'une définition déguisée”*. Quant au mathématicien suisse Gonseth⁵, il écrit à propos de l'axiome *“ Il n'y a plus maintenant de proposition évidente par elle même ”*

C'est ainsi que le philosophe Lalande⁶ propose d'étendre au mot axiome *“toute proposition qui ne se déduit pas d'une autre, mais que l'on pose par un acte décisive de l'esprit au début de la déduction”*.

I. 3. L' induction :

En logique :

C'est un procédé de raisonnement qui, à l'inverse de la déduction, consiste à aller du particulier au général, on remonte à la cause à partir des effets. Ainsi, si une affirmation est vraie dans un certain nombre de cas observés, elle peut être généralisée à tous les cas similaires.

Mais un grand nombre d'observations, réalisées dans des contextes variés et jamais contredites, est-il suffisant pour affirmer qu'un résultat est vrai ? Voilà une des questions fondamentales de l'épistémologie. Nous reviendrons sur cette question à la fin de ce paragraphe.

En Sciences

Le scientifique observe les faits, procède à l'expérimentation et tente d'expliquer le phénomène étudié et de découvrir les lois qui le régissent. Ces

⁵ F. Gonseth : Les fondements des Mathématiques : Le François 1933 (Cité dans Cuviller , [2], page 410)

⁶ Cité dans Cuviller , [2], page 408.

lois auxquelles on aboutit doivent être, à chaque fois, confrontées à l'expérience, ce qui n'est pas le cas en mathématiques. Jules Lachelier [7] définit l'induction comme *“ l'opération par laquelle nous passons de la connaissance des faits à celle des lois qui les régissent. ”*

C'est cette démarche que préconise Ampère ⁷ :

“Observer d'abord les faits, en varier les circonstances autant qu'il est possible, accompagner ce premier travail de mesures précises pour en déduire⁸ les lois générales, uniquement fondées sur l'expérience, et déduire de ces lois indépendamment de toute hypothèse sur la nature des forces qui produisent ces phénomènes, la valeur mathématique de ces forces, c'est à dire la formule qui les représente, telle est la marche qu'a suivie Newton” [8]

Ainsi c'est grâce aux nombreuses observations de Tycho Brahé que Képler a pu énoncer les trois lois du mouvement des planètes. D'un autre côté, les expériences de Galilée ont abouti aux lois de la chute des corps . Toutes ces lois ont permis à Isaac Newton d'élaborer une théorie de la gravitation et d'exprimer mathématiquement la force qui produit ce phénomène.

Le raisonnement par induction est largement utilisé dans les sciences expérimentales : Claude Bernard a proposé une méthodologie connue sous l'acronyme : O.H.E.R.I.C :

On part de l'observation (O) d'un phénomène naturel, on émet des hypothèses (H) sur son évolution ou sur sa nature. Celles-ci doivent être confirmées ou infirmées par l'expérience (E) dont les résultats (R) seront interprétés (I) . L'interprétation aboutit à une conclusion (C) qui sera exprimée sous la forme d'une loi.

Ce mode de raisonnement a été critiqué parce qu'il manque de rigueur : En effet selon Lachelier [7]: *“ L'expérience la mieux faite ne sert qu'à nous*

⁷ Ampère [8] page 176

⁸ Il s'agit ici d'un raisonnement par induction.

Chapitre I : Le raisonnement par analogie

apprendre au juste comment les phénomènes se lient sous nos yeux, mais qu'ils doivent se lier toujours et partout de la même manière, c'est ce qu'elle ne nous apprend point et c'est cependant ce que nous n'hésitons pas à affirmer".

Lachelier ajoute : *L'induction, lorsqu'elle a été vérifiée un grand nombre de fois, permet d'arriver à une connaissance dont la probabilité tend , asymptotiquement seulement, à l'universalité [7].* Il confirme ainsi Carnéade, philosophe grec né à Cyrène en Lybie vers 219 avant J.C., qui soutenait que les opinions tirées de l'expérience peuvent être probables mais jamais certaines.

La méthode inductiviste est largement utilisée, en didactique de la physique, notamment dans l'enseignement secondaire. L'enseignant décrit des expériences et, à partir des résultats obtenus, il énonce des lois.

La démarche inductiviste est, selon certains pédagogues, responsable du fait que l'élève ne comprend pas la physique. Robardet écrit : *" L'élève est spectateur d'un raisonnement sans tâtonnements, construit en dehors de lui. Même s'il manipule, ce n'est pas lui mais le professeur qui conduit l'exploitation théorique de l'expérience . L'expérience de classe est conçue pour coller au modèle ,. elle est donc artificielle, déconnectée de la vie.*

L'option inductiviste ne prend pas suffisamment en compte le fonctionnement cognitif de l'élève." [9]

Ces pédagogues préfèrent une démarche hypothéco déductive qui tient compte des représentations initiales de l'élève. Celles ci seront corrigées par l'enseignant, l'expérience sert de vérification.

I. 4. L' analogie : [10-12]

En logique :

L'analogie est un mode de raisonnement qui fait intervenir la comparaison entre deux entités distinctes qui présentent des ressemblances par un ou plusieurs aspects. Cette forme de raisonnement consiste à aller du

particulier au particulier alors que l'induction va du particulier au général et la déduction du général au particulier (figure N° I. 1)

En Sciences

Etienne Bolmont distingue, dans sa thèse [13], deux types d'analogies :

1°) L'analogie est structurelle lorsque des éléments d'un même domaine sont structurés de la même façon que leurs correspondants de l'autre domaine.

Si les éléments considérés sont reliés par les mêmes lois et si celles ci sont traduites par les mêmes équations mathématiques l'analogie est "formelle" et si ces lois sont représentées par des courbes similaires l'analogie est "géométrique" [13]

2°) L'analogie est fonctionnelle lorsque certains éléments ont des fonctions analogues dans leurs domaines respectifs. C'est le cas du modèle planétaire de l'atome et du système solaire, le noyau a la même fonction que le soleil et les électrons jouent le même rôle que les planètes. L'analogie est "substantielle" si la nature ou la substance des objets est similaire, par exemple les forces en gravitation, et en électrostatique . Cette analogie se construit dans le cadre d'une vision unifiante du monde, elle est rejetée par ceux qui pensent le monde dans toute sa variété [13].

L'analogie est souvent utilisée comme outil heuristique, car elle permet de découvrir de nouvelles lois , de nouvelles théories à partir de lois , ou de théories connues, comme nous le verrons au second et troisième chapitre. , dans le cas de la physique des matériaux et dans ce chapitre en ce qui concerne les mathématiques. Mais elle constitue, d'un autre côté, une arme à double tranchant [12], elle peut créer des confusions [14], freiner l'innovation [21] et parfois même conduire à des conclusions erronées.

Elle peut servir dans des expériences de laboratoires et dans des essais en aéronautique, en construction navale, en architecture etc... . Certaines études sont facilitées par l'emploi de maquettes construites à partir d'une analyse dimensionnelle du problème étudié. La maquette et l'engin à

construire (avion, fusée, bateau, pont, barrage etc..) présentent une similitude qui permet, à partir du modèle réduit, d'obtenir des données qui serviront à construire un prototype sur lequel seront effectués les essais définitifs. Des dispositifs mécaniques sont parfois remplacés par des circuits électriques équivalents dont les caractéristiques sont plus faciles à mesurer. L'analogie constitue également un outil didactique : on explique à l'élève un phénomène nouveau par analogie avec un phénomène qu'il connaît déjà

2. Le raisonnement par analogie dans l'enseignement.

Cette méthode permet une économie de calculs : On peut traduire l'évolution de plusieurs phénomènes analogues par une même équation différentielle que l'on résout, c'est le cas des phénomènes vibratoires, par exemple.

Les ingénieurs en génie civil, en construction mécanique etc.. doivent tenir compte , lors de leurs études, de l'influence des vibrations provoquées par des forces d'origines diverses sur les structures qu'ils projettent de réaliser. Il en est ainsi du comportement d'une voiture en mouvement sur une route déformée, de l'effet du vent sur les vibrations d'un pont, des conséquences d'un séisme sur la stabilité d'un bâtiment etc..

Les comportements de ces structures peuvent être, dans une première approche, modélisés par les oscillations d'un système mécanique formé de masses, de ressorts et d'amortisseurs comme celui qui est représenté sur la figure I.3. Le comportement viscoélastique de certains matériaux, les polymères par exemple, peut être également modélisé par de tels systèmes mécaniques, comme nous allons le verrons au chapitre III.

C'est la raison pour laquelle les élèves ingénieurs de notre université suivent, avant d'aborder leur spécialité, un cours sur les "*vibrations et ondes*" [15]

Nous allons considérer le cas de l'oscillateur amorti en régime sinusoïdal forcé.

L'oscillateur mécanique, représenté sur la figure I.3, comporte une masse m , reliée à un ressort de raideur k et un amortisseur de coefficient f , pouvant effectuer des déplacements x sous l'action d'une force $F(t)$. L'équation du mouvement s'écrit :

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + f \frac{dx}{dt} + k x = F(t) \quad (\text{I.1.})$$

Le circuit électrique, de la figure I.4, composé d'une bobine de self L , d'un condensateur de capacité C et d'une résistance R , est alimenté par une source de force électromotrice $e(t)$. L'évolution de la charge q du condensateur en fonction du temps, est obtenue à partir de l'équation différentielle :

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = e(t) \quad (\text{I.2.})$$

Les oscillations $\theta(t)$ du système électromécanique (galvanomètre à cadre mobile), représenté sur la figure I.5, sont données par :

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \left(f + \frac{\Phi_o^2}{R} \right) \frac{d\theta}{dt} + C \theta = \Phi_o i(t) \quad (\text{I.3.})$$

Où J est le moment d'inertie du cadre, $\Phi_o = n S B$ le flux maximal embrassé par le cadre et c la constante de torsion. Si on pose

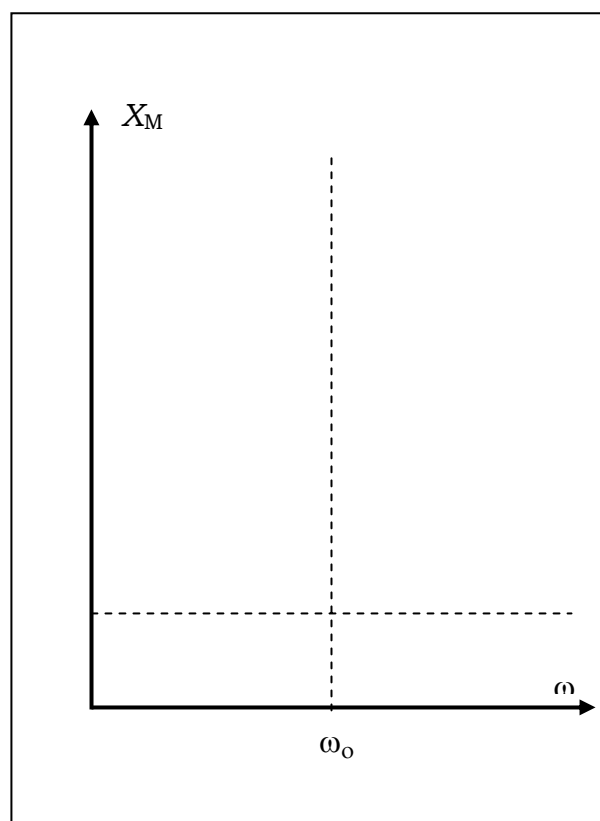
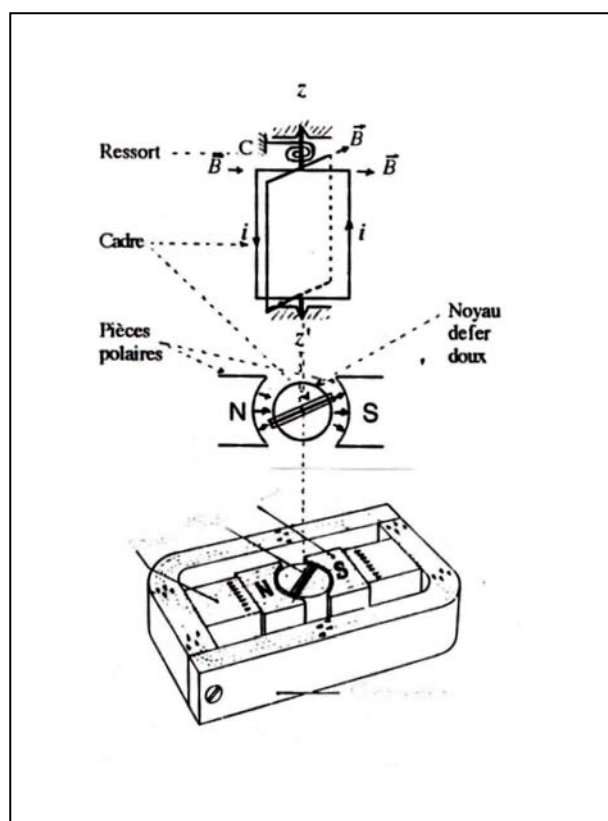
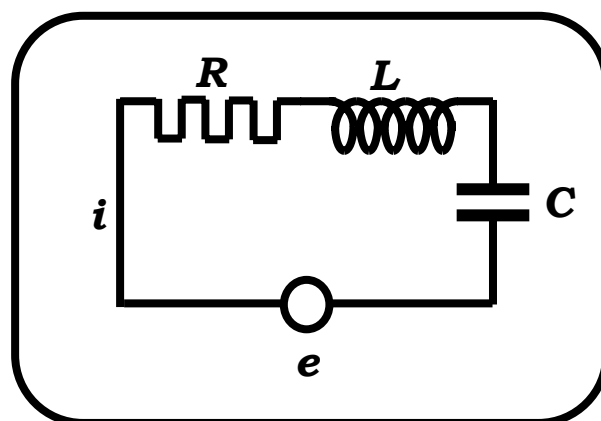
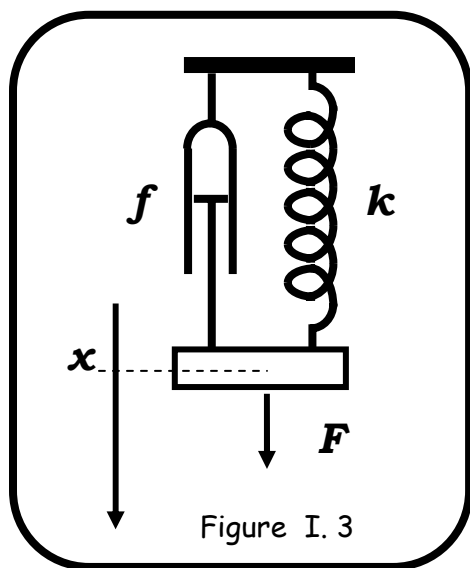
$$\alpha = \frac{f}{2m} \quad \varphi(t) = \frac{F(t)}{m} \quad \omega_o = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{dans (I.1)}$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad \varphi(t) = \frac{e(t)}{L} \quad \omega_o = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad \text{dans (I.2)}$$

$$\alpha = \frac{1}{2J} \left(f + \frac{\Phi_o^2}{R} \right) \quad \varphi(t) = \frac{\Phi_o i(t)}{J} \quad \omega_o = \sqrt{\frac{c}{J}} \quad \text{dans (I.3)}$$

On obtient l'équation de l'oscillateur linéaire amorti en régime forcé

$$\ddot{x} + 2\alpha \dot{x} + \omega_o^2 x = \varphi(t) \quad (\text{I.4.})$$



Chapitre I : Le raisonnement par analogie

Lorsque l'excitation est une fonction sinusoïdale du temps :

$$\varphi(t) = A \sin(\omega t)$$

La réponse de l'oscillateur est également une fonction sinusoïdale du temps de même fréquence angulaire ω et déphasée de φ .

$$x(t) = X_M \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

Où X_M est l'amplitude des oscillations. Les courbes, représentées sur la figure I.6, traduisent les variations de l'amplitude X_M en fonction de la fréquence ω . Elles présentent, lorsque l'amortissement α est faible, un maximum au voisinage de la fréquence propre ω_0 de l'oscillateur. On obtient un phénomène de résonance d'autant plus aigu que α est faible.

L'étude de ces trois systèmes met en évidence une analogie formelle comme le montre le tableau ci-dessous.

Système mécanique	Système électromécanique	Circuit électrique
Masse : m	Moment d'inertie : J	Self induction : L
Constante de rappel : k	Constante de torsion : c	Inverse d'une capacité : $1/C$
Constante de frottement : f	Freinage $\left(f + \frac{\Phi_o^2}{R} \right)$	Résistance électrique : R
Fréquence propre : $\omega_o = \sqrt{\frac{k}{m}}$	Fréquence propre : $\omega_o = \sqrt{\frac{c}{J}}$	Fréquence propre : $\omega_o = \sqrt{\frac{1}{LC}}$
Excitation : Force $F(t)$	Excitation : $\Phi_o i(t)$	Excitation : F.E.M $e(t)$
Réponse : déplacement $x(t)$ ou vitesse $V(t)$	Réponse : déplacement $\theta(t)$ ou vitesse angulaire	Réponse : charge $q(t)$ ou courant $i(t)$

3. Le raisonnement par analogie en mathématiques

Ce mode de raisonnement a été introduit d'abord en mathématiques, par les grecs, et caractérisait, conformément à son étymologie, le rapport. (Analogon : selon le rapport). Ainsi, si :

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$$

on dira que a est à b ce que c est à d .

C'est ainsi qu'en 1806 le mathématicien suisse, Jean Robert Argand, trouva la représentation géométrique des nombres complexes [20].

Les nombres complexes ont été introduits, au XVI^{ième} siècle, lors de la recherche des solutions de l'équation du troisième degré. Une méthode de résolution a été proposée par le mathématicien italien Jérôme Cardan (1501-1576) [16]. Or cette méthode conduit parfois à un paradoxe : En effet Bombelli devait résoudre l'équation du 3^{ième} degré :

$$X^3 - 15X - 4 = 0$$

dont il connaissait la solution $X = 4$. Pourtant l'équation auxiliaire qui apparaît dans la méthode de Cardan (voir la page suivante)

$$Z^2 - 4Z + 125 = 0$$

n'a pas de solution et donne des " *nombres impossibles* " :

$$Z_1 = 2 + 11\sqrt{-1} \quad \text{et} \quad Z_2 = 2 - 11\sqrt{-1}$$

Bombelli a remarqué que Z_1 et Z_2 sont respectivement les cubes de :

$$U = 2 + \sqrt{-1} \quad \text{et} \quad V = 2 - \sqrt{-1}$$

Ce qui lui a permis de retrouver la solution $X = 4$

Les termes gênants, où apparaît la racine carrée d'un nombre négatif, disparaissent dans le calcul de X .

Planche N°1 : *Méthode de Cardan*

Soit : $a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 = 0$ (1)

En posant :

$$x = \dots X - \frac{a_2}{3a_3}$$

L'équation (1) devient :

$$X^3 + pX + q = 0$$
 (2)

On effectue le changement de variables :

$$X = U + V$$
 (3)

On remplace la variable X par 2 variables U et V auxquelles on peut imposer une condition qui facilitera la résolution du problème . Après calculs, on obtient :

$$U^3 + V^3 + (3UV + p)(U + V) + q = 0$$
 (4)

On choisit la condition :

$$3UV + p = 0$$
 (5)

L'équation (4) devient :

$$U^3 + V^3 = -q$$
 (6)

On écrit l'expression (5) sous la forme

$$U^3 \cdot V^3 = -\frac{p^3}{27}$$
 (7)

Le système d'équations (6) et (7) fait apparaître :

$$Z_1 = U^3 \quad \text{et} \quad Z_2 = V^3$$
 (8)

comme les deux racines de l'équation du second degré :

$$Z^2 + qZ - \frac{p^3}{27} = 0$$
 (9)

En effet les expressions (6) et (7) représentent respectivement la somme et le produit de ces racines. La résolution de l'équation du second degré (9) permet de calculer, à partir de (8) U et V et de trouver, à l'aide de (3), les racines X de (2)

Bombelli disait : *« de l'avis de beaucoup, c'était une idée insensée, et moi-même je fus longtemps de cette opinion ; toute la question semblait reposer sur un sophisme⁹ plutôt que sur la réalité ; cependant, je cherchais jusqu'à ce que j'eusse prouvé que c'était bien la vérité ¹⁰».*

C'est cette contradiction entre une méthode mathématique, proposée par Cardan, et son application pratique qui a permis d'aboutir à l'une des plus grandes découvertes en mathématiques : celle des nombres complexes.

Cependant les nombres complexes découverts au XVI^{ème} siècle furent longtemps mésestimés par les mathématiciens. Au XVIII^{ème} siècle Euler écrivait encore [17] : *“ de ces nombres nous pouvons seulement affirmer qu'ils ne sont ni zéro, ni supérieurs à zéro, ni inférieurs à lui, ce qui nécessairement, les rend imaginaires ou impossibles”*⁹

Un grand pas fut franchi par les mathématiciens Caspar Wessel [19] , en 1799¹¹, et Jean Robert Argand, en 1806 [20] , lorsqu'ils trouvent, indépendamment l'un de l'autre, la représentation géométrique des nombres complexes au moyen de points dans un plan rapporté à un repère cartésien. Argand commence par considérer une progression arithmétique :

$$a , 2a , 3a , ...na$$

constituée, en passant d'un terme au suivant, en ajoutant la quantité a . cette opération peut être répétée à l'infini. Mais l'opération inverse, qui consiste à partir du dernier terme $n.a$ auquel on retranche a , finit par aboutir à 0. Pour aller plus loin il a fallu introduire de nouveaux nombres : les nombres négatifs .

$$- a , - 2a , - 3a , ...- na$$

-

Argand signale que cette façon de considérer les nombres, en nombres positifs et négatifs, fait intervenir deux idées :

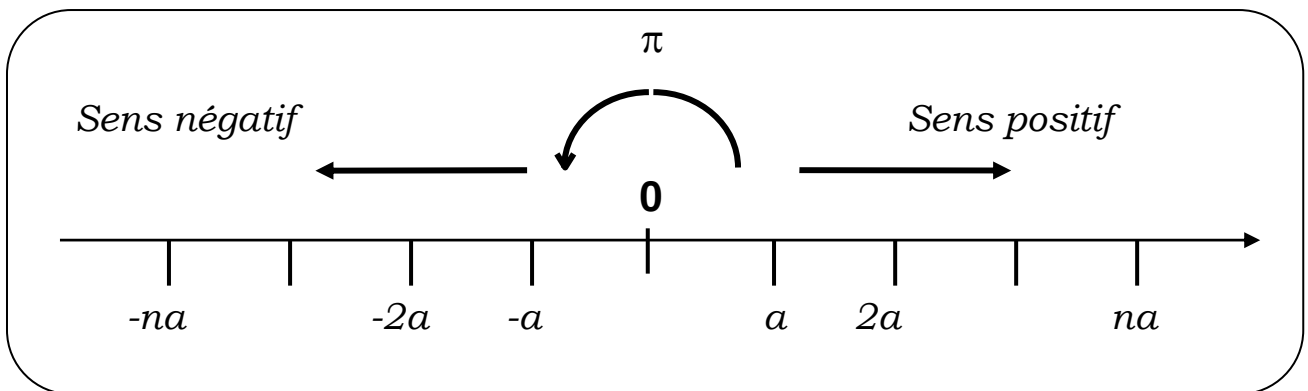
⁹ Raisonnement, qui partant de prémisses vraies et obéissant aux règles de la logique, aboutit à une conclusion inadmissible.

¹⁰ Cité par Cauty [17] ,

¹¹ Le travail de Caspar Wessel est passé inaperçu durant un siècle, il a été publié en 1897 à Copenhague et Paris

Chapitre I : Le raisonnement par analogie

- L'idée de valeur absolue
 - L'idée de signe + ou - ,
- et , dans le cas d'une représentation géométrique sur une droite orientée, l'idée de direction ou de sens.



Argand considère la quantité x telle que :

$$x^2 = -1$$

elle satisfait au rapport :

$$\frac{+1}{x} = \frac{x}{-1}$$

Argand remarque que :

" on est arrêté ici comme on l'a été en voulant continuer au delà de 0 la progression arithmétique décroissante, car on ne peut égaler x à aucun nombre positif ou négatif " [20]

Il se propose alors de procéder en adoptant un raisonnement analogue à celui qu'il a suivi pour les nombres négatifs qui sont caractérisés par une grandeur absolue et une direction opposée à celle des nombres positifs. Il utilise le principe même du raisonnement par analogie basé sur le rapport. Il considère le rapport précédent, et ayant adopté deux directions opposées pour les termes $(+1)$ et (-1) , il suggère une troisième direction pour x telle que la direction de $(+1)$ soit à celle de x ce que la direction de x est à celle de (-1) . Cette condition est satisfaite par la direction perpendiculaire aux

précédentes. Autrement dit cette direction est la “ *moyenne proportionnelle* ” de celles de $(+1)$ et (-1) .

Géométriquement si la première fait un angle 0 avec une direction D donnée, la seconde fera un angle égal à π , et x un angle égal à $\pi/2$

Ainsi $x = \sqrt{-1}$ aura pour grandeur absolue 1 et pour direction la perpendiculaire à D .

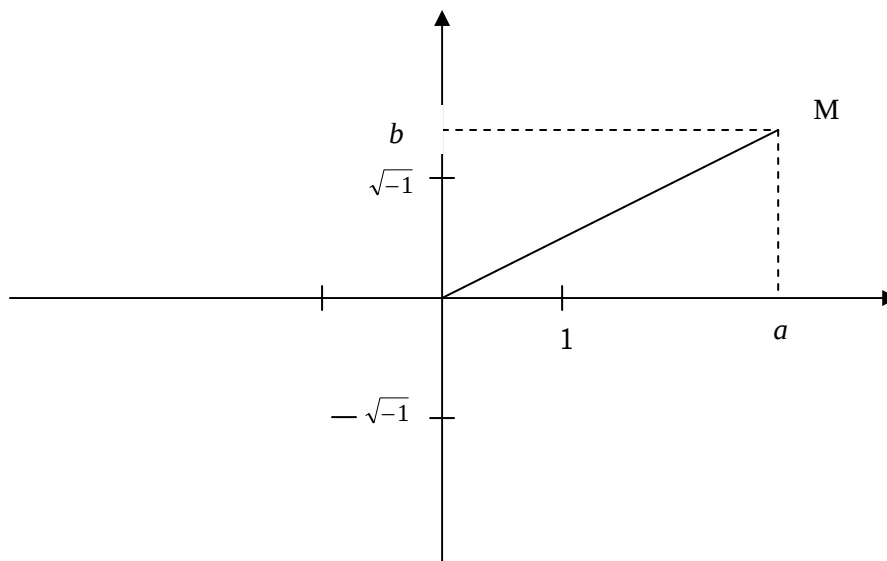


Figure I. 7 : Représentation d'Argand

A partir de là, tout nombre complexe :

$$z = a + b\sqrt{-1}$$

sera représenté dans le plan complexe par un point M dont les projections sont a ($+1$) sur l'axe horizontal (axe des réels) et $b\sqrt{-1}$ sur l'axe vertical (axe des imaginaires) a et b sont des nombres algébriques, positifs ou négatifs.

Les nombres complexes ont été baptisés ainsi par Gauss en 1831 et ne seront définitivement reconnus qu'après la “caution” de Gauss, en Allemagne et celle de Cauchy en France.

Ces travaux d'Argand ont été publiés, dans la "Revue des Annales de Gergonne", "le plus ancien périodique mathématique du monde"¹² par un professeur de mathématiques de l'école d'artillerie de Metz, qui en a pris connaissance par hasard [20]. Ils ont reçu un accueil mitigé, avec quelques louanges. "Les recherches d'Argand ont éclairé d'un jour inattendu les mystères qui régnaient depuis longtemps sur la véritable nature des quantités négatives et des quantités imaginaires. Avec cette représentation sensible aux yeux, on s'aperçut que l'impossibilité des quantités négatives et imaginaires n'est qu'apparente" (cité dans [20])

Mais les critiques furent sévères, ainsi le mathématicien Servois écrit dans les Annales de Gergonne [20]: "Monsieur. Argand s'est contenté d'appuyer sa proposition sur une sorte d'analogie et de convenance. Or il me paraît que, lorsqu'il s'agit de fonder une doctrine extraordinaire, opposée en quelque sorte aux principes reçus, dans une science telle que l'analyse mathématique, la simple analogie n'est point un moyen suffisant."

Le mode de raisonnement par analogie, utilisé par Argand, est, ici, mis en cause.

C'est le directeur de la Revue, J.D. Gergonne, qui répond "Il serait sans doute fort à désirer que l'esprit humain procédât constamment comme on le fait dans les traités ex professo et sur les bancs des écoles, mais malheureusement cela n'arrive presque jamais. M. Servois a-t-il oublié que ce n'est qu'après plus d'un siècle de méditations et d'essais infructueux qu'on est enfin parvenu à asseoir le calcul dit infinitésimal sur des bases solides ?

Où en serions nous pourtant si l'on avait exigé des premiers inventeurs de ce calcul qu'ils démontrassent rigoureusement leurs méthodes avant d'en faire des applications ? Il en a été exactement de même à l'égard des quantités négatives isolées, et il en sera toujours ainsi de toutes les théories ; l'homme les aperçoit par une sorte d'instinct, bien longtemps avant d'être en état de les démontrer en rigueur." [20]

¹² Préface de Itard ref [20]

Chapitre II

ANALOGIE ENTRE LES PROPRIETES MAGNETIQUES & DIELECTRIQUES DES MATERIAUX

1 . *Aperçu historique.* [1- 4]

1.1. Introduction.

Les matériaux magnétiques et diélectriques ont été découverts, sans doute à la même époque, dès l'antiquité. Les grecs savaient, à cette époque, que l'ambre jaune (électron) frotté attirait des corps légers. De même une pierre de Magnésie, la magnétite, avait la propriété d'exercer une force sur de petits morceaux de fer : d'où les mots électricité et magnétisme. Ainsi la contribution des grecs à cette science, comme le dit P. Devaux , [1] fut purement linguistique.

Les chinois et les arabes utilisent les propriétés magnétiques de certains corps et construisent les premières boussoles. Ce fut la première application du magnétisme. Leur utilisation va permettre aux grands navigateurs de s'aventurer loin des côtes et de découvrir de nouveaux horizons.

Mais ce n'est qu'à partir du XVIII^{ième} siècle que ces matériaux et leurs propriétés furent étudiés, et les premières lois de l'électricité et du magnétisme dégagées.

Depuis les études qui portent sur les matériaux diélectriques et magnétiques ont progressé en parallèle, les découvertes effectuées dans un domaine ont été souvent appliquées à l'autre. Les chercheurs ont largement utilisé,

comme nous allons le voir, le mode de raisonnement par analogie, le même vocabulaire a été souvent utilisé dans les deux domaines.

Albert Einstein¹ définit la physique comme “ *la science de la nature qui base ses concepts sur des mesures et dont les concepts se prêtent à être formulés mathématiquement*” . Elle nécessite, par conséquent deux outils :

- les mathématiques
- et les instruments d'observation et de mesure

Aussi ce n'est qu'à partir de la fin du XVI^{ème} siècle, lorsque ces deux outils furent perfectionnés que la physique moderne a démarré :

En 1637, Descartes élabore la géométrie analytique qui est une des plus importantes découvertes mathématiques pour la physique. D'après Maxwell² « *l'introduction des axes de coordonnées en géométrie, due à Descartes a été un des plus grand progrès fait dans les mathématiques car elle a ramené les méthodes de la géométrie à des calculs portant sur des quantités numériques, ceci permet d'appliquer l'algèbre à l'étude des courbes*” . L'autre grande découverte, au XVII^{ème} siècle, fut l'invention du calcul intégral et différentiel par Newton et Leibniz.

L'invention du thermomètre, du baromètre, de la lunette astronomique et la construction de balances et d'horloges de plus en plus précises allaient permettre aux physiciens d'effectuer des mesures exploitables.

A chaque fois que nous aborderons, dans ce chapitre, une période de l'histoire où un phénomène électromagnétique est étudié, nous ferons le point sur :

- l'état des connaissances sur les propriétés de la matière,
- l'état d'avancement des mathématiques,
- les instruments de mesure que les savants de l'époque avaient à leur disposition pour mener leurs études expérimentales.

¹ Einstein [5] page 78

² Maxwell [6] tome I , § 10, page 9.

1. 2. Les lois de l'électromagnétisme .

Les phénomènes électriques et magnétiques ont suscité l'intérêt de nombreux chercheurs à différentes époques. Les premières observations en magnétisme remontent au XIII^{ième} siècle, lorsque Pierre de Maricourt fit les premières constatations³ sur les propriétés magnétiques des aimants. Mais les premières expériences, en électrostatique et en magnétisme, sont dues à Guillaume Gilbert, médecin de la reine Elisabeth I d'Angleterre. A l'aide d'un détecteur d'électricité, qu'il mit au point sur le modèle de la boussole, il retrouve les propriétés de l'ambre dans de nombreux matériaux : pierres précieuses, verre, résines etc ... [3] .

En 1672 Otto Von Guericke fabrique la première machine électrostatique alors que, jusqu'à ce moment, l'électricité était produite par frottement manuel.

En 1721 , Grey et Wheeler ont remarqué que les métaux, les solutions acides ou alcalines, l'eau permettaient une circulation facile de l'électricité, alors que le diamant, le verre, les résines s'opposent au passage de l'électricité. D'où la distinction entre "conducteurs" et "isolants".

En 1745, Musschenbrock découvrit qu'une grande quantité de charges électriques pouvait être emmagasinée dans un appareil qui consiste en deux conducteurs séparés par un isolant. Ainsi fut construit le premier condensateur qui devint célèbre sous le nom de "bouteille de Leyde" et servit à de nombreuses expériences.

Au XVIII^{ième} siècle les expériences d'électricité étaient présentées comme une curiosité dans les salons mondains de l'époque [3].

Au milieu de ce siècle les premières théories furent émises. Benjamin Franklin met en évidence la nature électrique de la foudre. Il note les propriétés analogues de la foudre et de l'électricité produite à partir d'une bouteille de Leyde. Il émet l'hypothèse d'un fluide unique en électricité. Coulomb développe, quant à lui, une théorie de l'électricité basée sur l'existence de deux fluides électriques.

³ Epistola de Magnete 1269 cité dans [3].

Ces savants assimilaient l'électricité à un fluide impondérable qui se trouve à l'intérieur de la matière en quantité infinie ; aucun procédé ne pouvait enlever à un corps toute son électricité. Dans la théorie des deux fluides, on admet que tout corps non chargé contient autant d'électricité positive que d'électricité négative. L'électrisation d'un corps consiste à lui enlever une certaine quantité de fluide positif (ou négatif) pour la donner à un autre corps. Après cette opération le premier sera chargé négativement et le second positivement (ou l'inverse) [6- 8]

En 1771 Priestley propose, en utilisant un raisonnement par analogie ,une loi d'interaction entre deux charges électriques similaire à celle de la gravitation donnée par Newton [3].

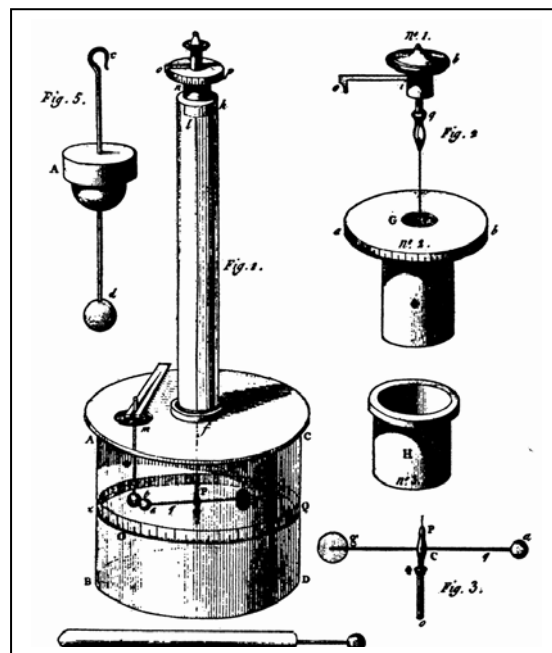


Figure II. 1. : Balance de Coulomb ⁴

En 1785, Coulomb effectua les premières études quantitatives, à l'aide d'une balance qu'il mit au point⁴ (figure II.1.). Il mesura les forces qui s'exercent entre deux "*charges magnétiques*" et établit que celles-ci sont

⁴ Coulomb : Construction et usage d'une balance..... Premier Mémoire 1785 [40]

inversement proportionnelles au carré de la distance qui sépare les charges. Puis il vérifia expérimentalement l'hypothèse de Priestley en considérant deux charges électriques.

L'analogie entre les forces d'interaction électrostatique et magnétique mise en évidence par Coulomb est soulignée par Biot⁵ qui écrit dans "Edinburg Encyclopaedia": « *We may remark that there exists the most complete, the most perfect, and the most ultimate analogy between the laws of the two magnetic principles and those of the two electrical principles* »

Ces lois d'interaction formellement identiques à la loi de l'attraction universelle, firent triompher, au XVIII^{ème} siècle, le modèle newtonien c'est à dire le point de vue de Laplace. En 1811, son disciple Poisson étend à l'électrostatique puis, une dizaine d'années plus tard, au magnétisme la théorie du potentiel qu'il a développée pour la gravitation. Green applique, lui aussi, cette théorie au magnétisme et introduit⁶ pour la première fois le terme de "*potentiel*".

Jusqu'en 1820, l'électricité et le magnétisme étaient deux disciplines indépendantes. L'invention de la pile, par Volta en 1800, allait permettre au physicien danois Oersted de monter une expérience qui allait donner naissance à l'électromagnétisme : l'électricité et le magnétisme étaient désormais unifiés.

Les lois de l'électromagnétisme ont été découvertes à partir de nombreuses expériences entreprises durant la première moitié du XIX^{ème} siècle. La réalisation de ces expériences a été la conséquence de l'invention d'appareils et de dispositifs de mesure, et leur interprétation a été possible grâce au perfectionnement de l'outil mathématique. Ainsi le premier galvanomètre fut mis au point par Ampère, cet appareil fut perfectionné par Nobili (figure II.2) puis par d'autres savants dont d'Arsonval. D'un autre côté les progrès effectués en mathématiques ont permis de formuler ces lois et d'élaborer des théories. Au milieu du XIX^{ème} siècle Maxwell ⁷ résume toutes ces lois en

⁵ Cité par C. Blondel [9] page 18

⁶ Green G. *Mathematical papers* Ed. Hermann 1903

⁷ Maxwell "Dynamical theory of Electromagnetic field " Phil. Trans. 155 p 459 – 512 1865

quatre équations ⁸ qui portent son nom. A partir de celles-ci il montre que les champs magnétique et électrique se propagent dans le vide à la même vitesse c que la lumière. L'existence de ces ondes électromagnétiques a été vérifiée expérimentalement par Hertz. *“L'incorporation de l'optique dans la théorie électromagnétique, écrit Einstein, représente un des plus grands triomphes dans l'effort d'unification de la physique. Maxwell a réalisé cette unification”* ⁹.

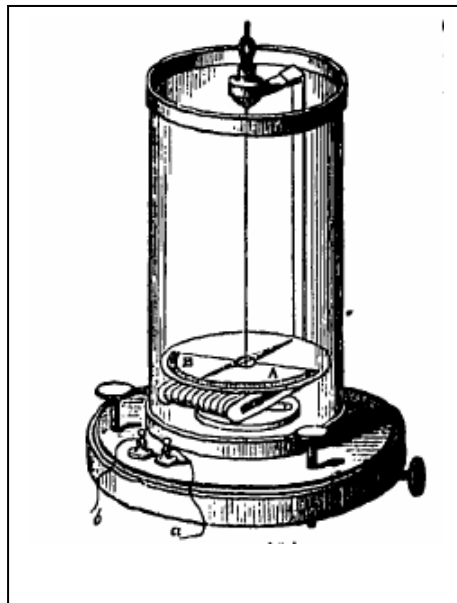


Figure II. 2. : Galvanomètre de Nobili ¹⁰

Enfin en 1905, la théorie de la relativité restreinte, introduite indépendamment par Poincaré et Einstein clarifie le concept de champ électromagnétique qui apparaît, dans l'espace à quatre dimensions, sous la forme d'un tenseur dont les éléments sont les composantes de E et B de l'espace à trois dimensions

⁸ En fait Maxwell a écrit ses équations en utilisant le formalisme des quaternions de Hamilton. Elles ont été écrites sous forme vectorielle par Heaviside. Voir Abdedou Ref. [16] du Chapitre I.

⁹ A. Einstein [5] page 132

¹⁰ A. de la Rive [8] page 324

1. 3. Les milieux magnétiques.

L'analogie formelle entre les lois de Coulomb de l'électrostatique et du magnétisme amena Poisson à attribuer, comme en électricité, les phénomènes magnétiques à l'action de deux fluides. Dans cette théorie, un fluide magnétique ne peut pas passer d'une molécule à une autre. L'aimantation consiste à séparer les deux fluides dans chaque molécule de façon à constituer des "dipôles magnétiques". La plupart des matériaux perdent leur aimantation dès que la cause qui l'a créée cesse. Par contre d'autres substances, comme les aciers durs, gardent une aimantation rémanente, d'où l'existence d'une force coercitive qui tend à empêcher toute variation de l'aimantation [7 - 8]

La naissance de l'électromagnétisme, en 1820, et les énormes progrès accomplis, dans ce domaine, durant tout le XIX^{ième} siècle, ont permis de donner d'autres interprétations aux propriétés magnétiques de la matière. Pour expliquer les propriétés des aimants permanents, Ampère imagina , dès 1820, l'existence de courants internes circulant autour des "*molécules*" de la matière aimantée. Cette hypothèse révolutionnaire eut beaucoup de mal à s'imposer. Ces courants sont équivalents à de petits aimants (dipôles magnétiques). La théorie d'Ampère sera exposée en détail au paragraphe II.

Pour effectuer ses expériences , Faraday est amené à construire une balance destinée à mesurer le magnétisme de substances placées dans un gradient de champ magnétique. Elle sera utilisée par la suite par Pierre Curie comme nous le verrons au paragraphe IV. Ces travaux permettent à Faraday de classer, en 1846, les matériaux magnétiques en paramagnétiques et diamagnétiques¹¹. Dans le cas de ces derniers un très faible magnétisme s'oppose à la " force magnétisante" qui l'a créé.

¹¹ Faraday [10] Tome III pages 457 à 466.

De nombreux savants, Weber, Voigt, J.J. Thomson, ..., ont essayé d'interpréter ces résultats expérimentaux. Nous présenterons, au paragraphe III, la théorie du paramagnétisme de Weber.

Faraday, William Thomson, Maxwell ont introduit les concepts de " champ magnétique" ¹² H , "d'induction magnétique" B et de pouvoir inducteur ou perméabilité magnétique μ du milieu. Cette grandeur, qui caractérise un milieu magnétique, est définie comme le rapport de B sur H .

En 1880, Emil Warburg découvre, dans les matériaux ferromagnétiques, le phénomène d'hystérésis . Ce terme, qui vient du mot grec υστερησις qui signifie " retard", sera introduit¹³ par Ewing.

Dans sa thèse en 1895, Pierre Curie, a étudié l'influence de la température sur les matériaux magnétiques,. Il remarqua que , pour les corps diamagnétiques, la susceptibilité est très faible, négative et indépendante de la température. Par contre, pour les paramagnétiques, ce coefficient est positif et varie en raison inverse de la température. Un matériau ferromagnétique se transforme lorsqu'on le chauffe en paramagnétique. La température de transition sera appelée température de Curie. D'autre part son attention fut attirée par l'analogie entre la variation de l'aimantation d'un corps ferromagnétique en fonction du champ et de la température et celle de la densité d'un fluide en fonction de la pression et de la température.

En 1905 Paul Langevin proposa une théorie pour le diamagnétisme et le paramagnétisme et exprima, dans ce cas, la constante de Curie en fonction des grandeurs microscopiques. Cette théorie, sur laquelle nous reviendrons dans ce chapitre, suppose que les moments magnétiques des atomes peuvent avoir toutes les directions par rapport au champ. Ces moments magnétiques résultent du mouvement des électrons qui gravitent dans

¹² Ces appellations ont suscité des confusions et font l'objet de controverses. Ref. **[14]** du Chapitre I.

¹³ Mascart **[11]** Tome 1, page 129

l'atome sur des orbites fermées et qui correspondent aux courants particuliers imaginés par Ampère

En 1907 Pierre Weiss, à partir de la théorie de Langevin, a élaboré une théorie du ferromagnétisme en introduisant un champ magnétique fictif qu'il appela champ moléculaire. Il aboutit à une loi de variation de l'aimantation en $1/(T - T_c)$: c'est la loi de Curie Weiss . Au dessous de T_c le matériau acquiert une aimantation spontanée et devient ferromagnétique [12- 13].

D'autre part Pierre Weiss a introduit la notion de "domaines". Un matériau ferromagnétique est composé de domaines, aimantés, tous, à saturation. En l'absence de champ magnétique ces domaines sont répartis dans toutes les directions. Félix Bloch a mis en évidence, en 1932, le rôle fondamental joué par les "parois" qui séparent ces domaines. On les a appelés par la suite "parois de Bloch". L'existence des " domaines" a été confirmées par différentes méthodes expérimentales. L'effet Berkhaussen¹⁴, par exemple, découvert en 1919, permet une estimation du nombre de domaines.

A partir de 1925, le magnétisme a trouvé , lorsque le formalisme de la mécanique quantique fut mis au point, un cadre idéal pour se développer.

C' est ainsi qu'en 1927, Léon Brillouin [12] modifia la formule de Langevin relative au paramagnétisme. Ce dernier avait supposé, en 1905, que les moments magnétiques pouvaient prendre toutes les directions par rapport au champ.

En 1928 Heisenberg explique, grâce à la mécanique quantique, la nature du champ moléculaire introduit par Weiss. *" C'était un succès très important pour la mécanique quantique, car c'était la première utilisation qu'on en faisait en dehors de la spectroscopie atomique pour laquelle elle a été inventée."* ¹⁵

En 1931 Louis Néel propose dans sa thèse [14] une théorie pour expliquer les propriétés des matériaux antiferromagnétiques (FeO , MnF₂) mises en évidence par des études expérimentales notamment celle de Bizette [12]. Au dessous d'une température critique T_N , analogue à la température de Curie

¹⁴ Weiss et Fox [13] page 183

¹⁵ Herpin [12] page 36.

et appelée température de Néel, le matériau présente un état magnétique ordonné dans lequel les moments magnétiques sont égaux et opposés,

l'aimantation résultante est par conséquent nulle. Au dessus de T_N , le matériau devient paramagnétique.

La théorie du Ferrimagnétisme est exposée par L. Néel en 1948 [15]. La magnétite (oxyde de fer) est un matériau ferrimagnétique. Les ferrites, bien qu'ils présentent une aimantation plus faible que les alliages métalliques, ont en général une très faible conductivité électrique d'où leur utilisation en hautes fréquences. A la fin des années quarante, les laboratoires Philips développèrent des recherches sur les ferrites de la famille des Mn Zn et Ni Zn en vue de leurs applications en électronique et dans le domaine des télécommunications [16]

1.4 . Les diélectriques.

Comme nous l'avons vu précédemment c'est au XVIII^{ème} siècle que les expériences de Grey et Wheeler ont permis de faire la distinction entre deux types de charges électriques, appelées plus tard charges positives et négatives et deux types de matériaux : les conducteurs qui permettent la circulation de ces charges et les isolants qui les empêchent .

L'expérience d'Aepinus a montré, au milieu du dix huitième siècle, que la différence de potentiel entre deux plaques conductrices planes et parallèles séparées par l'air, diminue lorsqu'on introduit, entre celles-ci, une lame de verre, c'est à dire un isolant électrique.

Très peu d'attention fut portée aux propriétés des isolants jusqu'à ce que Faraday publia les premiers résultats de ses expériences sur ces matériaux qu'il baptisa "diélectriques" . L'action qui se produit à travers ces milieux fut appelée " l'induction". *L'induction¹⁶ est un état de polarisation des molécules du diélectrique, dans lequel chaque molécule est positive d'un côté et négative de l'autre* .

¹⁶ M. Faraday [10] Experimental Research Vol I, series XII et XIII N° 1298

Les résultats des mesures de Faraday montrent que la capacité d'un "condensateur" dépend de la nature du matériau séparant les deux surfaces conductrices et confirment ainsi l'expérience d'Aepinus.

Selon Maxwell¹⁷, Cavendish avait réalisé des expériences similaires une soixantaine d'années plus tôt, mais Faraday ignorait ces travaux, qui n'avaient pas été publiés. Pour désigner le rapport entre la capacité du "condensateur" rempli d'un diélectrique, et celle du même condensateur vide, Faraday a introduit le terme : "pouvoir inducteur spécifique". Cette quantité sera appelée, par la suite, "permittivité ou constante diélectrique" et notée ε . Là encore, cette grandeur est définie comme le rapport de "l'induction" D sur le champ électrique E .

L'analogie entre les grandeurs qui apparaissent en magnétisme et dans le cas des diélectriques a amené les savants à utiliser le même vocabulaire.

En 1847, Mossotti [18] applique, aux diélectriques, la théorie, basée sur l'hypothèse des fluides magnétiques que Poisson avait élaborée pour le magnétisme. Mossotti considère un diélectrique constitué de "molécules", contenant les deux fluides électriques et susceptibles d'avoir leurs extrémités chargées en sens inverse par induction : c'est la polarisation induite. Ces "molécules" sont réparties dans un milieu parfaitement isolant. Il établit une relation entre le "pouvoir inducteur" ε et la fraction de volume occupée par les molécules conductrices. Cependant cette expression est restée inconnue jusqu'à ce que Clausius la redécouvrit de façon indépendante en 1879. C'est la formule de Clausius-Mossotti, qui a été étendue aux fréquences optiques, à la fin du siècle par L. Lorentz [17].

La théorie de Maxwell montre que les ondes électromagnétique, qu'il vient de découvrir, se propagent dans un milieu de permittivité diélectrique ε et de perméabilité magnétique μ , à la vitesse :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}$$

¹⁷ Maxwell : *The electrical Researches of the honourable Henry Cavendish* cité dans Maxwell, [6], page 59.

Dans le cas d'un diélectrique la perméabilité magnétique est pratiquement égale à celle du vide ($\mu \approx \mu_0$) et sa permittivité relative ϵ_r égale au carré de son indice de réfraction :

$$n^2 = \epsilon_r$$

C'est la relation de Maxwell. De nombreuses mesures furent entreprises dans le but de vérifier cette expression. Les résultats expérimentaux ont montré que la formule de Maxwell était assez bien vérifiée, aux fréquences optiques, dans de nombreux cas, par contre certains milieux présentent un phénomène de dispersion anormale accompagnée d'une absorption d'énergie électromagnétique. On a alors introduit une permittivité complexe dont la partie imaginaire traduit l'absorption de l'énergie par le milieu.

$$\epsilon^* = \epsilon' - j \epsilon''$$

H.A. Lorentz a justifié la validité de l'expression de n^2 pour un milieu constitué de molécules dont les charges positives sont reliées, par des forces élastiques, à des électrons, selon le modèle de J.J. Thomson. Dans sa théorie H.A. Lorentz introduit le concept de champ local. La relation obtenue, équation de Lorenz-Lorentz, peut être vérifiée expérimentalement. En basses fréquences on remplace n^2 par ϵ_r et on retrouve la formule de Clausius Mossotti [17]

Les expériences ont montré que si la formule de Lorenz-Lorentz est vérifiée dans le cas des fréquences optiques, par contre, en basses fréquence celle de Clausius Mossotti ne l'est plus dans le cas des matériaux polaires.

Debye¹⁸ publia une théorie à ce sujet en se basant sur celle que Langevin a établie pour le magnétisme. Il aboutit à une équation, dérivée de la formule de Clausius Mossotti. L'équation de Debye permet de calculer le moment dipolaire d'une molécule polaire à partir de la mesure de ϵ . Cette méthode ne suscita pas l'intérêt des savants jusqu'en 1920, date à partir de laquelle on a

¹⁸ La théorie de Debye sera exposée au paragraphe V.

commencé à avoir une idée sur la structure des molécules. La valeur du moment dipolaire pouvait être reliée à l'arrangement géométrique des atomes. Mais les expériences ont montré que le domaine de validité de la théorie de Debye était limité.

En 1936, Onsager a proposé une théorie où il fait intervenir le champ de réaction créé par les dipôles. Cependant la théorie d'Onsager n'est pas applicable à tous les matériaux polaires, d'autres théories ont été proposées [17].

Peu de temps après que Debye eut introduit le concept de molécule polaire¹⁹ dans la théorie des diélectriques, il l'utilisa pour expliquer la dispersion anormale de la permittivité. Celle-ci résulte du retard de la rotation des dipôles par rapport à l'évolution du champ appliqué. Il introduisit un temps de relaxation τ . D'autres auteurs, notamment Cole et Cole en 1941 [19] Havrilač et al. [17] en 1967, ont élaboré des théories faisant intervenir une distribution des temps de relaxation τ .

En 1921, Valasek²⁰ met en évidence l'analogie entre les propriétés du sel de la Rochelle (remarquées en 1672 par le pharmacien français Seignette) et celles des matériaux ferromagnétiques; il découvre la ferroélectricité. Depuis de nombreux chercheurs ont retrouvé ce phénomène dans d'autres matériaux :

Les cristaux à liaison hydrogène (Phosphate diacide de potassium KH_2PO_4), les sels isomorphes ..

et les cristaux ioniques à structure perovskite comme le titanate de Barium (BaTiO_3).

Selon Tareev [21] les premières études théoriques sur ces matériaux furent développées par Kurchatov et Kobeko en 1930.

¹⁹ Dans le cours de Maxwell [6], seule la polarisation induite est considérée. La polarisation dipolaire a été introduite par la suite, par analogie avec le magnétisme. Le vecteur $\mathbf{P}$ apparaît dans le cours de Mascart [11] publié en 1896.

²⁰ Merz [20] page 104.

En 1929 Sawyer et Tower [22] décrivent un dispositif expérimental qui leur a permis de relever le cycle d'hystérésis présenté par le Sel de la Rochelle.

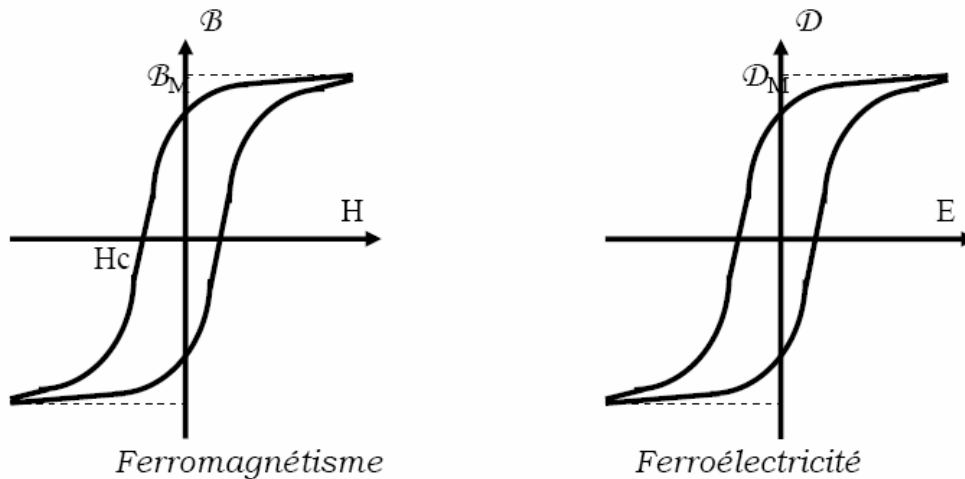


Figure II. 3. : Analogie géométrique

L' analogie géométrique, mise en évidence par les courbes $D(E)$ et $B(H)$ (figure II.3) a amené les chercheurs à essayer de retrouver, dans les ferroélectriques, les propriétés et les théories du ferromagnétisme :

On a pu montré [23] qu'au dessus d'une certaine température critique T_c , analogue à la température de Curie en magnétisme, la ferroélectricité disparaît et le matériau se retrouve dans un état " paraélectrique".

Par analogie au ferromagnétisme on explique la polarisation spontanée par l'existence de domaines spontanément polarisés. Le matériau est globalement non polarisé quand les volumes des domaines de sens opposés sont égaux et polarisé dans le cas contraire. Le moment dipolaire total du cristal peut varier sous l'effet d'un déplacement de parois entre les domaines .L'existence de domaines et le mouvement des parois ont été mis en évidence, en 1954, dans le titanate de baryum par Merz [20].

On retrouve en ferro électricité le phénomène de Barkhausen²¹ qui apparaît dans les matériaux magnétiques.

²¹ Durand [23] Tome III page 371

2. Théorie d'Ampère sur l'origine du magnétisme.

Les principaux résultats obtenus par Ampère en électromagnétisme sont rassemblés dans deux ouvrages : Le premier [24], publié en 1827, est intitulé "*Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience*". Le second, publié par Maurice Solovine [25] contient des communications présentées à l'Académie Royale des Sciences de 1820 à 1825 .

2.1 . Etat des connaissances et outils disponibles en 1820 .

2.1.1. Etat des connaissances sur les propriétés de la matière :

On savait, au début du XIX^{ème} siècle, que la matière était formée de particules. En 1805, le chimiste anglais J. Dalton réintroduit le concept d'atome, utilisé par les grecs dans l'antiquité. Mais cet atome n'a rien à voir avec celui des grecs qui était vaguement défini. Dalton associe à chaque corps simple un atome¹ différent par sa taille et sa masse, de plus il suppose que les atomes d'un même élément sont identiques. L'introduction de cette notion allait permettre aux chimistes d'effectuer d'énormes progrès, mais la structure de l'atome, qui aurait intéressé les physiciens, était complètement inconnue . Il faut attendre un siècle pour avoir une première idée de cette structure.

D'un autre côté, il n'y avait aucune distinction entre atome et molécule. Thénard écrit, dans son traité de chimie de 1816 , que la matière est formée de particules qu'on appelle indifféremment corpuscules, atomes ou molécules.² Ce sont ces molécules qu'utiliseront Ampère et les physiciens de son époque dans leurs théories de l'électricité et du magnétisme. La

¹ En fait l'atome de Dalton représente la molécule telle qu'elle est définie aujourd'hui.

² J.L. Thénard : Traité de chimie élémentaire théorique et pratique 4 vol. Paris Cochard 1816 : Cité dans histoire de la chimie [4] p 155

différence entre atomes et molécules sera faite par S. Cannizzaro, lors du congrès de Karlsruhe³ en 1860 [4].

2.1.2. Outil mathématique :

On disposait du calcul intégral et différentiel , introduit indépendamment par Newton et Leibnitz au XVII^{ème} siècle, il a été perfectionné par les grands mathématiciens du XVIII^{ème} siècle notamment le savant suisse Léonard Euler (*Institutionis calculi differentialis*:1755) [26- 27].

Le calcul intégral et différentiel a permis de résoudre des problèmes d'électrostatique et de magnétostatique à partir du formalisme de Newton basé sur le concept de force . La théorie du potentiel, développée par Laplace en mécanique, a été appliquée par Poisson et Green⁴ à l'électrostatique et la magnétostatique. Le concept de champ ne sera introduit qu' au milieu du XIX^{ème} siècle par Faraday et Maxwell.

Ampère ne disposait pas de l'outil mathématique " vecteur " qui ne sera utilisé en électromagnétisme qu'à la fin du XIX^{ème} siècle par Heaviside et Gibbs . Maxwell s'est servi de la théorie des quaternions, introduite par Hamilton en 1850, pour la formulation des lois de l'électromagnétisme (équations de Maxwell).

A l'époque d'Ampère, les équations étaient présentées sous forme cartésienne ce qui rendait la lecture des traités de physique assez pénible d'autant plus que toutes les figures étaient reportées à la fin de l'ouvrage.

2.1.3. Outil expérimental :

Pour entreprendre des expériences, dans ce nouveau domaine qu'est l'électromagnétisme, les physiciens ne disposaient, en 1820, que de quelques instruments.

En 1800 le savant italien Volta invente la pile qui porte son nom. Les expérimentateurs disposent désormais d'une source d'électricité qui leur

³ Ce fut le premier congrès international de chimie.

⁴ C'est Green qui a utilisé le terme "potentiel"

permet d'obtenir des courants électriques permanents. Jusqu'à cette époque, ils se servaient de la bouteille de Leyde qui, comme tout condensateur se décharge très rapidement. Les conséquences de cette invention sont énormes tant en physique, comme nous allons le voir, qu'en chimie. En 1810, H. Davy écrit : “ *La pile a retenti pour les expérimentateurs comme une sonnette d'alarme à travers toute l'Europe*”.⁵ Les phénomènes d'électrolyse, inconcevables sans cette pile, allaient permettre aux chimistes, notamment Davy et Berzélius, de découvrir de nouveaux éléments chimiques tels que le chlore, l'iode, le brome, le sodium, le potassium, le calcium, le magnésium, le sélénium, le silicium etc..[4].

L'électroscope à feuille d'or, qui est transformé en électromètre lorsque la feuille d'or se déplace devant un cadran gradué, permet d'estimer la charge ou le potentiel électrostatique d'un corps électrisé.

La balance de torsion, inventée par Coulomb comme nous l'avons signalé au §1, mesure la force électrique ou la force magnétique exercée entre deux corps

Le pendule magnétique est utilisé en magnétisme, lors de l'étude du magnétisme terrestre par exemple. La période du pendule était mesurée à l'aide de chronomètres précis à la demi seconde [28].

D'un autre côté, seules les unités de mesure de la mécanique étaient connues. L'introduction du système métrique, après la révolution française, constituait un énorme progrès, mais il n'existait aucune unité de mesure en électricité et en magnétisme.

II. 2 . L'expérience d'Orsted 1820 et ses conséquences.

Oersted annonce, au début du second semestre de l'année 1820, une découverte par une publication en latin : *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam...* Cet article est traduit en plusieurs langues, en allemand en anglais, en français : *Expériences sur l'effet du conflict électrique sur l'aiguille aimantée* [29].

⁵ Cité dans histoire de la chimie [4].

Il fait savoir que des expériences, menées au cours de son enseignement durant l'hiver 1819, ont montré qu'une aiguille aimantée était déviée sous l'effet du "*conflict électrique*". Il a pu obtenir ce résultat parce qu'il a utilisé une pile "*peu énergétique*", pile dont il donne une description par la suite. Car dans des expériences antérieures, comme celles effectuées par J. Hachette et M. Thénard [30]., le fil conjonctif⁶ chauffait, rougissait puis brûlait dans l'atmosphère.

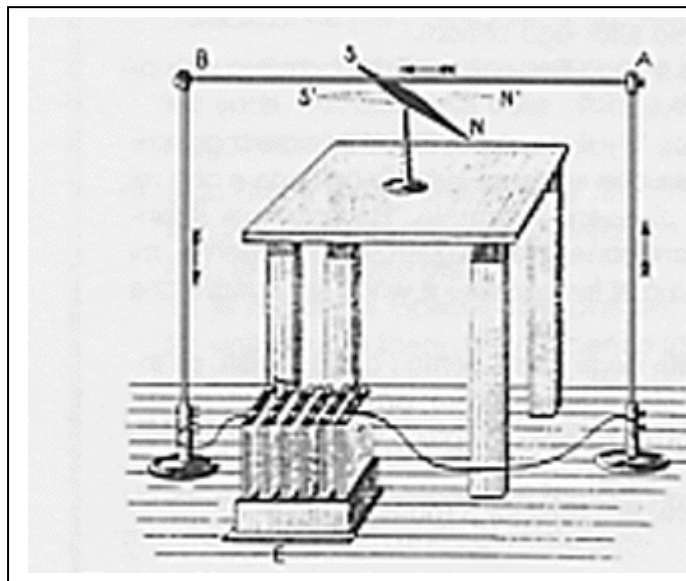


Figure II. 4 : Expérience d'Oersted

L'effet observé, par Oersted, subsiste lorsqu'il interpose, entre le fil et l'aiguille⁷ divers substances comme le verre, le bois, l'eau etc.. Il effectue de nombreuses expériences en modifiant la disposition du fil et de l'aiguille. Il suppose que "*le conflict électrique n'est pas renfermé dans le fil conducteur mais qu'il a autour de lui une sphère d'activité assez étendue*" et que les effets observés ont lieu par des mouvements giratoires.

La nouvelle de cette découverte se répand à travers toute l'Europe.

⁶ Fil qui relie les deux pôles de la pile.

⁷ Un demi siècle plus tôt, dans ses expériences d'électrostatique, Aepinus avait interposé entre les deux plaques d'un "condensateur" différents isolants et avait constaté un effet.

Des savants répètent l'expérience et tentent de l'expliquer. Ainsi, à Paris, Arago refait l'expérience, devant ses collègues, à l'Académie des Sciences le 11 septembre 1820 [25]. Cette expérience est également répétée à Londres par Humphry Davy le 1^{er} octobre 1820 [31]. .

Nulle part la fièvre ne fut aussi intense qu'à Paris , où en quelques semaines, de nombreux physiciens dont Ampère et Biot présentent des communications à l'Académie des Sciences et publient les résultats de leurs travaux.

Le 18 septembre 1820, soit une semaine après la démonstration d'Arago, Ampère expose devant les académiciens les résultats des expériences qu'il a effectuées durant la semaine et propose déjà une théorie⁸ qui ramène, comme nous allons le voir par la suite, le magnétisme à l'électricité.

Lors de la séance du 30 octobre, Biot et Savart [28]. énoncent la loi qui donne la force, créée par un fil de longueur infinie , “ *rendu magnétique par le courant voltaïque*”, qui agit sur une “*molécule de magnétisme*”. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un pendule magnétique.

Ces savants ont poursuivi leurs travaux pour trouver la force exercée par un élément de longueur du fil parcouru par un courant électrique : “ *L'action de chaque élément μ du fil sur chaque molécule m de magnétisme austral ou boréal est réciproque au carré de sa distance μm à cette molécule, et proportionnelle au sinus de l'angle $\mu m M$ formé par la distance μm avec la longueur du fil* ”.⁹ La formule empirique de Biot a été démontrée par Laplace.

En 1820 le concept de champ n'est pas encore introduit : La loi de Biot donne la force élémentaire qui s'exerce, par *chaque tranche* d'un fil, parcouru par un courant électrique, sur *une molécule de magnétisme austral ou boréal placée* en un point M.

En 1821 Davy [32]. vérifie qu'un aimant agit sur un fil parcouru par un courant électrique et Faraday découvre [52]. l'action révolutionnaire de la force d'Oersted (Rotation d'un aimant autour d'un courant)

⁸ Faraday : Historical sketch [37].

⁹ Biot : Précis élémentaire de physique [36].Deuxième édition : tome II p 122

Les travaux entrepris par Ampère, suite à l'expérience d'Oersted, lui ont permis d'apporter, comme nous allons le voir dans ce qui suit, une contribution inestimable au développement de cette science naissante : l'électromagnétisme.

Il introduit le concept de "*courant électrique*" qui remplace le terme, "*conflit*" utilisé auparavant. La pile et le fil conducteur sont traversés par un même courant et forment un "*circuit électrique*". . Jusqu'à ce moment, on pensait que la pile se déchargeait à travers le conducteur comme une bouteille de Leyde qui n'est autre qu'un condensateur. "*L'action électromotrice se manifeste par deux sortes d'effets : J'appellerai le premier la tension électrique et le second courant électrique.*"

Il définit le sens de parcours du courant dans le circuit électrique à partir du phénomène d'électrolyse de l'eau¹⁰ . C'est ce courant qui est responsable du phénomène d'électrolyse et non pas la "*différence de tension*" des deux extrémités de la pile. C'est lui aussi qui agit sur l'aiguille aimantée dans les expériences d'Oersted. Il introduit alors la règle dite du "*bonhomme d'Ampère*" qui donne la direction et le sens de la force qui s'exerce sur l'aiguille aimantée ¹¹. Il se propose de construire un appareil, basé sur ce phénomène, pour mesurer un courant électrique : "*Pour distinguer cet instrument de l'électromètre*¹² *ordinaire, on doit lui donner le nom de galvanomètre*" [25]. (page.9)

2. 3 . Les courants ampériens

Le magnétisme était expliqué, avant 1820, par l' hypothèse de Poisson¹³ : Un matériau magnétique est constitué de molécules magnétisées où sont confinées les deux espèces contraires de fluide magnétique plus ou moins séparées vers les pôles opposés de la molécule. Ces espèces ne peuvent jamais être séparées. Mais Poisson ne pouvait pas expliquer la nature d'une

¹⁰ Page 6 : Ampère [25].

¹¹ Page 9 : Ampère[25].

¹² Cet appareil indique la "tension" entre les deux extrémités d'une pile.

¹³ Maxwell : Traité d'électricité et de magnétisme [7].

telle molécule. Dès la publication de l'article d'Oersted [29]. Ampère, par un éclair de génie, propose, en quelques jours, une nouvelle théorie.

Premier modèle :

Ampère est guidé par l'analogie entre un barreau aimanté et un solénoïde. Il conçoit d'abord (séance du 18 septembre 1820) l'aimant comme *"un assemblage de courants électriques dans des plans perpendiculaires à la ligne qui en joint les pôles, cette analogie me fit d'abord chercher à en imiter l'action par des conducteurs pliés en hélice, dont chaque spire me représentait un courant disposé comme ceux d'un aimant"* [25].

Il nomme " solénoïde" ce fil conducteur enroulé en hélice autour d'un cylindre. Ce terme vient du mot grec $\sigma\omega\lambda\eta\nu\omicron\epsilon\iota\delta\eta\varsigma$ dont la signification exprime ce qui a la forme d'un canal¹⁴ [24]. Au cours de cette séance, il annonça son intention d'entreprendre une série d'expériences pour imiter tous les effets de l'aimant avec des solénoïdes

"J'annonçais, dans un mémoire lu à l'Académie le 18 septembre 1820, l'intention où j'étais de faire construire des hélices en fil de laiton pour imiter les effets de l'aimant"

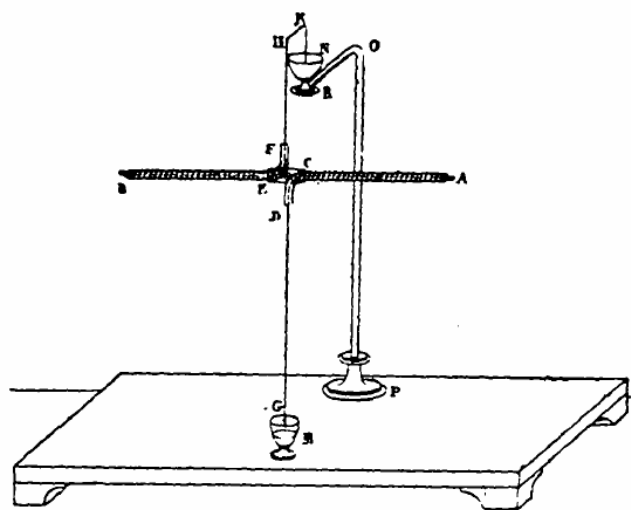


Figure II. 5. hélices en fil de laiton (Ref [25]. page 24) .

¹⁴ Ref [24]. page 267.

L'appareil représenté sur la figure II.5. lui a permis d'entreprendre de telles expériences. Ampère signale qu'au cours de ces expériences il découvrit un fait nouveau : Tout courant électrique, rectiligne ou courbe, de grandeur finie, peut être conçu comme composé de portions $i.ds$ infiniment petites. Ces éléments $i.ds$ et leurs composantes, suivant trois directions quelconques, exercent, sur un autre courant ou sur un aimant, la même action¹⁵.

Cette découverte lui permet d'entreprendre des calculs, en utilisant les différentielles, dans le cadre d'une théorie sur l'interaction entre deux courants électriques [25].

Second modèle :

L'analogie entre le barreau aimanté et le solénoïde n'est pas parfaite. Faraday a relevé certaines différences sur lesquelles nous reviendrons plus loin. Ampère est contraint de proposer un second modèle , mais restera toujours fidèle à son hypothèse sur l' analogie de l'électricité et du magnétisme et n'abandonnera jamais cette idée.

Il explique toujours le magnétisme par la circulation, dans le matériau, de courants électriques, mais à présent ce sont des " courants moléculaires" qui circulent autour de chacune des particules de l'aimant. Comment se comportent ces courants ? Préexistent-t-ils dans l'aimant, ou sont-ils initiés par une action extérieure ?

Ampère répond :

"...Il résulte que l'on ne peut point exciter de courant électrique par influence , ce qui a porté l'auteur à penser que les courants électriques existent, avant l'aimantation, autour des corps susceptibles de magnétisme, mais qu'ils y existent dans toutes sortes de directions ; ce qui fait que leurs actions sur des points situés hors de ces corps se détruisent mutuellement, ces actions ne se manifestent que quand on donne, par l'aimantation, des directions déterminés à ces courants [34].

¹⁵ On sent naître le concept mathématique de vecteur.

2. 3 . Théorie d'Ampère sur l'interaction entre deux courants

Depuis Newton toutes les forces d'interaction sont construites par analogie avec la force de gravitation F qui s'exerce entre deux masses ponctuelles m_1 et m_2 , donc deux grandeurs physiques de même nature, distantes de r .

$$F = G \cdot m_1 m_2 / r^2$$

C'est le cas des forces de Coulomb en magnétisme :

$$F = K \cdot \mu_1 \mu_2 / r^2$$

μ_1 et μ_2 sont deux masses magnétiques élémentaires, et en électricité :

$$F = K' \cdot q_1 q_2 / r^2$$

q_1 et q_2 sont deux charges électriques ponctuelles.

Il s'agit, ici, d'une analogie formelle. Ces interactions présentent cependant une différence, la force de gravitation est purement attractive, alors que les deux autres peuvent être également répulsives.

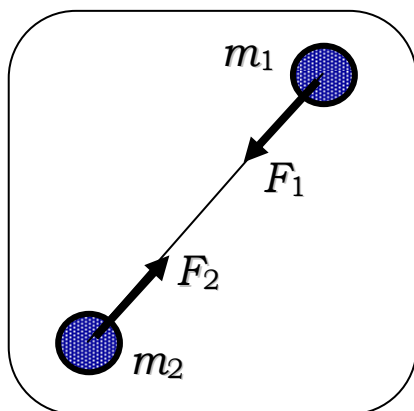


Figure II. 6. : Modèle newtonien

Néanmoins dans toutes ces interactions, la force, qui se manifeste,

- s'exerce sur des éléments de *même nature*
- agit *suivant la droite qui joint les deux points entre lesquelles elle s'exerce*,
- satisfait au principe de l'action et de la réaction.

Or l'expérience d'Oersted a montré que la force qui agit sur chaque pôle de la boussole n'est pas dirigée *suivant la droite qui joint les deux points entre lesquelles elle s'exerce*, mais suivant une direction orthogonale. En outre le principe de l'action et de la réaction n'est plus satisfait.

Ampère n'arrivait pas à admettre ces faits. Aussi a-t-il voulu expliquer les phénomènes électromagnétiques à partir d'une théorie basée sur une interaction analogue à celle de Newton, interaction entre deux éléments de même nature. A cet effet, dès la semaine qui suit l'annonce de la découverte d'Oersted, il émet l'hypothèse que le magnétisme est d'origine électrique.

Il procède, comme Coulomb, par analogie et considère l'interaction entre deux éléments de fils conducteurs ds_1 et ds_2 , parcourus par des courants électriques i_1 et i_2 , et distants de r . (Figure II. 7)

Comme dans la théorie de Newton, l'interaction d'Ampère doit être formulée par une expression où la force est proportionnelle à $i_1 ds_1$, $i_2 ds_2$ inversement proportionnelle à r^2 et est dirigée suivant la droite qui joint ds_1 et ds_2 . En outre cette interaction doit satisfaire au principe de l'action et de la réaction.

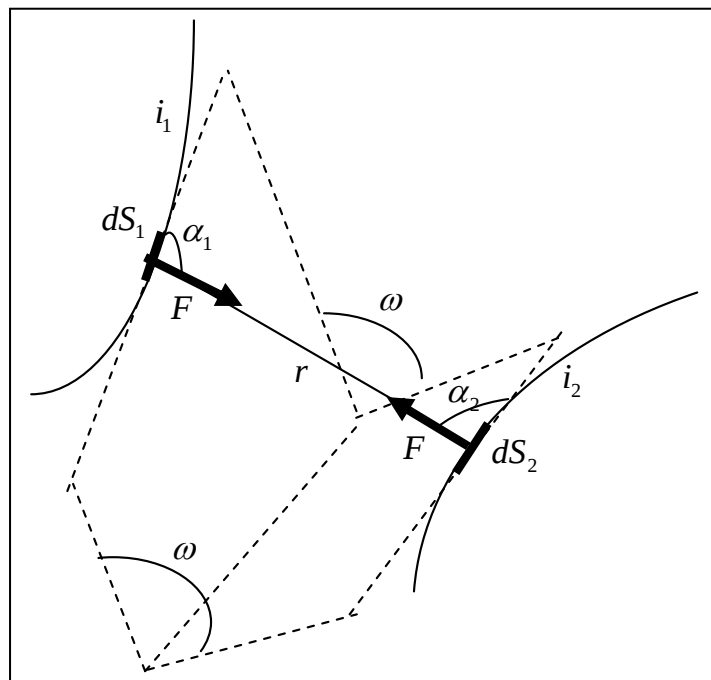


Figure II. 7 : Interaction entre deux courants électriques

Il établit sa formule à partir de quatre expériences basées sur une méthode de zéro¹⁶. Pour cela, il conçut et fit construire , souvent à ses frais¹⁷, des dispositifs expérimentaux dont la figure II.8 représente un exemple.

Ampère ne disposait, à cette époque, d'aucun appareil pour mesurer l'intensité d'un courant électrique. Il procédait de la façon suivante¹⁸ : Il compare le courant i à mesurer à un autre courant i_0 choisi arbitrairement comme unité de mesure. Il considère deux éléments égaux dans chacun de ces deux courants, puis il cherche à déterminer le rapport des actions qu'ils exercent à la même distance sur un même élément d'un troisième courant. Ce rapport exprime la mesure de i .

Tous les calculs sont détaillés dans l'ouvrage, publié en 1827, et intitulé “*Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience*”.[24]. Il obtient¹⁹ :

$$dF = \frac{i_1 i_2 ds_1 ds_2}{r^n} (\sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \sin \omega + k \cos \alpha_1 \cos \alpha_2)$$

$$\text{où } n = 2 \text{ et } k = -1/2$$

une formule analogue à celles de Newton et Coulomb, mais elle fait intervenir une fonction des angles α_1 , α_2 et ω , car les grandeurs $i_1 ds_1$ et $i_2 ds_2$ possèdent, en plus une direction et un sens.

Il retrouve en intégrant l'expression précédente :

- la formule de Biot et Savart concernant l'action d'un fil sur une aiguille aimanté
- et celle de Coulomb qui donne l'interaction entre deux masses magnétiques.

A chaque fois il remplace le pôle de l'aiguille ou la masse magnétique par des petits circuits électriques fermés.

¹⁶ Ref [24] page 182

¹⁷ Ref [25] Préface de Solovine page XII.

¹⁸ Ref [24] page 199

¹⁹ Ampère a mis près de cinq ans pour aboutir à ce résultat définitif comme le montrent les recherches de Christine Blondel [9].

Balance électrodynamique astatique utilisée par Ampère

Schéma du montage utilisé par Ampère (fin de l'ouvrage [24].)

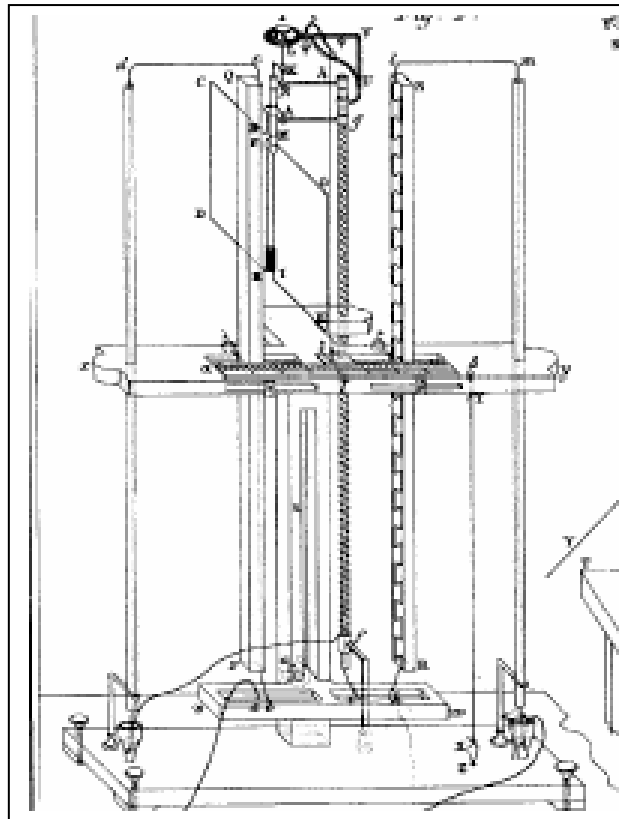
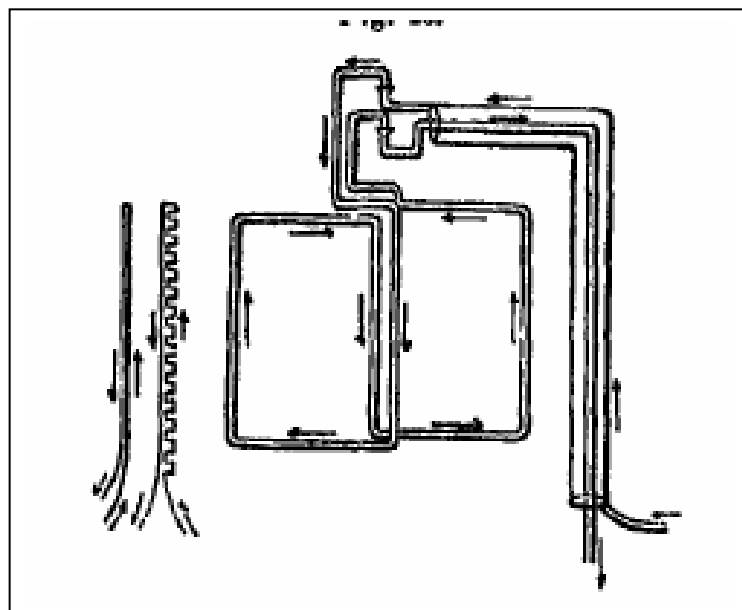


Schéma pédagogique présenté par Maxwell (page 187 tome II [7].)



Figures II. 8 : Equivalence des actions dues à deux conducteurs fixes dont l'un est rectiligne et l'autre plié en éléments ds (deuxième cas d'équilibre)

De plus il découvre la loi qui sera appelée par la suite “ *loi de Laplace*”. Il trouve l’expression de la force élémentaire dF exercée par un aimant, représenté par un circuit fermé parcouru par un courant électrique i' , sur un élément $i ds$ ²⁰ :

$$dF = \left(\frac{1}{2} D i' \right) \cdot i \cdot ds \cdot \sin \varepsilon$$

ε est l’angle formé par l’élément ds et la directrice D . Ampère introduit une nouvelle grandeur D , qu’il appelle directrice et qui n’est autre que la direction du “ *champ magnétique* ”.

2. 5 . Critiques des idées d'Ampère.

Les idées d’Ampère furent accueillies avec beaucoup de scepticisme par de nombreux savants dont Laplace, Davy, Biot, Berzelius, Faraday et bien d’autres.

En 1821 Davy envoie une lettre à Ampère pour lui dire que ses propres observations l’ont conduit “ *à douter de l’identité de l’électricité et du magnétisme*”²¹. En ce qui concerne Laplace, Ampère pense que ce dernier s’est opposé à “ *l’identité de l’électricité et du magnétisme parce que cela dérangeait sa manière de considérer les choses*”.²²

Certains savants ont, en effet, rejeté les hypothèses d’Ampère parce qu’elles ne cadraient pas avec leurs propres idées. Leurs façons d’interpréter l’expérience d’Oersted sont complètement opposées à celle d’Ampère. Biot et Berzelius pensent, comme de nombreux physiciens, que c’est le passage du courant électrique à travers le fil qui le rend temporairement magnétique.

Dans une lettre adressée à un ami suisse, Ampère écrit : “ *On résiste tant qu’on peut à changer les idées auxquelles on s’est accoutumé. C’est drôle à voir les efforts que font certains esprits pour tâcher de faire accorder, avec les*

²⁰ Ref. .[24] page 215

²¹ Lettre de Davy à Ampère 10 février 1821 Ref .[35] tome II page 564

²² Lettre d’Ampère à Davy 1825 Ref .[35] tome II page 679 .

nouveaux faits, l'hypothèse gratuite de deux fluides magnétiques parce qu'on y a accoutumé son esprit " ²³

D'autres sont surpris par la rapidité avec laquelle Ampère a construit sa théorie. Une semaine après l'annonce de la découverte d'Oersted, il expose, à l'Académie, les éléments de base de sa théorie sur l'origine du magnétisme.

On lui reproche d'avoir basé ses concepts, les courants circulaires par exemple, sur des hypothèses qu'aucune expérience n'avait pu mettre en évidence. On retrouvera la même situation à la fin du siècle, lorsque Boltzmann, partisan de l'atomistique, fut l'objet de violentes attaques de la part des empiristes et des énergétistes qui niaient l'existence réelle de l'atome qu'aucune expérience n'avait réussi à prouver.

D'un autre côté, la théorie d'Ampère repose sur de longs calculs mathématiques qui ont dû présenter beaucoup de difficultés à ses lecteurs, ce qui explique l'hostilité et les critiques sévères qu'il reçut comme le montre la lettre de son ami le Baron Maurice. En juillet 1822, soit deux ans après sa première communication sur le sujet, ce dernier lui écrit ²⁴ pour lui dire qu'il a reçu une lettre d'une " *personne qui s'occupe de science* " et qui dit :

" Ce n'est pas tant la contention d'esprit nécessaire pour saisir les actions des courants qui me répugne dans cette théorie que le grand nombre d'hypothèses toutes gratuites, l'abus de la considération des infiniment petits avec lesquels on peut dire tout ce qu'on veut, et le mélange de certaines idées dynamiques dont l'introduction n'est pas suffisamment motivées ni l'influence nettement caractérisée.....On ne peut nier que tout ce qu'a fait M. Ampère ne soit très ingénieux, mais j'ai à peine à croire que cela ne tienne longtemps tel quel, et il faudra vivement regretter cette théorie si elle tombe, car toutes les autres, celles des Allemands surtout, sont d'une effrayante complication".

²³ Lettre à M. Roux-Bordier du 21 Fév. 1821, Ref. [35] tome II page 566.

²⁴ Lettre du baron Maurice à Ampère du 5 juillet 1822, Ref. [35] tome III, page 924 .

Il ajoute qu'il a transcrit ce passage pour lui montrer comment ses idées sont jugées par ceux qui ne le connaissent pas et qui "*forment pourtant, à la longue, le tribunal de tout auteur*".

Biot et Ampère.

En 1820, Biot et Ampère sont deux savants de la même génération, tous les deux sont célèbres et enseignent à l'Université. De plus ils sont en compétition [9] pour trouver une formulation mathématique au phénomène découvert par Oersted.

Biot explique, d'une manière différente de celle d'Ampère, le phénomène électromagnétique. Il ne ramène pas l'interaction entre un courant électrique et d'un aimant à celle de deux courants phénomène inconnu pour lequel Ampère a été contraint d'élaborer une théorie nouvelle. Il préfère ramener "*l'inconnu au connu*", il suppose que le passage du courant électrique, à travers le fil conducteur, le rend temporairement magnétique et considère une interaction entre aimants. Il cherche alors à trouver une répartition adéquate de molécules magnétiques à travers le fil. Ainsi il écrit à la page 769 de la 3^{ème} édition de son traité de physique expérimentale tome II [36]

"Si l'on calcule l'action qu'exercerait à distance une aiguille aimantée d'une longueur infiniment petite et presque moléculaire, on verra aisément, que l'on peut former des assemblages de telles aiguilles qui exerceraient des forces transversales."

Pour le calcul de la force qu'exerce les deux pôles de l'aiguille sur la molécule magnétique placée en M, si on applique la formule de Coulomb on obtient bien une force transversale, mais comme le fait remarquer Ampère: "*il est aisé de voir que la force qui en résulte est en raison inverse du cube et non pas du carré de la distance, comme M. Biot a trouvé lui même qu'est celle de l'élément du fil.*"²⁵

Il est facile de retrouver ce résultat en appliquant la loi de Coulomb en considérant des dipôles magnétiques.

²⁵ Ampère : [24] page 360

Faraday et Ampère .

En 1820 Ampère a 45 ans, il est célèbre dans toute l'Europe et maîtrise parfaitement les mathématiques de son époque. Il est très ingénieux, ce qui lui a permis de concevoir et de faire construire de nombreux dispositifs expérimentaux qui lui ont permis de vérifier sa théorie.

Faraday est plus jeune, il a 29 ans, c'est un autodidacte, ancien apprenti relieur, qui a appris la physique et la chimie auprès de Davy. Ses connaissances en mathématiques sont rudimentaires, mais c'est un expérimentateur exceptionnel. De plus il possède un sens inné pour comprendre et interpréter les phénomènes observés.

Ampère admet l'interaction à distance et a élaboré, dans le domaine de l'électromagnétisme, une théorie en procédant par analogie avec la théorie newtonienne comme l'ont fait Coulomb et Poisson en électrostatique et magnétostatique. De nombreux physiciens du XIX^{ème} siècle, Gauss, Weber, Newmann, Riemann et bien d'autres adopteront cette démarche.

Faraday n'a aucune idée préconçue : adepte des idées du philosophe Francis Bacon [31], il procède par induction. Seule l'expérience doit lui permettre de découvrir les lois de la nature.

A la suite de son expérience, Oersted écrit : *“ Le conflit n'est pas circonscrit au fil conducteur, mais il a autour de lui une sphère d'activité assez étendue, il forme un tourbillon autour du fil ”* [29]. Faraday préfère cette explication d'Oersted à celle d'Ampère, parce qu'elle cadre mieux avec sa vision des forces d'interaction, vision qui l'amènera plus tard à introduire une action qui se propage de proche en proche à travers l'espace et qui conduira au concept de champ.

Le jeune Faraday n'a pas hésité à écrire au “grand ” Ampère pour lui faire part de ses remarques [35] tout en reconnaissant ses capacités limitées en mathématiques et en se présentant comme un élève qui s'adresse au maître. Ampère a tenu compte, comme nous allons le voir, de certaines critiques de Faraday .

Concept de courant électrique.

Faraday écrit²⁶ : “ *Ampère has chosen always to refer to the currents in the wire, and in fact founds his theory upon their existence, it became necessary that a current should be described* ”

Ampère adopte, pour l'électricité, la théorie des deux fluides rejetée par Faraday, mais elle ne constitue pas la base sur laquelle il fonde sa théorie du magnétisme : ce phénomène est dû à la circulation de courants électriques autour des molécules. Néanmoins le concept de courant électrique, qu'il introduit, peut se passer d'une théorie sur la nature même de l'électricité et être considéré “ tel quel ” . C'est la raison pour laquelle le courant électrique a survécu à la théorie des deux fluides et constitue, de nos jours l'un des concepts de base de l'électrocinétique et de l'électromagnétisme.

Ampère a parfaitement défini le sens dans lequel ce courant parcourt le circuit électrique (pile et conducteurs) et étudié ses actions sur les aimants et sur d'autres courants.

Courants ampériens et courants voltaïques.

Selon Faraday les courants circulaires, responsables du magnétisme, ne produisent pas les mêmes effets que les courants voltaïques débités par la pile à travers le circuit extérieur: effets chimiques effets de tension.[33].

Ampère répond : *Il faudrait, pour produire des effets chimiques ou effets de tension pouvoir interrompre par des liquides dans le premier cas et par des substances isolantes dans le second, les courants établis dans l'aimant ou exciter, dans d'autres corps, par influence ces mêmes courants. Le premier moyen est impossible. M. Ampère a constaté l'impossibilité du second* ” En effet, les phénomènes d'induction, qui seront découverts par Faraday en 1831, ne peuvent se produire avec des courants continus [34] (Remarque N°12). Ampère ne renoncera jamais à cette idée basée sur l'existence de courants électriques dans les aimants.

²⁶ Faraday: historical sketch of electro magnetism: Ann. Phil. 18, page 112, 1821 [37]

Solénoïde & cylindre creux

Faraday signale une différence notable [33] entre un aimant cylindrique creux et un solénoïde parcouru par un courant électrique : Une aiguille aimantée, placée à l'intérieur de l'aimant creux n'est pas déviée alors que le solénoïde exerce une action sur la boussole.

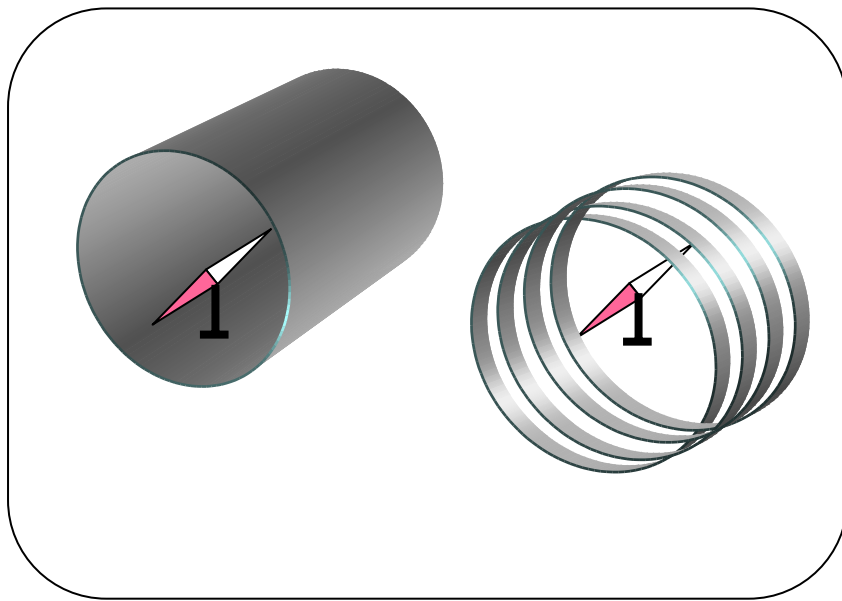


Figure II. 9 : Aimant creux et solénoïde

Ampère répond [34] : *Quand on suppose les courants dans l'aimant autour de son axe, l'analogie du cylindre creux, avec l'hélice devrait être complète ; mais si l'on admet, comme l'a fait M. Ampère dans un mémoire lu à l'Institut en janvier 1821, que ces courants sont établis autour des particules des aimants, hypothèse qu'il annonçait dans ce mémoire comme lui paraissant la plus probable, l'aiguille aimantée dans l'intérieur du cylindre creux se trouve toujours en dehors des courants, tandis que dans l'hélice elle leur est intérieure, ce qui doit produire les différences d'action qu'a remarquées M. Faraday.* [34]
(Remarque N°11) .

Solénoïde & barreau aimanté

L'analogie entre un barreau aimanté et un solénoïde n'est pas parfaite. Faraday a fait remarquer à Ampère que les pôles de l'aimant sont situés plus près du milieu de l'aimant que de ses extrémités, tandis que dans le cas du solénoïde, ces pôles sont exactement placés aux extrémités. [33]

Ampère explique cette différence en écrivant " *M. Ampère après avoir conclu de ses nouvelles expériences, que les courants électriques d'un aimant existent autour de chacune des particules, il lui a été aisé de voir qu'il n'est pas nécessaire de supposer, comme il l'avait fait d'abord, que les plans de ces courants sont partout perpendiculaires à l'axe de l'aimant ; leur action mutuelle doit tendre à donner à ces plan une situation inclinée à l'axe, surtout vers ses extrémités, en sorte que les pôles, au lieu d'y être exactement situés, doivent se rapprocher du milieu de l'aimant.*" [34] (Remarque N°10) .

Action à distance et action révolutive

L'expérience d'Oersted a mis en évidence une force transversale, différente des forces connues jusqu'à ce jour. Pour Faraday, il faut accepter la nature de cette force. Ampère, comme Coulomb, veut une théorie analogue à celle de Newton. Cette analogie lui permet d'aboutir à une formule générale à partir de laquelle il peut déduire toutes les lois de l'électromagnétisme. Il écrit à Faraday " *Nous nous bornerons à remarquer que toutes les actions qui produisent les autres phénomènes découverts à ce jour, ont lieu entre deux points suivant la ligne qui les joint, comme les attractions et répulsions admises par M. Ampère entre deux petites portions de courants électriques, et dont peut déduire si facilement tous les faits électromagnétiques, y compris ceux dont M. Faraday vient d'enrichir la science, en sorte qu'en adoptant la théorie de M. Ampère, ces faits rentrent dans les lois générales de la physique, et qu'on est pas obligé d'admettre comme fait simple et primitif une action révolutive dont la nature n'offre aucun autre exemple, et qu'il nous paraît difficile de considérer comme tel.*" [34]

Ces échanges de points de vue entre Ampère et Faraday ont permis à ces deux grands savants de mieux comprendre ce nouveau phénomène et de construire les fondements de l'électromagnétisme.

2. 5 . Les modes de raisonnement utilisés par Ampère.

Dans une lettre, qu'il a envoyée en août 1821 à son collègue Van der Eyk²⁷ Ampère écrit : *" Toute explication dans les sciences consiste à découvrir un fait primitif exprimé par une loi générale et qui, une fois posé, serve à en déduire toutes les autres"* . Le fait primitif, dans le raisonnement d'Ampère, consiste en une hypothèse qui préconise que le magnétisme est d'origine électrique. Celle ci est basée sur l'analogie entre un barreau aimanté et un solénoïde. Ensuite il a cherché à exprimer l'interaction entre deux éléments de courants électriques par une formule générale à partir de laquelle il se propose de déduire toutes les lois de l'électromagnétisme. Pour cela, il procède là encore par analogie pour arriver à une formule analogue à celle de la gravitation de Newton.

Dans une première étape, il suppose que cette interaction doit être inversement proportionnelle au carré de la distance qui sépare les deux éléments. Il procède par analogie comme l'a fait Coulomb. Ensuite il propose une formule analogue mais où la force est inversement proportionnelle à r^n . Les calculs donnent une relation entre k et n , la quatrième expérience lui donne $n = 2$ et $k = -1/2$. Les quatre expériences vont lui permettre de vérifier ces deux hypothèses et lui donner la forme de la fonction qui fait intervenir les angles α_1 , α_2 et ω et la constante k .

Ampère a utilisé un raisonnement hypothético-déductif. L'hypothèse, sur laquelle est basée sa théorie, est suggérée par une analogie. Il s'agit, ici, d'une analogie fonctionnelle : l'aimant et le solénoïde créent des forces similaires. Cette analogie suggère à Ampère une analogie substantielle. Dans le cas du solénoïde la force magnétique est créée par des courants électriques qui parcourent des circuits circulaires, par conséquent, dans

²⁷ Lettre à Speyer Van der Eyk du 15 août 1821, Ref. [35], tome II, page 570.

l'aimant cette force est due à la même cause. Cette hypothèse est affinée à la suite d'observations, de découvertes et des remarques faites par d'autres scientifiques, en particulier Faraday. *“ On trouve une différence entre les aimants et les hélices. Faut-il dire les aimants ne doivent pas leur action à des courants électriques. Non, mais il faut dire : ces courants sont inclinés sur l'axe des aimants... Voilà, je le répète, la marche à suivre dans les sciences où chacun peut perfectionner ce qu'ont fait les autres. Jusque là il n'y a pas d'hypothèses, mais des analogies données par un grand nombre de faits²⁸”*.

L'expression à laquelle il aboutit sert de principe de base à partir duquel, en procédant par déduction on peut découvrir ou redécouvrir les lois de l'électromagnétisme. Elle joue le rôle d'un postulat, que l'on ne peut pas démontrer, mais auquel on aboutit, dans ce type de raisonnement, soit par induction soit par analogie.

Mais le raisonnement par analogie l'empêche d'étudier la force qui s'exerce sur l'aiguille aimantée dans l'expérience d'Oersted, force qui ne cadre pas avec le modèle newtonien qu'il a adopté et qu'il peut déduire, par le calcul, à partir de sa théorie. Il refuse à cette force le statut de *“ fait simple et primitif ”*. Ce raisonnement l'empêche de considérer l'action révolutionnaire de cette force qui permettra à Faraday de découvrir, en 1821, des phénomènes [52] dont la roue de Barlow constitue une application et qui donneront naissance au milieu du XIX^{ème} siècle au moteur à Courant continu.

Les critiques, parfois sévères, soulevées par l'hypothèse d'Ampère font penser à celles que reçut Argand lorsqu'il découvrit la représentation géométrique des nombres complexes à partir d'une simple analogie²⁹. On voit combien la réponse apportée à ces critiques par J.D. Gergonne convient parfaitement aux découvertes d'Ampère *“ l'homme les aperçoit par une sorte d'instinct, bien longtemps avant d'être en état de les démontrer en rigueur.”* Son hypothèse des *“ courants moléculaires”* fut le résultat d'un éclair de génie avant d'être justifiée par un raisonnement basé sur la déduction.

²⁸ Lettre ampère à de la Rive du 12 juin 1822 Ref. [35], tome II, page 580 .

²⁹ Voir , chapitre I pages 16 à 20.

3 . *Théorie de Weber (1852)*

3. 1. Hypothèses de Weber

En 1852 Weber propose, dans un article [41] publié aux “Annalen der Physik”, une théorie des matériaux diamagnétiques et “magnétiques”.

A cette époque Weber ne dispose pas encore du calcul vectoriel. Hamilton vient d’introduire la théorie des quaternions mais elle ne sera utilisée par les physiciens, Tait et Maxwell en particulier , qu’une dizaine d’année plus tard. Cependant la règle du parallélogramme était appliquée aux forces et aux vitesses depuis Newton³⁰, on savait par conséquent additionner et décomposer des forces . Mais le concept de vecteur en tant qu’être mathématique n’existait pas. La théorie des quaternions a introduit le produit scalaire et le produit vectoriel.

Le concept de molécule est encore assez vague, le congrès de Karlsruhe n’aura lieu qu’ en 1860.

En magnétisme, Faraday [42] avait noté une différence entre les matériaux paramagnétiques et les matériaux diamagnétiques. Ces derniers présentent un comportement particulier, l’application d’une force magnétisante (champ magnétique) induit, dans le matériau des moments dont le sens est opposé à celui de la force qui les crée. En ce qui concerne ces matériaux diamagnétiques, Weber pense que , dans le cas de l’hypothèse des courants moléculaires , ces courants devraient circuler dans le sens inverse de celui prévu par Ampère dans le cas des milieux “magnétiques”.

Lorsqu’il aborde les milieux “magnétiques” ³¹ , il commence par rejeter l’hypothèse des fluides magnétiques, adoptée par Poisson, car elle entraînerait, comme pour le diamagnétisme, un moment magnétique induit proportionnel à la force magnétisante (Scheidungskraft). Or des expériences effectuées par Muller en 1850 [43] ont mis en évidence l’existence d’une aimantation à saturation . Il opte alors pour l’hypothèse d’Ampère, la

³⁰ Ref [16] et [18] du chapitre I

³¹ Ref [41] pages 165 à 168. On ne faisait aucune distinction entre paramagnétisme et ferromagnétisme.

circulation des courants moléculaires crée des moments magnétiques permanents qui peuvent tourner sous l'action de la force magnétisante.

Il considère, alors, un milieu contenant des molécules aimantées (eisenmolecules), c'est à dire des aimants microscopiques qui prennent toutes les orientations possibles en l'absence d'une force magnétisante. Le milieu est alors globalement neutre. Sous l'action d'une force magnétique, ces petits aimants vont prendre une direction privilégiée celle de la force magnétisante. Lorsqu'ils auront tous cette direction le matériau présentera une aimantation maximale et sera saturé. Ainsi la théorie de Weber explique les résultats expérimentaux de Muller [43].

Selon Weber, le fait que, dans le cas du fer doux, le magnétisme qui est créé par la force magnétisante, disparaît aussi tôt que cette force cesse d'agir prouve que les moments magnétiques, dont l'orientation crée le magnétisme, sont soumis à une "force de rappel" (zurücktreibende Kraft) qui tend à les ramener à leur position initiale. Weber explique l'origine de cette force par une interaction des moments magnétiques. Ainsi chaque aimant microscopique sera soumis à l'action de ces deux forces et prendra, à l'équilibre, la direction de leur résultante.

Les calculs de Weber sont repris par Maxwell qui trouve un résultat légèrement différent, c'est la méthode de Maxwell ¹ que nous allons exposer dans ce qui suit.

III. 2. Courbe d'aimantation

On appelle μ le moment magnétique d'une molécule et n leur nombre par unité de volume. Comme elles sont orientées au hasard les extrémités des moments se placent, dans un plan, sur un cercle. Le nombre dn de moments faisant un angle α avec une direction ox est :

$$dn = n/2 \sin \alpha d\alpha$$

¹ Ref [7] tome II. pages 86 à 91

On applique, dans la direction ox , une force magnétisante X représentée par SO sur les figures II. 10 et II.11. Si toutes les molécules prenaient cette direction le moment magnétique total serait :

$$M = n \mu$$

C'est sa valeur limite.

Dans le modèle de Weber chaque moment μ est, soumis en plus de X , à une force D , représentée par OP , qui tend à le ramener à sa position initiale qui est celle de D . La force X en agissant sur μ crée un couple

$$\mu X \sin \theta$$

et D

$$\mu D \sin \beta$$

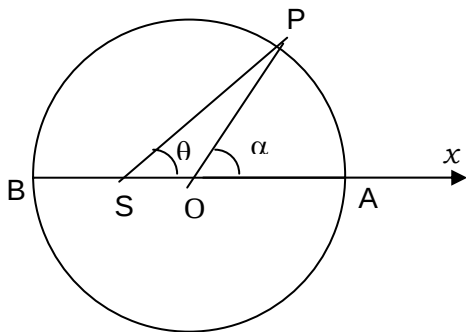


Figure II. 10. Cas où la force magnétisante $X = SO$ est inférieure à la force de rappel $D = OP$

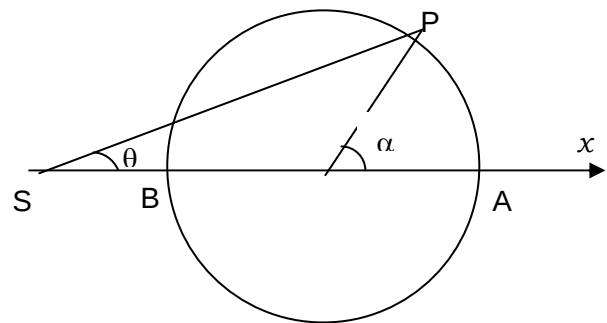


Figure II. 11. Cas où la force magnétisante $X = SO$ est supérieure à la force de rappel $D = OP$

A l'équilibre

$$\mu X \sin \theta = \mu D \sin \beta$$

où

$$\beta = \alpha - \theta$$

est l'angle de déviation du moment magnétique, il est représenté, sur la figure, par SPO. Chaque moment μ contribue à l'aimantation par sa composante le long de l'axe ox par :

$$\mu_x = \mu \cos \theta$$

et les dn moments compris entre α et $\alpha + d\alpha$ par :

$$dJ = dn \mu_x = n/2 \mu \cos \theta \sin \alpha d\alpha$$

où θ est une fonction de α . Cette expression doit être intégrée entre $\alpha = 0$ et $\alpha = \pi$

Maxwell simplifie les calculs en effectuant un changement de variables et exprime les angles θ et α en fonction de la résultante R des forces X et D . Il obtient :

$$dJ = (n/2 \mu) (1/2 X^2 D) (R^2 + X^2 - 3 D^2) dR$$

Il intègre cette expression en faisant varier R de $(D + X)$ à $(D - X)$, lorsque la force X est inférieure à D (figure II. 10.) et de $(D - X)$ à $(D + X)$, lorsque X est supérieure à D (figure II. 11.)

Après intégration Maxwell obtient :

$$1^\circ) \text{ lorsque } X < D \quad J = 2/3 . n \mu X/D$$

$$2^\circ) \text{ lorsque } X = D \quad J = 2/3 . n \mu$$

$$3^\circ) \text{ lorsque } X > D \quad J = .n \mu (1 - D^2/3X^2)$$

$$4^\circ) \text{ lorsque } X \rightarrow \infty \quad J = n \mu$$

Weber avait trouvé :

$$J = n\mu \frac{X}{\sqrt{X^2 + D^2}} \cdot \frac{X^4 + (7/6.)X^2.D^2 + (2/3)D^4}{X^4 + X^2.D^2 + D^4}$$

Les courbes qui donnent l'intensité d'aimantation J en fonction de la force magnétisante X obtenues par Weber et Maxwell sont pratiquement confondues. (figure II. 12.)

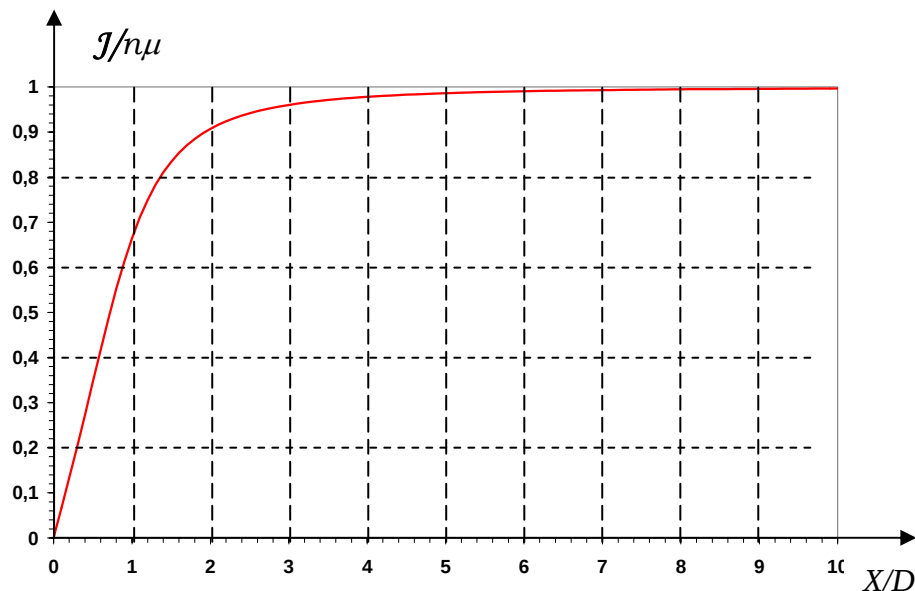


Figure II. 12. Courbe d'aimantation d'un matériau paramagnétique selon la théorie de Weber

Cette figure montre une variation linéaire de l'aimantation tant que la force magnétisante X reste inférieure à la force D , puis l'aimantation du matériau tend vers la saturation à mesure que X augmente. Le calcul de Maxwell fait apparaître une discontinuité dans la courbe d'aimantation, lorsque $X = D$. Ce dernier pense qu'une théorie où la force D n'aurait plus la même valeur pour toutes les molécules éviterait cette discontinuité.

4 . Influence de la température sur le magnétisme

4. 1. Thèse de Pierre Curie (1895).

Pierre Curie se propose, dans sa thèse [44] , de poursuivre les travaux expérimentaux en magnétisme de Faraday, Becquerel, Rowland, Hopkinson, et d'étudier l'effet de la température sur les propriétés magnétiques des matériaux. Il entreprend une série d'expériences sur de nombreux corps magnétiques et découvre une loi qui porte son nom.

Biot, dans l' édition de 1816 de son traité élémentaire de physique [45], expose un travail inédit de Coulomb sur l'influence de la température sur le développement du magnétisme. Coulomb a cherché à *“déterminer la progression suivant laquelle le développement du magnétisme se détruit à mesure que la température s'élève”*¹ . Pour cela il a effectué des mesures à l'aide d'un pendule magnétique. La température, à partir de laquelle le barreau d'acier commençait à perdre ses propriétés magnétiques, se situe autour de 700° du *“ thermomètre de Réaumur”*¹ .

4. 1. 1 . Principe :

En 1895 les lois de l'électromagnétisme étaient bien établies et écrites, pour la première fois, sous forme vectorielle par Heaviside et Hertz. Maxwell avait utilisé, dans son *“ traité d'électricité et de magnétisme”* [7] le formalisme des quaternions introduit par Hamilton en 1852.

L'énergie d'un corps aimanté, de moment magnétique $\mathbf{M}$, placé dans un champ magnétique $\mathbf{H}$ est :

$$W = - \mathbf{M} \cdot \mathbf{H} \quad (\text{C.G.S}) \quad (4.1)$$

Si le champ n'est pas homogène et s'il varie le long de l'axe ox (fig. II.13), le

¹ Biot [45] page 106.

corps est soumis à une force dont la composante le long de ox est :

$$F_x = - \delta W / \delta x = M . \delta H / \delta x \quad (\text{C.G.S}) \quad (4. 2)$$

En introduisant le vecteur aimantation J tel que $dM = J dV$, où V est le volume de l'échantillon, on a :

$$F_x = J . V . \delta H / \delta x \quad (4. 3)$$

Sachant que :

$$J = \chi . H. \quad (4. 4)$$

où χ est la susceptibilité ² magnétique du matériau il vient :

$$F_x = V . \chi . H . \delta H / \delta x \quad (4. 5)$$

Ces expressions peuvent être trouvées dans le cours de Maxwell [7] . Elles sont écrites dans les anciens systèmes d'unités, utilisés à la fin du XIX^{ième} siècle.

Ces anciens systèmes ont introduit une confusion entre les grandeurs H et B , confusion qui a amené Langevin à écrire un article³ en 1921 , un demi siècle plus tard Herpin [12] revient sur ce problème.

Le système MKSA rationalisé , proposé Giorgi dès 1901, n'a été adopté que vers le milieu du XX^{ième} siècle. Dans ce système les équations (4.1) et (4.2) s'écrivent :

$$W = - \mathbf{M.B} \quad (\text{M.K.S.A}) \quad \text{et} \quad F_x = M . \delta B / \delta x$$

4. 1. 2. L'outil expérimental :

Curie disposait d'appareils , qui ont été mis au point et perfectionnés durant tout le XIX^{ième} siècle, et qui lui ont permis, comme nous allons le voir, d'effectuer des mesures d'une grande précision.

² Le terme susceptibilité magnétique a été introduit par J. Neumann (Cf Maxwell [7])

³ Paul Langevin 'Sur les grandeurs champ et induction ' Bull. Soc. Fr. de Phys. 162 p. 3. 1921

Les Galvanomètres :

Curie a utilisé deux galvanomètres d'Arsonval, le premier, monté en ampère-mètre pour mesurer le courant qui alimente l'électroaimant et le second relié à un thermocouple pour relever les températures. Il a mesuré les flux magnétiques avec un galvanomètre balistique mis au point par W. Thomson.

Les Thermocouples :

L'effet Seebeck, sur le principe duquel est basée la construction des thermocouples, a été découvert en 1821. Le physicien allemand Seebeck a remarqué qu'une aiguille aimantée, placée à l'intérieur d'une boucle constituée de deux fils métalliques de natures différentes⁴ déviait lorsque les deux jonctions étaient portées à des températures différentes. Seebeck donna une interprétation erronée à sa découverte, il pensait que la différence de température entraînait l'aimantation des métaux et donna à ce phénomène le nom de thermomagnétisme. Celui-ci lui permit d'expliquer l'existence du champ magnétique terrestre. C'est ainsi qu'il présenta ses travaux à l'académie de Prusse en 1823 sous le titre de "*Magnetische polarisation der metalle und erze durch temperature difference*"⁵. L'effet Seebeck n'a pu être expliqué que par la mécanique quantique au milieu du XX^{ème} siècle.

Les sources de courants :

Curie disposait également de sources de courants stables: L'accumulateur électrique a été inventé en 1859 par Gaston Planté, et les piles Daniell étaient très précises et stables.

Balance de torsion

Inventée par Coulomb depuis plus d'un siècle (1777), la balance de torsion lui avait permis d'établir les lois empiriques d'interaction entre deux corps électrisés puis entre deux corps aimantés : lois de Coulomb

Ce dispositif a, depuis, servi à de nombreux savants notamment à Biot et Savart en 1820 pour énoncer la loi empirique qui porte leurs noms. Elle a été, depuis, utilisée par de nombreux physiciens dont Faraday et Curie. Ces derniers ont apporté des modifications et l'ont adaptée à leurs besoins.

⁴ Seebeck a utilisé des fils de cuivre et de bismuth

⁵ Aimantation des métaux et de la Terre sous l'effet d'une différence de température.

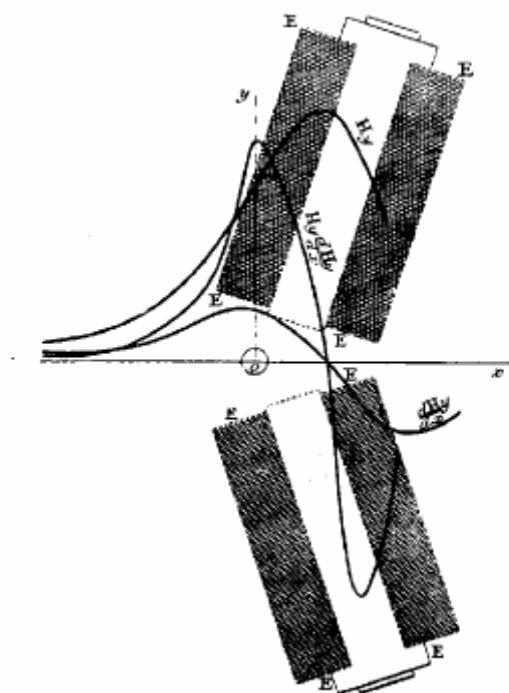


Figure II.13

Schéma de l'électroaimant

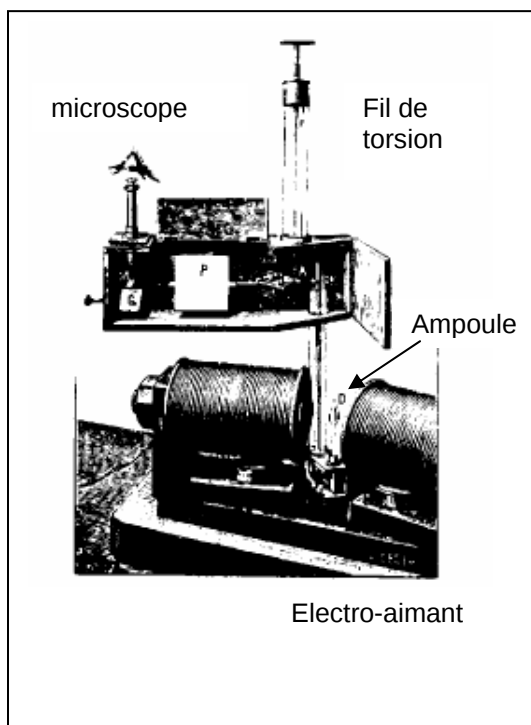


Fig. II. 14

Dispositif expérimental

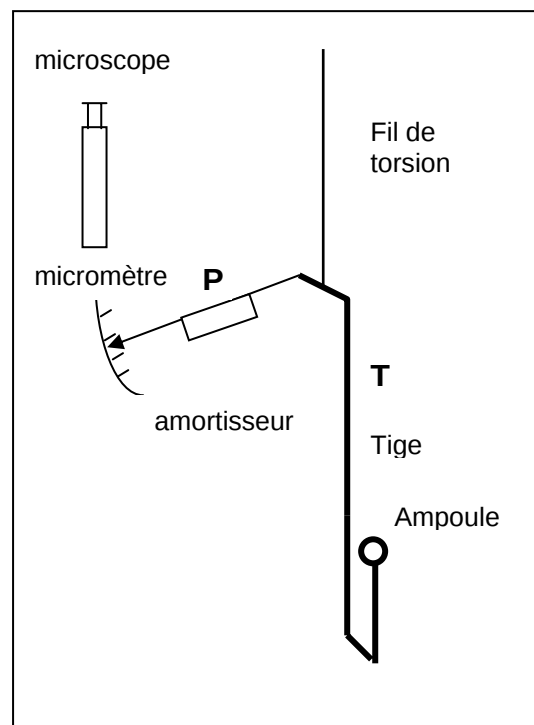


Fig. II. 15

Balance de torsion

IV. 1. 2. Le dispositif expérimental :

Pierre Curie utilise, pour mesurer l'aimantation d'un matériau, une méthode similaire à celle employée par Faraday et Becquerel.

Une ampoule en verre, en porcelaine ou en platine est remplie du corps à étudier, celui-ci est réduit en petits fragments . L'ampoule est placée dans un " champ magnétique" H non uniforme, créé par un électro aimant de Faraday (fig . II.13) . Ce dernier est disposé de façon que H ait la direction oy en tout point de l'axe ox .Les trois courbes, portées sur la figure II.13, représentent respectivement les variations, en fonction de x , de H , $\delta H/\delta x$ et $H.\delta H/\delta x$.

L'ampoule et le matériau qu'elle contient sont soumis à une force dirigée suivant ox . Celle ci est proportionnelle, dans le cas des corps diamagnétiques et paramagnétiques, au produit $H. \delta H/\delta x$ (4. 5). La figure II. 13 montre que cette force passe par un maximum qui correspond au point d'inflexion de la courbe $H(x)$.

Curie a construit une balance adaptée à son dispositif expérimental (figures II. 14 & II. 15)

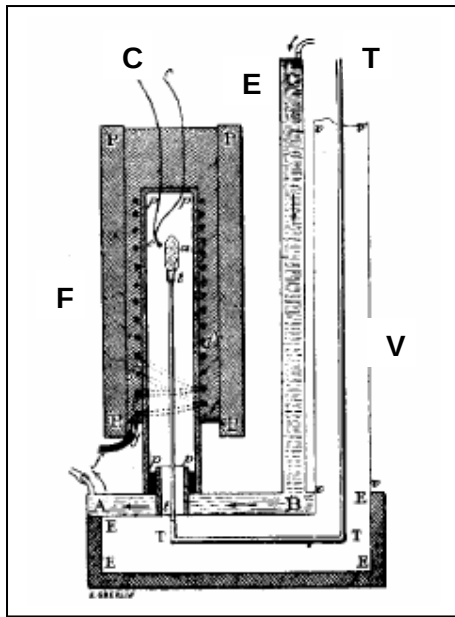
L'ampoule contenant le matériau est introduite (figure II. 16) dans un four chauffé par effet Joule. Un écran à circulation d'eau isole le four de l'électro aimant et du dispositif de mesure de l 'angle de torsion.

La figure II. 14 représente le dispositif expérimental lorsqu'on a enlevé le four. Nous avons schématisé, sur la figure II.15, la balance de torsion utilisée par Curie

.

IV. 1. 3. Mesures.

Le "champ magnétique" H est mesuré par la méthode de Weber à l'aide d'une bobine plate reliée à un galvanomètre balistique. La bobine, placée



- C : Couple thermo électrique
- F : Four électrique
- E : Ecran à circulation d'eau
- T : Tige de la balance de torsion
- V : Enceinte en verre

Figure II. 16

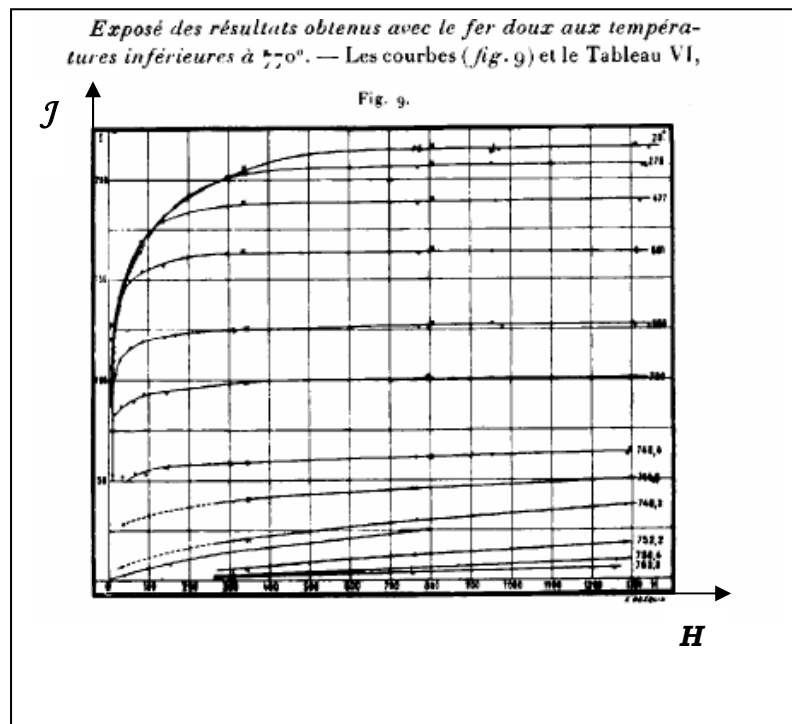


Figure II. 17

N.B. Les figures 13, 14, 16 et 17 sont extraites de la thèse de Pierre Curie [44]

perpendiculairement aux lignes de champ est brusquement retournée face pour face. La déviation de l'aiguille du galvanomètre balistique est proportionnelle à la variation du flux magnétique, dans l'air, embrassé par les spires donc au "champ magnétique" H . Le galvanomètre balistique a été préalablement étalonné. Cette méthode montre que c'est le champ B qui est mesuré et non pas H . Mais, dans le vide ces deux grandeurs sont proportionnelles.

L'aimantation J du corps étudié est calculée à partir de la force F que subit l'échantillon et de la mesure de $\delta H / \delta x$, comme le montre l'expression 4.3 et la susceptibilité magnétique χ est obtenue à partir de 4.4. La force F est mesurée à l'aide d'une balance de torsion mise au point par Curie (figures II.14 & II.15). L'ampoule est placée au point O , où la force est maximale. Le déplacement, le long de ox , de l'échantillon sous l'effet de la variation de H , entraîne un couple qui est équilibré par la torsion du fil. La déviation de l'aiguille de la balance de torsion est lue, à l'équilibre, sur un micromètre.

La dérivée du champ $\delta H / \delta x$ est calculée à partir de la variation du flux $\Delta \Phi$ qui traverse une bobine lorsqu'elle subit un brusque déplacement Δx le long de ox .

La température θ est relevée à l'aide d'un couple thermoélectrique (platine – platine iridié) de Le Chatelier.

Au cours de ses expériences Curie a fait varier la température de l'ambiante jusqu'à 1370°C. et le champ magnétique H de 0 à 1350 Unités c g s⁶

IV. 1. 4. Résultats :

Les expériences de Curie ont porté sur de nombreux corps :

Diamagnétiques : eau, sel gemme, chlorure de potassium, sulfate de potasse, quartz, soufre, sélénium, tellure, iode, phosphore, antimoine et bismuth

Paramagnétiques⁷: oxygène, palladium, sulfate de fer

⁶ L'oersted et le gauss ont été introduits, par la C.E.I en 1930

Ferromagnétiques : fer, fonte, nickel, magnétite.

Ces expériences ont confirmé l'aimantation à saturation des corps magnétiques, déjà mise en évidence par Muller [43] et dont s'est servi Weber pour élaborer sa théorie (§ .3)

D'un autre côté, les corps diamagnétiques ont un comportement différent de celui des deux autres. Leur susceptibilité magnétique ne varie pas en fonction de la température

Par contre les corps ferromagnétiques deviennent paramagnétiques lorsque la température augmente. La température de transition d'un état à l'autre sera appelée par la suite température de Curie T_c : Celle-ci a été trouvée égale à 745°C pour le fer et 530°C pour la magnétite .

La loi de variation de la susceptibilité des matériaux paramagnétiques en fonction de la température est de la forme

$$\chi = A/T \quad (4.6)$$

On lui donnera, par la suite, le nom de loi de Curie

V.2. Analogie géométrique entre les courbes $J = f(\theta)$ à champ constant le diagramme d'Amagat $D = f(\theta)$ à pression constante.

Le passage de l'état ferromagnétique à l'état paramagnétique d'un corps magnétique, au voisinage de T_c , présente une analogie avec la transition de phase de l'état liquide à l'état solide. Curie a mis en évidence cette analogie entre les variations de J en fonction de θ et de H et celle de la densité D d'un fluide en fonction de la température et de la pression.

Les courbes, portées sur la figure II.18 et obtenues à partir des mesures effectuées par Curie, représentent les variations, en fonction de H , de l'intensité d'aimantation J d'un corps magnétique, le fer, en fonction de la

⁷ Le terme paramagnétique introduit par Faraday, au milieu du XIX^{ième} siècle, n'est pas utilisé par Curie qui parle de corps faiblement magnétiques

température. Chaque courbe correspond à une valeur différente du champ magnétique.

La figure II.19 représente les résultats expérimentaux obtenus par Amagat sur l'acide carbonique et montrent les variations de la densité D en fonction de la température pour différentes valeurs de la pression. La courbe de liquéfaction est tracée en pointillé.

Ces diagrammes établissent une correspondance entre J et D d'une part et H et p d'autre part. La température θ joue le même rôle dans les deux cas.

On peut noter l'analogie géométrique entre les courbes $J = f(\theta)$ (figure II.18) obtenues au voisinage de 745°C , température de transformation du fer, et les courbes $D = f(\theta)$ représentées en rouge sur la figure et qui correspondent à des pressions comprises entre 75 et 200 atmosphères. On remarque que ces courbes présentent une allure hyperbolique comme les courbes $J = f(\theta)$ lorsque les températures sont supérieures à 745°C .

Ainsi pour les corps paramagnétiques ou ferromagnétiques, bien au dessus de T_c , on obtient une loi expérimentale de la forme :

$$J = a/T$$

Où a est un facteur indépendant de la température.

De même pour un fluide, au dessus de la température de liquéfaction, on a :

$$D = b/T$$

En effet la loi de Boyle Mariotte, relative aux gaz parfaits, permet d'écrire :

$$D = 1/R \cdot (p/T)$$

Où R est la constante des gaz parfaits.

D

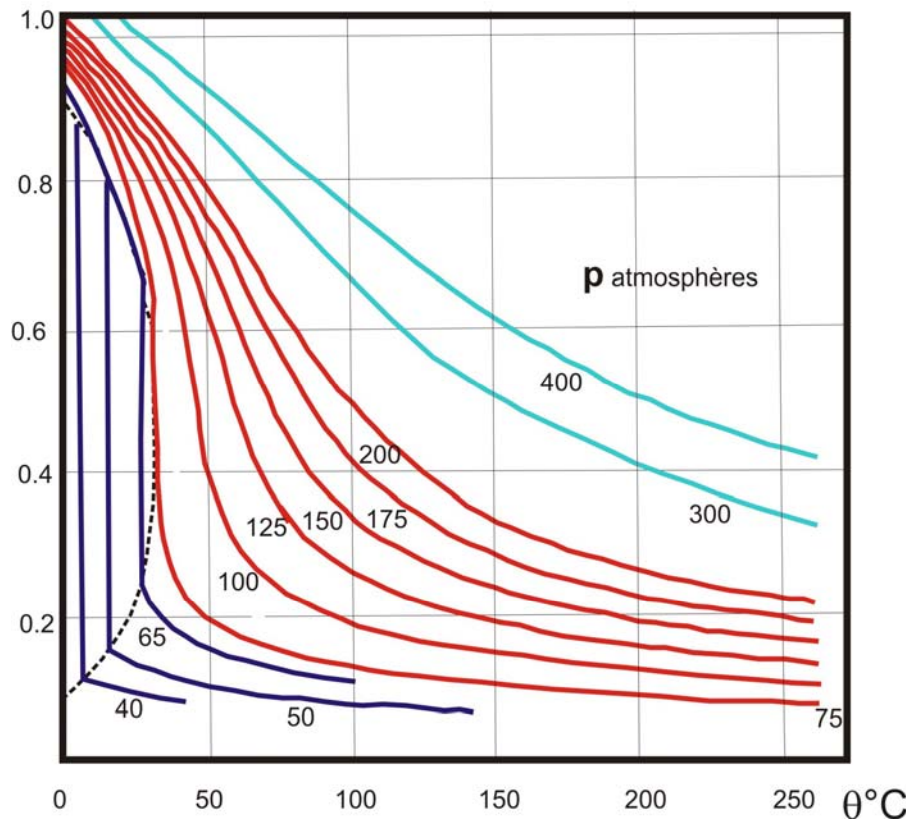


Figure II.18 : Diagramme d'Amagat : $D = f(\theta)$ pour différentes valeurs de p

I

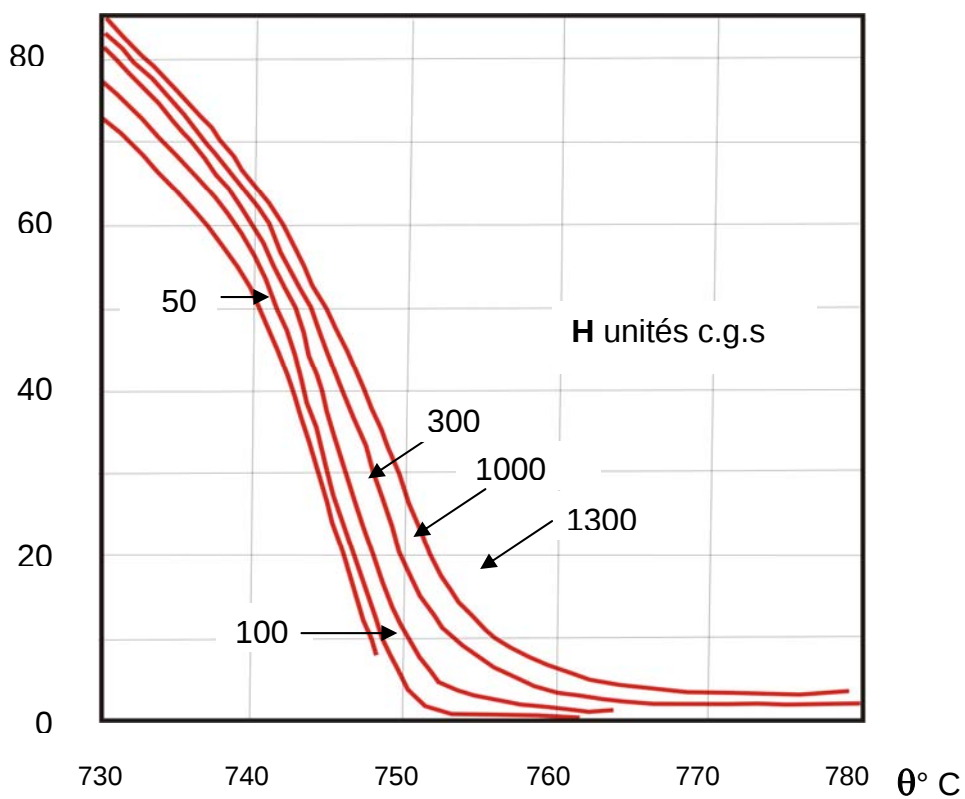


Figure II.19 : Aimantation : $I = f(\theta)$ pour différentes valeurs de H

De même, loin de la saturation, on peut écrire une expression analogue pour les corps magnétiques :

$$J = K \cdot H/T$$

K est une constante qui, à l'instar de R , caractérise le matériau. Ces relations établissent des correspondances :

D	$\longleftrightarrow$	J
p	$\longleftrightarrow$	H
$1/R$	$\longleftrightarrow$	K

La température θ joue le même rôle dans les deux phénomènes.

Cette analogie géométrique, mise en évidence par les courbes expérimentales, amène Curie à se demander si, comme en thermodynamique, il existe des constantes critiques en magnétisme : “ On peut penser que les transformations magnétiques telles que celles du fer à 745° C de la magnétite à 530°C etc., sont des phénomènes nécessaires à une température déterminée chez tous les corps magnétiques, comme sont nécessaires pour les fluides, les contractions rapides, qui finissent toujours par se produire à une certaine température pendant le refroidissement.”⁸

A la lecture de ce passage de la thèse, on sent que Curie après avoir utilisé l'analogie c'est à dire aller du particulier au particulier, passe à un mode de raisonnement par induction. Les résultats obtenus dans certains cas particuliers (avec le fer, la magnétite, le nickel etc.) peuvent ils être généralisés à tous les corps paramagnétiques ? On retrouve ainsi ce qui a été exprimé par Lachelier et Carnéade (Ch. I)

Les études théoriques de Weiss et Bloch ont permis de confirmer ces résultats expérimentaux.

⁸ P.Curie [44] page 333.

5. Théories de Langevin et de Debye.

5. 1. Théorie de Langevin (1905)

5. 1. 1. Analogie avec la théorie cinétique des gaz de Boltzmann

Dans un article [46] intitulé “ *Magnétisme et théorie des électrons*”, paru aux annales de chimie et de Physique en 1905 , Paul Langevin reprend la théorie de Weber sur le magnétisme. Il applique la théorie des électrons à des problèmes de magnétisme en particulier aux milieux diamagnétiques et paramagnétiques. En ce qui concerne le paramagnétisme, il procède par un raisonnement par analogie :

D’abord il considère un milieu à l’état gazeux, comme l’oxygène par exemple dont les molécules possèdent un moment magnétique non nul. Il se propose de calculer l’influence du champ magnétique sur l’intensité d’aimantation et de montrer que celle-ci obéit à la loi expérimentale de Curie [44] c’est à dire qu’elle varie en $1/T$.

Un raisonnement, basé sur la thermodynamique lui permet d’exprimer le moment magnétique μ en fonction du “champ magnétique” H et de la température T :

$$\mu = f(H/T)$$

mais ne lui permet pas d’avoir la forme de la fonction f .

Il considère alors la théorie cinétique des gaz et utilise l’analogie entre des molécules d’oxygène placées dans un champ magnétique et soumises à l’action de la température et celles d’un gaz placé dans le champ de la pesanteur et porté à la température T .

Ce gaz est contenu dans un récipient fermé : en l’absence de la pesanteur, l’action de la température se traduit par une répartition uniforme des molécules. Si, au contraire, on rétablissait le champ de la pesanteur et on

abaissait la température jusqu'au zéro absolu, les molécules se rassembleraient au fond du récipient. Sous l'action conjuguée de la pesanteur et de la température, il s'établit un équilibre statistique et la densité du gaz est une fonction de la hauteur du vase et de la température. La loi suivant laquelle se fait la répartition de ces molécules a été obtenue par Ludwig Boltzmann [47].

le rapport des densités du gaz entre deux niveaux est proportionnel à :

$$\exp\left(-\frac{W}{k.T}\right)$$

W est la différence des énergie potentielles, T la température absolue et k la constante des gaz parfaits rapportée à une molécule (constante de Boltzmann). On retrouve ainsi la formule du nivellement barométrique trouvée par Laplace par autre méthode¹

5. 1. 2. Théorie du paramagnétisme

Langevin applique ce raisonnement à un gaz paramagnétique, en faisant deux hypothèses :

D'abord il suppose qu' en l'absence de champ magnétique, toutes des directions sont possibles.

Ensuite il ne tient pas compte de l'interaction entre les moments magnétiques, dans ce cas, l'énergie potentielle est :

$$W = -\mu.H.\cos \alpha$$

où μ est le moment magnétique d'une molécule, H est le "champ magnétique" et α l'angle formé par μ et H . Le nombre de molécules dont le moment μ fait avec H un angle α , par unité d'angle solide est, selon la théorie de Boltzmann, proportionnel à :

¹ Voir Bruhat :Ref [49] pages 452 à 459

$$W = \exp \left[\frac{\mu \cdot H \cdot \cos \alpha}{k \cdot T} \right]$$

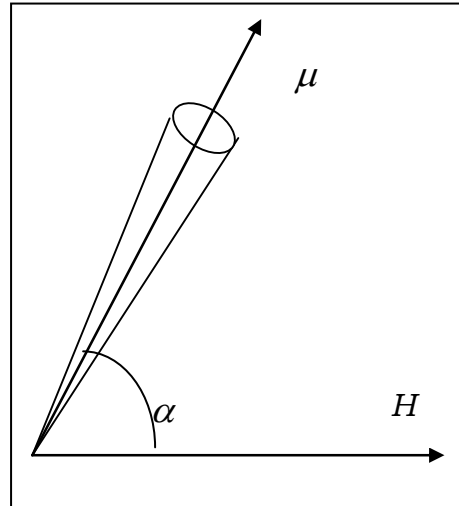


Figure II. 20

Après calculs, il obtient la variation de l'intensité d'aimantation J en fonction de la variable x :

$$J/J_0 = \coth(x) - (1/x) \quad \text{où} \quad x = \mu H / kT$$

$J_0 = N \cdot \mu$ correspond à la saturation. N est le nombre de molécules par unité de volume. La fonction

$$L(x) = \coth(x) - (1/x)$$

sera appelée, par Debye, *fonction de Langevin*.

Pour les faibles valeurs de x la fonction de Langevin devient :

$$L(x) = x/3 \quad \text{et} \quad J = \left[\frac{N \cdot \mu^2}{3 \cdot k \cdot T} \right] \cdot H$$

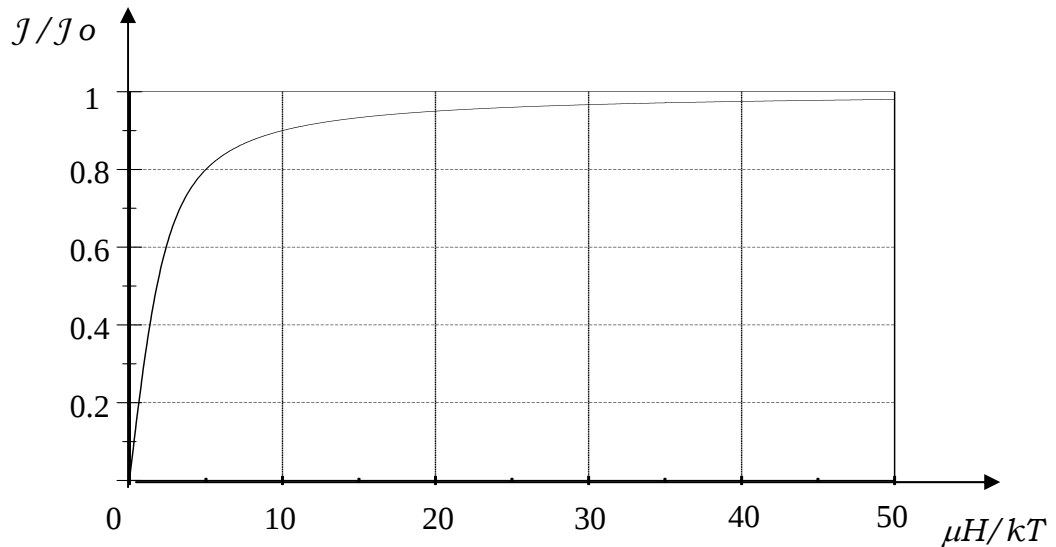


Figure II.1.9 : variation de l'intensité d'aimantation en fonction de x

Ce qui correspond à une susceptibilité magnétique :

$$\chi = \left[\frac{N \cdot \mu^2}{3kT} \right] = \frac{C}{T}$$

Il retrouve ainsi la loi expérimentale de Curie avec :

$$C = \frac{N\mu^2}{3k}$$

5. 1. 3. Progrès par rapport à la théorie de Weber

Dans son cours de Magnétisme et d'Electricité [50], paru en 1916, H. Bouasse écrit en page 36 : " C'est Weber qui donna la théorie du paramagnétisme, théorie que ces derniers temps Langevin a purement et simplement reprise, manière commode d'avoir du génie à peu de frais ". Ce jugement est trop injuste envers la contribution de Paul Langevin à une meilleure compréhension du magnétisme. En 1852 Weber reprend, comme nous l'avons vu précédemment, l'idée d'Ampère et assimile les moments créés par les courants ampériens à des aimants microscopiques, mais il ne connaît pas l'origine de

ces courants. Lorsque le matériau n'est pas aimanté, ces aimants prennent toutes les orientations possibles, là encore Weber ignore la cause de cette répartition. L'aimantation du milieu est due, dans la théorie de Weber, à l'action de deux forces sur les moments magnétiques : la force magnétisante X et une force constante D qui intervient par son moment par rapport à l'axe de rotation du petit aimant et qui tend à le ramener à sa position initiale. Weber ne fait aucune hypothèse sur l'origine de cette force. Lorsque Langevin reprend le problème, un demi siècle plus tard, la physique a fait d'énormes progrès, ce qui lui permet d'apporter des réponses aux nombreuses questions que devait se poser Weber. Les concepts de champ, d'atome et d'électron sont en 1905 bien définis : "*Les électrons gravitant dans l'atome sur des orbites fermées, écrit Langevin, fournissent à première vue une représentation simple des courants particuliers d'Ampère*". Puis il ajoute : "*Je crois possible de donner dans l'hypothèse des électrons une signification précise aux idées d'Ampère et de Weber*".[46]

D'autre part il a à sa disposition les résultats expérimentaux de Curie et la théorie statistique de Boltzmann, qui lui permet d'expliquer l'équipartition des moments magnétiques en l'absence de champ et, lorsque le matériau est placé dans un champ magnétique, l'équilibre statistique entre l'action de ce dernier et celle de la température. La théorie de Langevin relie des grandeurs macroscopiques accessibles à la mesure, comme la susceptibilité magnétique, la constante de Curie, à des paramètres microscopiques comme le moment magnétique atomique.

La théorie de Langevin constitue une étape importante dans l'histoire du magnétisme, mais c'est une théorie classique. Elle devait être revue en tenant compte de la nature quantique des phénomènes, c'est ce qui a été fait, en 1927, par Léon Brillouin.

La théorie de Langevin va donner naissance à la théorie de Debye dont le rôle dans l'étude des diélectriques a été fondamental.

5. 2 . Théorie de Debye (1912)

Pour expliquer la polarisation dipolaire, Debye [51] reprend la théorie de Langevin dans le cas des diélectriques. Il considère d'abord une molécule rigide, de moment dipolaire $\mathbf{p}$, placée dans le champ local $\mathbf{E}$. Son énergie potentielle est :

$$W = - \mathbf{p} \cdot \mathbf{E}$$

S'il n'y a aucune force d'interaction moléculaire, les moments dipolaires p sont également distribués quelque soit la direction :

Le nombre de molécules contenues dans l'angle solide $d\Omega$ (figure II.20) à la température T° est selon la loi de Boltzman :

$$A \exp(-W/kT) d\Omega,$$

Après un calcul identique à celui de Langevin, il obtient un résultat similaire :

$$L(x) = \frac{\bar{p}}{p} = \coth x - \frac{1}{x}$$

avec

$$x = \frac{p \cdot E}{k \cdot T}$$

$\bar{p}$ est le moment dipolaire moyen de la molécule. Debye appelle la fonction $L(x)$ "fonction de Langevin".

La courbe qui représente cette fonction est identique à celle obtenue par Langevin (figure II.21). Debye fait remarquer que, dans le cas des diélectriques, la fonction de Langevin s'écrit :

$$L(x) \approx \frac{x}{3}$$

Le moment électrique moyen s'écrit :

$$\bar{p} = \left(\frac{p^2}{3kT} \right) E$$

Ensuite, Debye considère la polarisation induite , le moment électrique total s'écrit:

$$\bar{p} = \left(\alpha + \frac{p^2}{3kT} \right) E$$

Où α est la polarisabilité induite.

5. 3 . Le raisonnement par analogie chez Langevin et Debye.

Comme nous venons de le voir le mode de raisonnement par analogie a permis d'effectuer des progrès considérables dans l'étude des matériaux diélectriques et magnétiques. Il a tout d'abord été utilisé par Langevin pour construire sa théorie en se basant sur celle de Boltzmann.

	Boltzmann	Langevin	Debye
Caractéristique de la molécule	Masse volumique ρ	Moment magnétique μ	Moment dipolaire p
Champ	Pesanteur g	Magnétique H	Electrique E
Energie potentielle	$\rho g h$	$-\mu \cdot \mathbf{H}$	$-\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}$
Energie thermique	$k.T$	$k.T$	$k.T$
Réponse du matériau		J	$\mathcal{P}$

Tableau N° II.1.

Le tableau, ci dessus, fait ressortir les analogies entre les trois théories. Dans la théorie cinétique des gaz, la molécule intervient par sa masse volumique ρ qui est une grandeur scalaire, alors que l'atome, dans la théorie de Langevin, et la molécule de Debye interviennent par une grandeur vectorielle, les moments magnétique μ et dipolaire $\mathbf{p}$. Langevin fait alors intervenir, dans ses calculs, la direction.

C'est une analogie formelle qui est beaucoup plus prononcée dans les théories de Langevin et Debye, où les formules sont pratiquement identiques. Cette analogie formelle ne doit pas suggérer une analogie substantielle, car à l'échelle microscopique les phénomènes qui interviennent dans les milieux magnétiques et diélectriques sont de natures différentes.

En magnétisme ce sont les atomes qui interviennent, par le moment orbital de l'électron et son spin d'où utilisation de la mécanique quantique. C'est la raison pour laquelle la théorie de Langevin n'a plus qu'un intérêt historique et didactique.

Dans le cas des diélectriques ce sont les molécules, qui constituent le milieu, qui répondent à l'action du champ électrique, il s'en suit une polarisation du matériau. Si les molécules sont apolaires, elles se polarisent sous l'effet du champ électrique : c'est la polarisation induite. Si les molécules sont polaires, le matériau n'est pas pour autant polarisé en raison de l'agitation thermique. En présence d'un champ électrique, les molécules prennent une direction privilégiée et le matériau se polarise : c'est la polarisation par orientation ou polarisation dipolaire. La théorie de Debye, calquée sur celle de Langevin établie pour les matériaux paramagnétiques, explique correctement ces phénomènes.

Nous verrons au prochain chapitre, lors de l'étude des propriétés diélectriques des polymères, que la théorie de Debye permet une interprétation de la relaxation diélectrique par l'introduction d'un " temps de relaxation τ ". .

6. Conclusion.

Nous avons retracé, dans ce qui précède, l'histoire des milieux magnétiques et diélectriques, sur près d'un siècle, depuis les travaux d'Ampère, suite à l'expérience d'Oersted en 1820, jusqu'à l'année 1912 qui a vu naître la

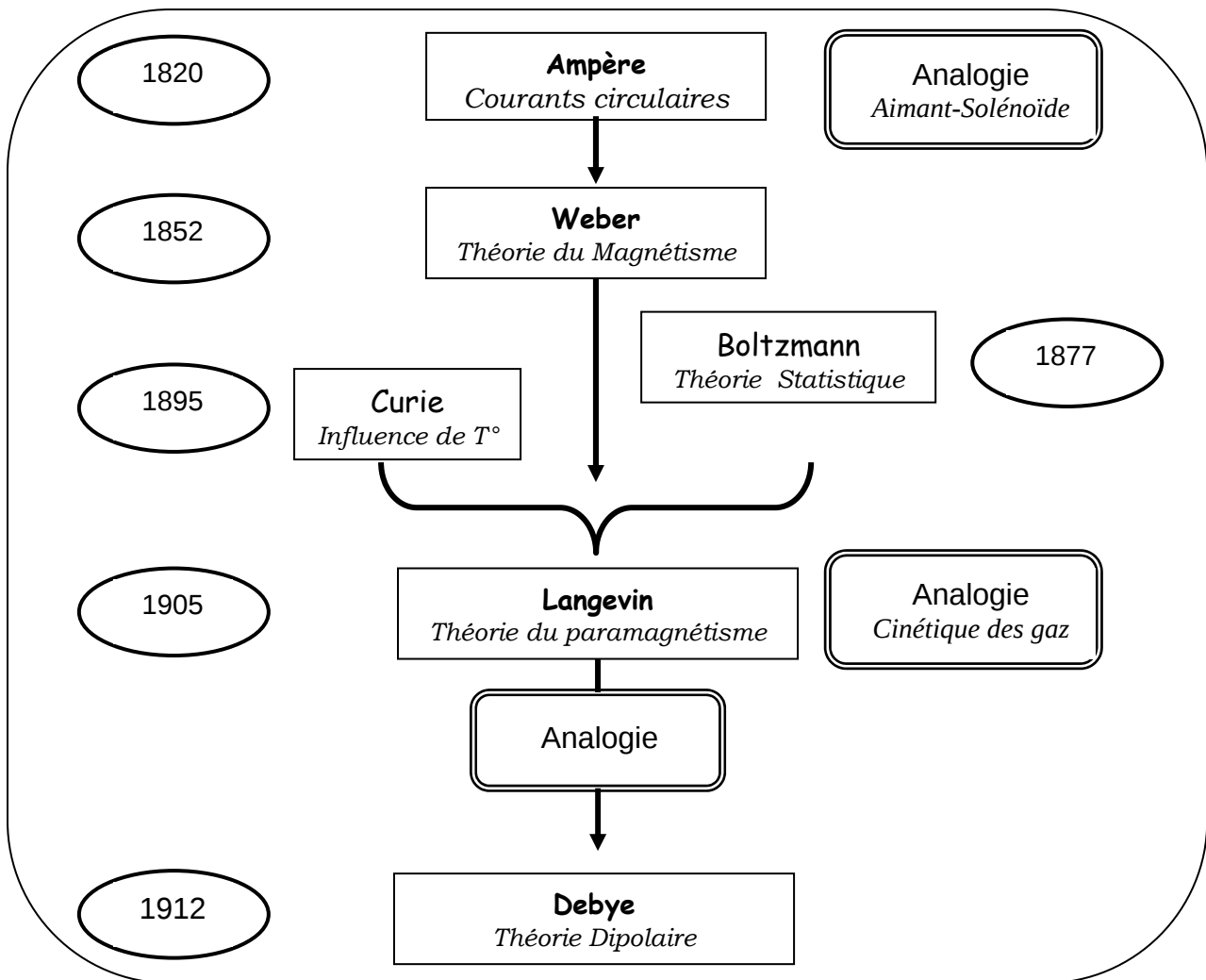


Figure II. 22 : De la théorie d'Ampère à celle de Langevin & Debye

théorie dipolaire de Debye. Durant cette période, seule la théorie classique pouvait être utilisée pour l'étude de la matière. En 1905, lors de la publication des travaux de Langevin [46], la théorie des quanta en était à ces premiers pas avec l'article fondateur de Max Planck en 1900 et celui d'Albert

Einstein en 1905 sur l'effet photoélectrique. La mécanique quantique ne deviendra l'outil de base du magnétisme qu'à partir de 1927. D'un autre côté, nous nous sommes limités à l'étude historique des travaux sur la nature des phénomènes responsables du magnétisme et de la polarisation électrique. Nous avons laissé de côté tous les travaux de Faraday, Maxwell, W. Thomson, Newmann, etc sur les concepts de champ et d'induction électriques et magnétiques dans les milieux.

La figure II. 22 montre que théorie de Langevin-Debye est l'aboutissement d'une série de travaux issus de l'hypothèse d'Ampère sur l'origine du magnétisme. Cela justifie l'opinion de ce savant selon laquelle " *La marche à suivre dans les sciences*" consiste à " *perfectionner ce qu'ont fait les autres*". Chaque savant a apporté sa contribution à l'amélioration de la théorie d'Ampère sur le magnétisme, grâce à son génie et aux outils mathématiques, aux instruments de mesures dont il disposait et aux progrès effectués dans la connaissance sur la structure de la matière.

Ce chapitre met également en évidence le rôle fondamental joué par le raisonnement par analogie dans l'élaboration des théories sur le magnétisme et les milieux diélectriques, et cela depuis les lois de Coulomb, la théorie des deux fluides utilisée par Poisson et Mossotti, l'hypothèse d'Ampère jusqu'aux théories de Langevin et Debye. Mais d'un autre côté, c'est ce mode de raisonnement qui a empêché Ampère d'accorder à la force d'Oersted un statut de " force primitive" parce qu'elle n'entre pas dans le cadre d'un modèle newtonien.

Enfin, ce chapitre a montré que certaines découvertes scientifiques sont mal accueillies aussi bien par la communauté scientifique que par la société en général. Certaines personnes s'opposent à toute nouvelle idée qui heurte l'éducation qu'ils ont reçue. Il en est de même des savants qui acceptent mal les innovations qui vont à l'encontre des théories bien établies. Le modèle newtonien, qui a donné d'excellents résultats depuis le XVII^{ème} siècle, a servi

de base à la physique durant tout le XIX^{ième} siècle. Or la force d'Oersted ne répond pas aux critères d'une force newtonienne, nous avons vu que les approches d'Ampère et de Faraday, en ce qui concerne cette force, sont complètement différentes.

Les empiristes, quant à eux s'opposent à toute hypothèse qui ne peut être vérifiée expérimentalement. Ampère devait prouver, par des expériences, l'existence des "courants circulaires" et Boltzmann celle de l'atome.

Chapitre III

ANALOGIE ENTRE LES PROPRIETES ELECTRIQUES & MECANIQUES DES POLYMERES

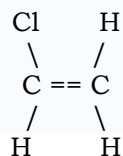
1. Les Polymères .

1.1 Généralités :

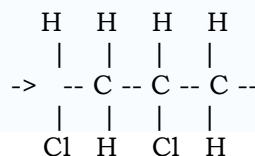
Un polymère est un matériau dont les molécules sont formées de la répétition d'un même motif , appelé monomère. Ce terme provient des mots grecs “ *poly*” (plusieurs) et “*mèros*” (unité) [1]. Ce sont donc des molécules géantes qui forment de longues chaînes comportant jusqu'à 100 000 monomères et dont la longueur peut atteindre plusieurs microns, d'où leur nom de macromolécules.

Ainsi le chlorure de polyvinyle PVC (de l'anglais *polyvinyl chloride*), que nous allons étudier dans ce chapitre, est constitué de monomères de chlorure de vinyle, $CH_2 = CH - Cl$,

Structure atomique du PVC



Monomère de chlorure de vinyle



Polymère de chlorure de polyvinyle

Il existe des polymères d'origine naturelle, comme la cellulose obtenue à partir du bois, le caoutchouc tiré de l'hévéa , les cires etc.. D'autres sont synthétisés à partir de réactions de polymérisation :

- Les réactions de polyaddition sont des réactions en chaîne comme dans le cas du polyéthylène PE, du polystyrène PS du chlorure de polyvinyle PVC etc.. .
- Un deuxième procédé, la polycondensation, consiste en une polymérisation par étapes : c'est le cas du polyéthylène téréphtalate PET.

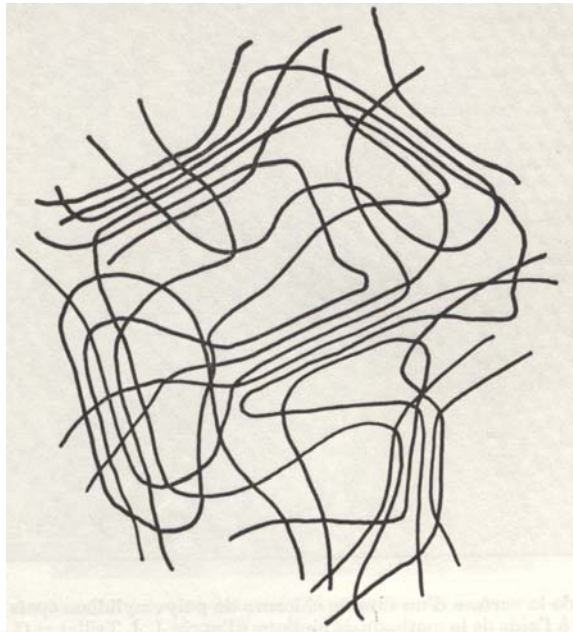


Figure III. 1 : polymère semi cristallin (Buvet [2] p 311)

Les polymères sont en général des matériaux amorphes où les configurations des chaînes apparaissent comme régies par le hasard. La chaîne présente une forme comparable à celle d'un écheveau désordonné [2] .

D'autres ont une structure semi cristalline où on note la coexistence de zones amorphes et de zones ordonnées qui se présentent sous la forme de cristallites ou de sphérolites. Dans le premier cas les chaînes sont, par exemple, repliées en accordéon (PE) alors que dans le cas des sphérolites, les cristaux croissent radialement et peuvent atteindre quelques microns.



Figure III. 2 : Cristallites dans du polyéther-éther cétone
Microscopie électronique, A. Boudet [3]

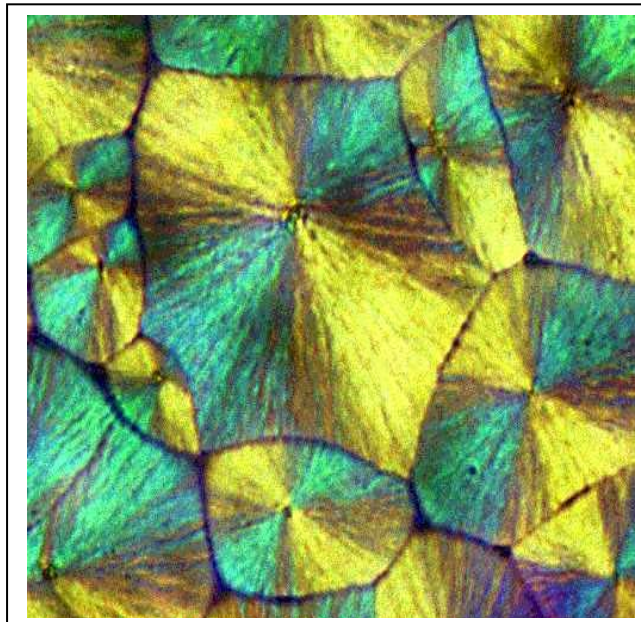


Figure III. 3 : Sphérolites dans du polysulfure de phénylène
Microscopie optique, A. Boudet [3]

Les polymères trouvent de nombreuses applications en raison de leurs propriétés mécaniques et électriques, de leur facilité de mise en oeuvre, de leur faible coût.

Ils servent à la fabrication de petits objets à usage domestique, des pneumatiques, des peintures, des colles, des fibres textiles etc.. Ils sont largement utilisés dans les emballages, et de plus en plus employés dans l'industrie automobile et en aéronautique.

D'autre part, grâce à leurs excellentes propriétés diélectriques, ils sont utilisés, en électrotechnique et en électronique, pour le transport de l'énergie électrique, l'isolation des conducteurs, l'enrobage des composants etc..

1.2.Aperçu historique :

Au milieu du XIX^{ème} siècle, l'inventeur anglais Alexander Parkes essaye de trouver des matériaux possédant des propriétés analogues à celles du caoutchouc naturel dont les procédés de vulcanisation par le soufre avaient été mis au point par Goodyer en 1839. Il découvre, à partir du nitrate de cellulose, un matériau qui sera breveté, en 1861, sous le nom de Parkésine. C'est, écrit-il, un matériau qui, *"utilisé à l'état solide, plastique ou fluide, se présente tour à tour rigide comme l'ivoire, opaque, flexible, résistant à l'eau, pouvant être coloré et travaillé à l'outil comme les métaux, moulé par compression et laminé"*¹. A la même époque, aux Etats Unis, John Weley Hyatt met au point, toujours à partir du nitrate de cellulose, un nouveau matériau "le *celluloïd*", appelé à remplacer l'ivoire, et dépose un brevet en 1870.

En 1912 les premiers pneumatiques pour voitures automobiles, en caoutchouc synthétique, sont construits en Allemagne.

Mais ce n'est qu'à partir de 1920 que les premières études, sur la structure chimique de ces polymères, furent entreprises par le chimiste allemand Hermann Staudinger. Il proposa, pour les polymères, des formules en

¹ Cité par Marchelli [4].

chaîne ouverte, attribua les propriétés colloïdales, que présentent les hauts polymères, à leur masse moléculaire élevée et introduisit le terme de "macromolécules" [4]. La théorie de Staudinger ne fut acceptée par les chimistes qu'à partir du moment où elle fut vérifiée par des études expérimentales aux rayons X, notamment celles de W.H. Carothers, qui apportèrent la preuve de la structure linéaire des polymères. Ces travaux valurent le prix Nobel à Staudinger en 1953.

La nécessité de synthétiser de nouveaux matériaux, durant la seconde guerre mondiale, le développement de la technologie et la mise au point de moyens d'analyse de plus en plus performants, ont permis la découverte de nombreux polymères. Ainsi le Chlorure de Poly Vinyle fut fabriqué, à l'échelle industrielle, par l'Union Carbide à partir de 1939 et de nouveaux élastomères (isobutylène-isoprène) furent découverts en 1940. Depuis de nombreux polymères furent développés : le Poly Ethylène Basse Densité PEBD(1940), le PTFE (Téflon en 1943), les résines époxy (1947), le polypropylène, le PEHD, et le polycarbonate (1957) [1]. Dans la seconde moitié du vingtième siècle, d'énormes progrès furent réalisés avec la découverte de polymères conducteurs, piézoélectriques, bioactifs, de copolymères etc..et leur production industrielle ne cesse d'augmenter d'année en année. " Notre ère sera rappelée comme celle des polymères" ² a dit le prix Nobel P.J. Flory.

1.3. Comportement thermique des polymères :

Différents phénomènes, transitions de phase, relaxations, dégradation etc.. se manifestent lorsque la température d'un polymère s'élève et se traduisent par des modifications des propriétés du matériau : propriétés thermodynamiques, diélectriques, mécaniques, chimiques etc.. . Certains de ces phénomènes sont réversibles, la composition chimique et la structure du polymère ne sont pas affectées. Les modifications, que subit le matériau à

² Cité par Marchelli [4].

mesure qu'on élève la température, ne sont pas définitives ; le polymère retrouve ses caractéristiques lorsque la température revient à sa valeur initiale. Par contre, les phénomènes irréversibles affectent définitivement le matériau.

R. F. Boyer [5] distingue, parmi les phénomènes réversibles, les relaxations et les transitions.

Une relaxation est un phénomène réversible qui résulte de mouvements moléculaires de segments de chaîne ou de groupements latéraux par exemple. Elle se manifeste par une variation des caractéristiques diélectriques ou mécaniques du matériau.

Une transition de phase traduit le passage d'un état physique à un autre. Boyer considère, dans les polymères, trois transitions : La transition vitreuse, la transition liquide liquide et la fusion.

La transition vitreuse apparaît à une température T_g , dite température de transition vitreuse. Au dessous de T_g le polymère se trouve à l'état vitreux, il est rigide, dur et cassant comme le verre. Au delà de cette température, il passe à un état où vont se manifester des caractéristiques plastiques si le polymère est hautement cristallin ou élastiques s'il est amorphe. Les polymères semi cristallins acquièrent des caractéristiques plasto-élastomériques.

La transition liquide liquide a été mise en évidence en 1963 par R.F. Boyer. Elle se produit dans la partie amorphe du polymère et correspondrait à la libération de certaines molécules à l'égard des forces intra moléculaires. Le polymère s'approche de l'état liquide. La transition liquide liquide a fait l'objet de nombreuses controverses [10] , [11] , [14] .

La fusion s'établit plus ou moins rapidement selon la structure du polymères. Un polymère amorphe passe progressivement, comme nous venons de le voir, de l'état élastique d'un solide à l'état visqueux d'un fluide en passant par un état intermédiaire visco élastique. Un polymère semi cristallin ne présente pas de fusion franche. A l'état liquide les polymères ne présentent aucun intérêt.

1.4. Propriétés diélectriques des polymères :[6-8].

On sait depuis l'expérience d'Aepinus (voir Ch. II. § 1.4) que, si on place un isolant entre les deux armatures d'un condensateur plan portées à des potentiels électriques différents, la capacité de ce dernier augmente et passe de C_0 à C . La permittivité diélectrique du matériau ε est donnée par :

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0} \varepsilon_0 \quad (1)$$

où ε_0 est la permittivité du vide. Cette augmentation de la capacité du condensateur est due à un phénomène de polarisation du matériau qui résulte de l'application d'un champ électrique E . L'étude de ce phénomène nécessite l'introduction de nouvelles grandeurs :

- Le vecteur polarisation $\vec{P}$ qui apparaît, à l'échelle macroscopique, comme un moment dipolaire par unité de volume.
- Le vecteur déplacement, ou excitation électrique $\vec{D}$:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \vec{P} + \varepsilon_0 \vec{E}$$

Dans le cas d'un matériau linéaire homogène et isotrope et des faibles valeurs de E , le vecteur polarisation s'exprime linéairement en fonction du champ :

$$\vec{P} = (\varepsilon - \varepsilon_0) \vec{E} = \chi \varepsilon_0 \vec{E} \quad (2)$$

Où χ est la susceptibilité diélectrique du matériau ($\varepsilon_r = 1 + \chi$).

Lorsque les molécules, qui constituent le matériau, ont un moment dipolaire nul, le matériau est apolaire. C'est le cas des molécules centro-symétriques

CH_4 , CCl_4 , CO_2 etc.. Par contre lorsqu'elles forment des dipôles, comme H_2O , HCl , NH_3 etc.. le matériau est polaire.

Ainsi les polymères apolaires sont constitués de monomères dont le moment dipolaire est nul, c'est le cas du Polyéthylène :



Ces polymères présentent une faible permittivité diélectrique et des pertes négligeables. Les polymères polaires possèdent des dipôles permanents, c'est le cas du Chlorure de Poly Vinyle (PVC). Leurs permittivités et leurs pertes diélectriques sont plus importantes que dans le cas des polymères apolaires.

Le phénomène polarisation provient de différents types de mécanismes qui se produisent, au sein du matériau, à l'échelle moléculaire.

La polarisation induite P_i résulte de la déformation du nuage électronique entourant chaque atome (polarisation électronique) et de la polarisation atomique qui est due à la distorsion par le champ électrique de l'arrangement atomique d'une molécule. Cette polarisation s'établit presque instantanément.

La polarisation dipolaire ou par orientation P_d . Si les molécules sont polaires , elles s'orientent , en l'absence de champ électrique, au hasard en raison de l'agitation thermique ³ . A l'échelle macroscopique le moment résultant est nul et le matériau n'est pas polarisé. Lorsqu'on applique un champ électrique les dipôles ont tendance à s'orienter suivant la direction de ce champ . Le temps d'établissement est beaucoup plus important que précédemment et varie entre 10^{-9} à 10^{-5} seconde en raison de l'inertie des molécules.

La polarisation par charge d'espace : elle est due à la présence dans le matériau de charges libres. Ces charges peuvent être d'origine intrinsèque ou injectées par les électrodes . Cette polarisation provient de l'accumulation de ces charges aux interfaces, c'est à dire entre deux phases qui ont des permit-

³ Voir la théorie de Debye (Ch II , § 5.2.)

tivités différentes. Ce mécanisme induit un moment dipolaire macroscopique dont le temps d'établissement est long ($>10^3$ s).

Lorsqu'on soumet le matériau à un champ électrique les différents types de polarisation apparaissent successivement. La polarisation induite s'établit presque instantanément, puis les dipôles permanent vont tourner dans la direction du champ électrique et ensuite ce sont les charges d'espace qui vont se concentrer aux interfaces.

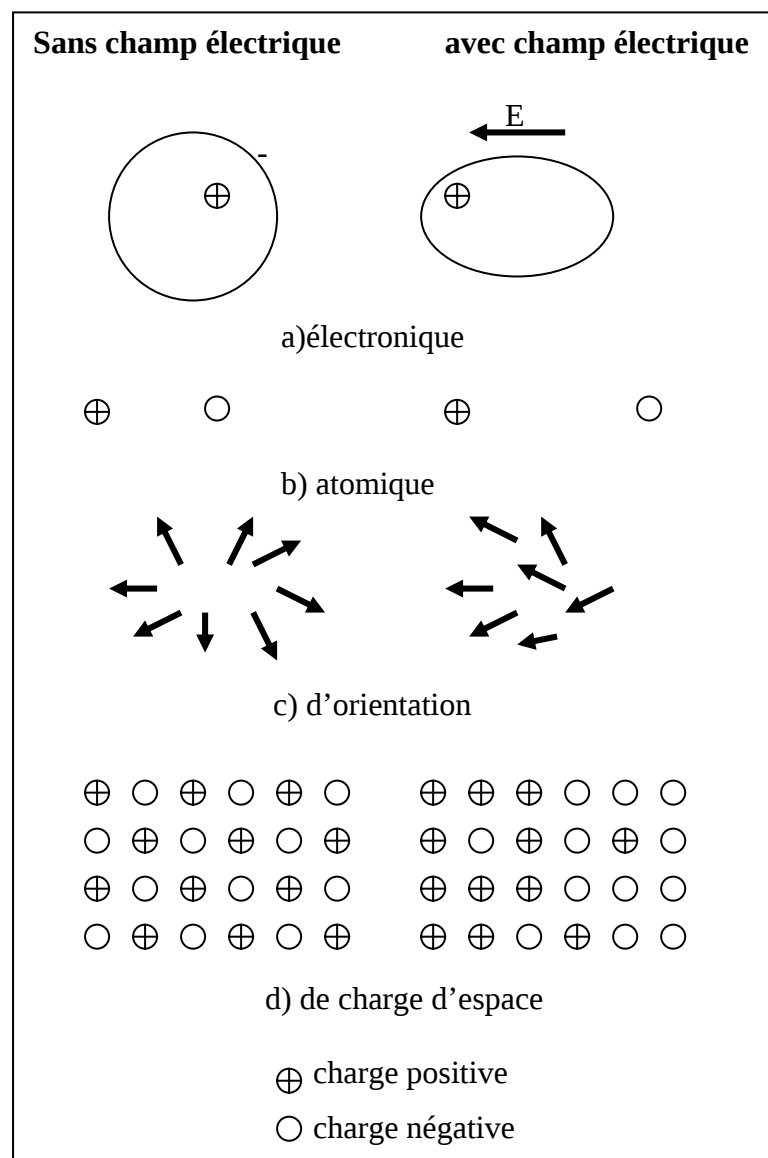


Figure III. 4 : Les mécanismes de polarisation représentés par Von Hippel [7] page 17.

Lorsqu'on supprime le champ électrique, les dipôles induits s'annulent, les dipôles permanents se réorientent de façon aléatoire et les charges d'espace diffusent à travers le matériau.

Nous ne tiendrons pas compte dans ce qui suit, de la polarisation par charge d'espace. La polarisation s'écrit dans ce cas :

$$P(t) = P_i + P_d(t) \quad (3)$$

Définissons par ε_∞ la permittivité électrique aux temps courts (ou à fréquence infinie), et par ε_s la permittivité statique aux temps longs (ou à fréquence nulle). Les polarisations induite et dipolaire s'écrivent :

$$P_i = (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0)E \quad \text{et} \quad P_d(t) = (\varepsilon(t) - \varepsilon_\infty)E$$

Aux temps longs , la polarisation dipolaire tend vers une limite :

$$P_{ds} = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)E$$

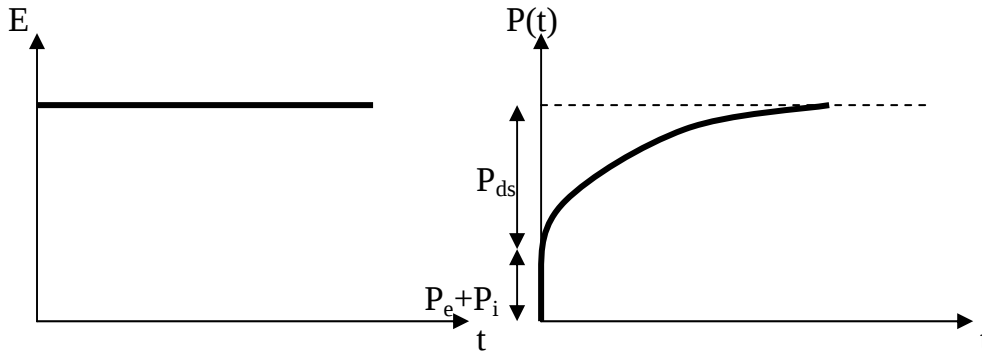


Fig III.5 : Evolution de la polarisation en fonction du temps, dans le cas du champ constant

Dans le modèle de Debye et dans le cas où le matériau est constitué de dipôles identiques et sans interaction entre eux, l'évolution de la polarisation dipolaire en fonction du temps est régie par l'équation :

$$\frac{dP_d(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} [(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)E - P_d(t)] \quad (4)$$

où τ désigne le temps unique de relaxation dipolaire. La solution de cette équation est :

$$P_d(t) = P_{ds} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (5)$$

avec :

$$P_{ds} = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)E$$

La polarisation totale (3), compte tenu de la polarisation induite, devient :

$$P(t) = P_i + P_{ds} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (6)$$

En général les polymères sont constitués d'entités polarisables différentes qui interagissent entre eux , il en résulte une distribution des temps de relaxation. Celle ci peut être discrète ou continue. De nombreuses théories ont été élaborées par différents auteurs comme Von Schweidler, Wagner, Frölich etc (Voir le cours de Böttcher [6]).

1.5. Propriétés mécaniques des polymères [2, 12]:

Dans le cas d'un corps parfaitement élastique , les déformations sont réversibles et le matériau obéit à la loi de Hooke.

$$\sigma = G.\gamma$$

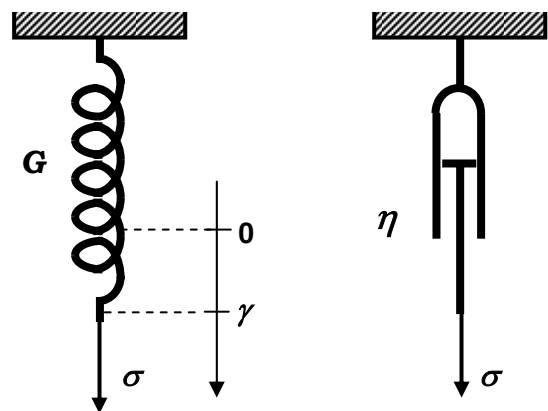
σ : la contrainte, G module de cisaillement, et γ la déformation.

Un fluide visqueux est caractérisé par des déformations irréversibles, le matériau obéit à la loi de Newton

$$\sigma = \eta \frac{d\gamma}{dt}$$

η est le coefficient de viscosité et

$d\gamma/dt$ la vitesse de déformation.



Elasticité

Viscosité

Le comportement viscoélastique d'un polymère est un comportement intermédiaire entre celui d'un solide parfaitement élastique et celui d'un fluide parfaitement visqueux

Lorsqu'un polymère est soumis à une contrainte de cisaillement constante σ_0 , il subit une déformation γ qui s'écrit sous la forme :

$$\gamma(t) = F(t) \cdot \sigma_0 \quad (7)$$

$F(t)$ est la fonction de fluage.

L'évolution de la déformation en fonction du temps est représentée par la courbe de la figure III. 6. Elle montre que la déformation $\gamma(t)$ se décompose en trois termes :

$$\gamma(t) = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 \quad (8)$$

γ_1 représente une déformation instantanée et réversible, le polymère se comporte comme un solide obéissant à la loi de Hooke. Ce terme prédomine lorsque la contrainte est appliquée aux basses températures. La déformation retardée γ_2 est également réversible. γ_3 qui caractérise l'écoulement, à l'état visqueux du polymère, est irréversible, le terme γ_3 est négligeable si la contrainte est appliquée à une température inférieure à la température de transition vitreuse T_g ,

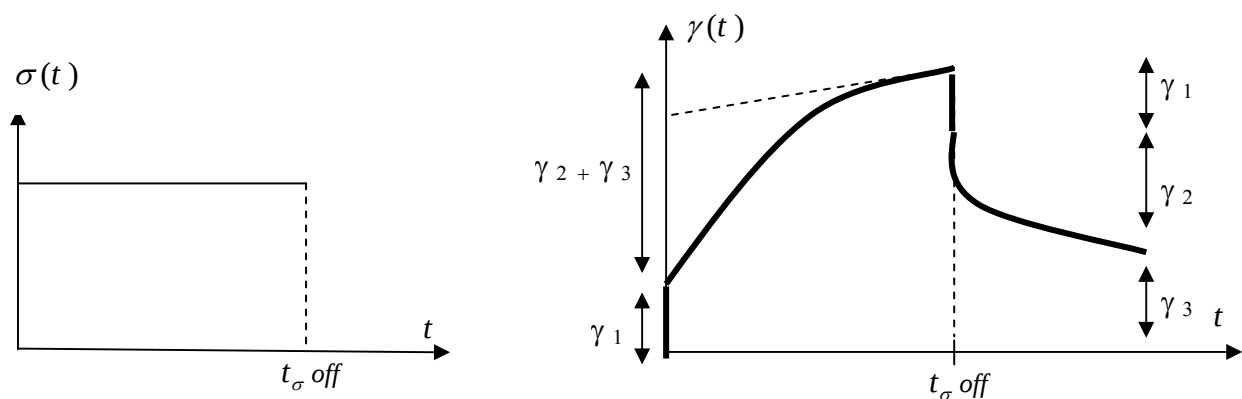


Figure III. 6 : évolution de la déformation en fonction du temps.

On définit la complaisance mécanique $J(t)$ par le rapport entre la déformation $\gamma(t)$ du polymère et la contrainte qui la produit : $J(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma_0}$

$$\text{Si } \gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3, \quad \text{alors } J(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma_0} = J_1 + J_2 + J_3 \quad (9)$$

$J_1 \equiv J_\infty$ est la complaisance mécanique réversible et instantanée, $J_2 \equiv J_r(t)$ complaisance mécanique retardée et J_3 complaisance irréversible.

La fonction de fluage $F(t)$ a la dimension d'une complaisance J et peut s'écrire sous la forme :

$$F(t) = J_\infty + J_r(t) + J_3 \quad (10)$$

La figure III. 6 représente également au delà de t_{off} , instant où la contrainte est supprimé, la courbe de décharge de l'échantillon. On note que celui-ci présente une déformation résiduelle due à l'irréversibilité de γ_3 .

Plusieurs modèles ont été proposés pour décrire le comportement viscoélastique des polymères, ces modèles sont généralement constitués de ressorts de raideur G correspondant à une contrainte de cisaillement et d'amortisseurs de coefficient η (fig. III. 7) pour représenter la viscosité du polymère.

Dans le modèle de Maxwell (fig. III. 7), le ressort et l'amortisseur sont en série et dans celui de Voigt ils sont en parallèle. Le modèle de Burgers est une combinaison des deux premiers. Dans le modèle de Voigt, la contrainte appliquée se répartit entre les deux éléments. Si on ne tient pas compte de la force d'inertie, en raison des temps de réponse très longs, on obtient l'équation suivante :

$$\sigma = G_v \cdot \gamma + \eta_v \frac{d\gamma}{dt} \quad (11)$$

$$\text{Soit : } \tau \cdot \frac{d\gamma}{dt} + \gamma = \frac{\sigma}{G_v} \quad (12)$$

où $\tau = \frac{\eta_v}{G_v}$ est le temps de retard et $\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$ la vitesse de déformation.

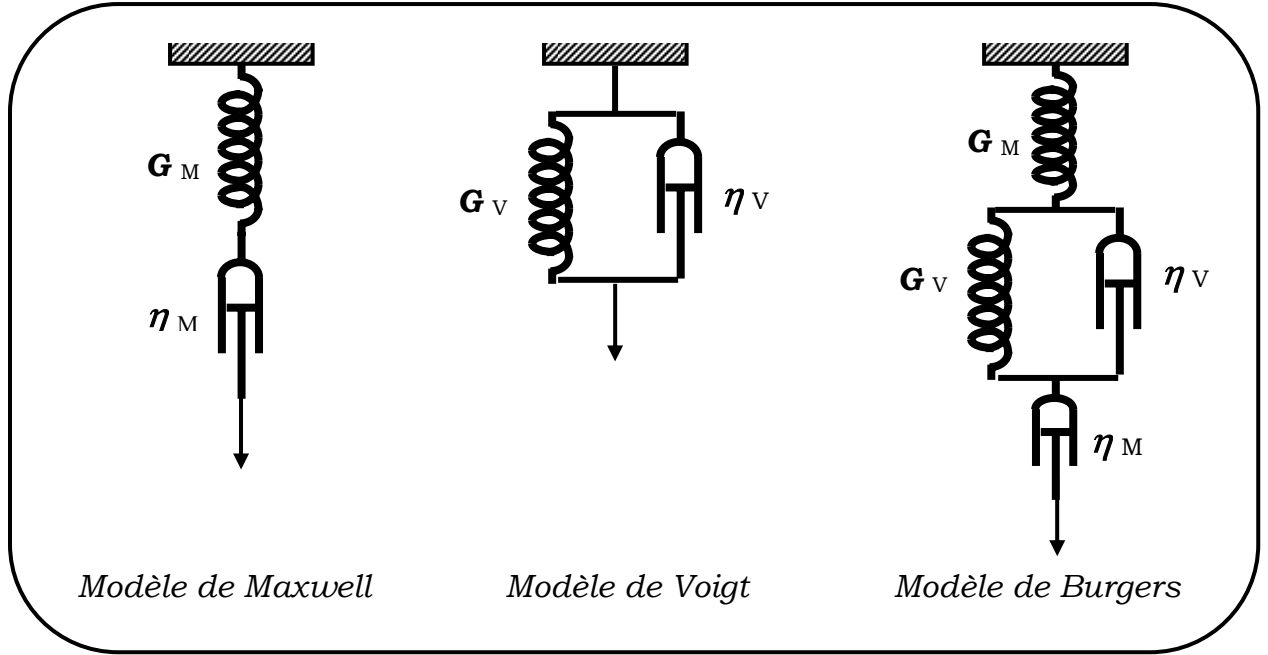


Figure III. 7 Modélisation des différents comportements (Buvet [2] : page 371)

Avec $\gamma_0 = \sigma_0 / G_v$, la déformation s'écrit :

$$\gamma(t) = \gamma_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (13)$$

et la fonction de fluage devient :

$$F(t) = F_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (14)$$

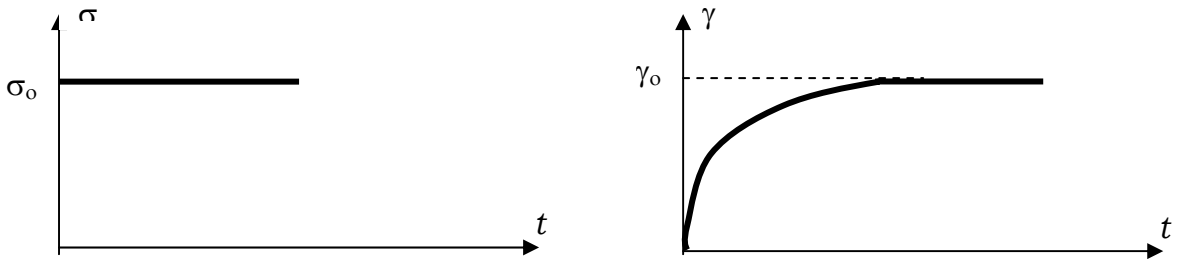


Figure III. 8 : Evolution de la déformation, en fonction du temps, d'un polymère soumis à une contrainte constante σ_0 dans le cas du modèle de Voigt

Le modèle de Voigt ne représente que la déformation retardée. Le modèle de Burgers, quant à lui, fait apparaître les trois déformations.

2. Analogie entre les propriétés électriques & mécaniques.

Le paragraphe précédent montre que les lois qui relient la contrainte de cisaillement σ appliquée à un polymère et la réponse γ de ce dernier sont analogues à celles qui existent entre le champ électrique E appliqué à ce même matériau et la polarisation P qui constitue la réponse du polymère.

2. 1. L'excitation est constante.

Lorsque un polymère est soumis à un champ électrique E_0 constant, il apparaît une polarisation instantanée ou induite P_∞ et une polarisation retardée d'origine dipolaire P_μ . Nous avons vu (Eq 6) que, dans le cas d'un temps de relaxation unique τ , la polarisation totale s'exprime sous la forme :

$$P(t) = P_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \cdot E_0 \quad (15)$$

ε_s est la permittivité diélectrique statique mesurée aux temps longs et ε_∞ la permittivité mesurée aux temps courts.

En mécanique, lorsque la contrainte de cisaillement est constante σ_0 , le matériau subit une déformation γ . Lorsque la température n'est pas trop élevée, la déformation irréversible γ_3 qui correspond à l'écoulement visqueux est négligeable. En partant d'un modèle de Voigt, où η_M est nul, on montre que la déformation du polymère est :

$$\gamma(t) = \gamma_\infty + (J_s - J_\infty) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \cdot \sigma_0 \quad (16)$$

La complaisance J_∞ correspond à une déformation instantanée.

2.2. L'excitation est sinusoïdale :

Lorsque la contrainte de cisaillement est une fonction sinusoïdale du temps :

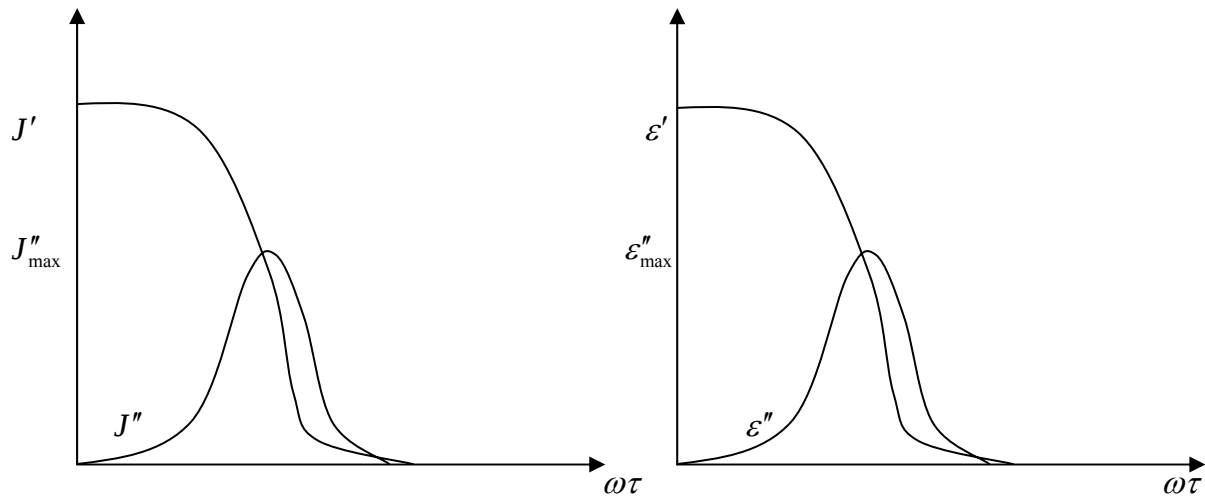
$$\sigma = \sigma_0 \exp(j\omega t) \quad (17)$$

La déformation est également sinusoïdale de même pulsation ω mais présente un déphasage δ par rapport à l'excitation.

$$\gamma(t) = \gamma_M \exp j(\omega t - \delta) \quad (18)$$

δ est l'angle de pertes. Si on pose :

$$\gamma = J^* \cdot \sigma, \quad \text{où} \quad J^* = J' - jJ'' \quad (19)$$



Figures III.9.& III. 10: Complaisances mécaniques et permittivités diélectriques

est la complaisance complexe, on a

$$\tan \delta = \frac{J''}{J'} \quad (20)$$

Les parties réelles et imaginaires de J^* sont après calculs :

$$J' = J_{\infty} + \frac{J_s - J_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad \text{et} \quad J'' = (J_s - J_{\infty}) \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (21)$$

En électricité on obtient des expressions identiques pour ε' et ε'' :

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad \text{et} \quad \varepsilon'' = (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (22)$$

$$\text{Avec} \quad \varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (23)$$

L'angle de pertes diélectriques δ est tel que

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (24)$$

L'examen des expressions (19) et (21) des complaisances complexe, réelle et imaginaire en mécanique et des permittivités (22) et (23) qui leur correspondent lors de l'étude diélectrique, montre une analogie formelle parfaite entre les deux phénomènes.

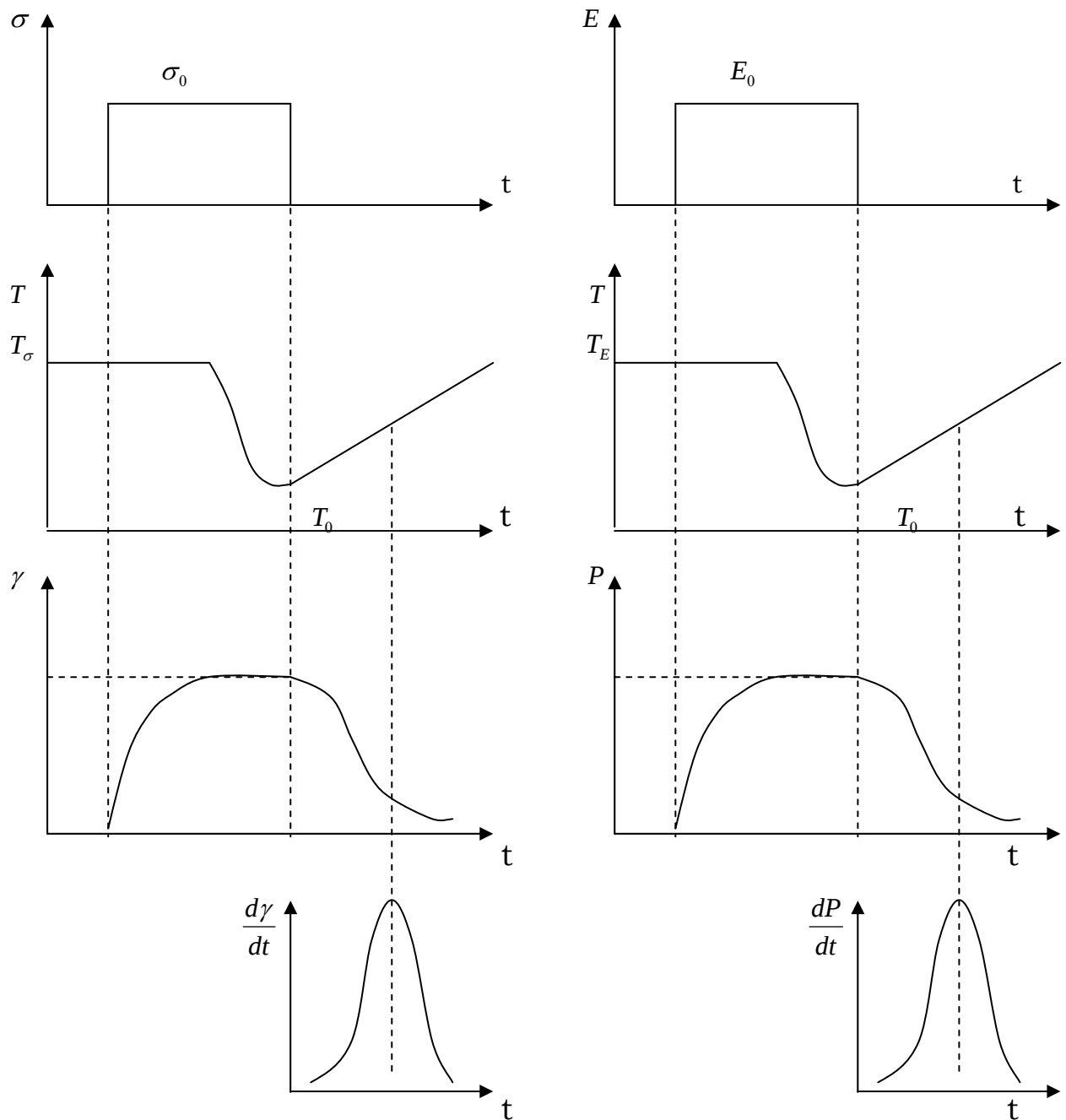
2.3. Courant & Fluage thermostimulés. [13, 14]

Un polymère¹ à temps de relaxation unique τ est soumis à une contrainte de cisaillement constante σ_0 à une Température T_{σ} pendant un temps t_{σ} .

Les unités mobiles du matériau prennent une direction privilégiée imposée par la contrainte, on refroidit alors l'échantillon jusqu'à une température T_0 assez basse pour geler la configuration des molécules. On supprime la contrainte puis on chauffe le matériau à Vitesse constante

$$T = T_0 + bt \quad (25)$$

¹ La technique du Fluage Thermo Stimulé (F.T.S.) a été mise au point au Laboratoire du Professeur Colette Lacabanne de l'Université de Toulouse [14]. Dans notre Laboratoire un banc de mesure F.T.S a été monté par Mohamed Khettab lors de la préparation de sa thèse de Magister [13].



Figures III.11. & III. 12 : Fluage thermo stimulé et du courant thermo stimulé

Le retour à l'état initial des unités mobiles provoqué par la remontée de température, permet de relever la déformation $\gamma(t)$ et sa dérivée $\dot{\gamma}(t)$ en fonction du temps et de la température (Fig III. 11).

Le thermo gramme $\dot{\gamma} = f(T)$ fait apparaître un pic de relaxation :

$$\dot{\gamma}(T) = \left[\frac{\gamma_0}{\tau(T)} \right] \exp \left[\frac{-1}{b} \int_{T_0}^T \frac{dT'}{\tau(T')} \right] \quad (26)$$

L'exploitation de ce pic permet de savoir si le temps de retard τ obéit à une loi d'Arrhénius

$$\tau(T) = \tau_0 \exp \left(\frac{E}{kT} \right) \quad (27)$$

Ou une loi de Vogel

$$\tau(T) = \tau_v \exp \left[\frac{a}{T - T_\infty} \right] \quad (28)$$

E est l'énergie d'activation, k la constante de Boltzmann et T_∞ la température à laquelle tout mouvement moléculaire est figé.

En électricité on obtient des résultats analogues en appliquant un champ E et en enregistrant le courant de dépolarisation thermostimulée (T.S.C.)²:

$$J(T) = \frac{dP}{dt} = \frac{P_0}{\tau(T)} \exp \left[\frac{-1}{b} \int_{T_0}^T \frac{dT'}{\tau(T')} \right] \quad (29)$$

Ces méthodes se sont avérées bien adaptées à l'étude des mécanismes moléculaires responsables des relaxations et transitions de phase dans les polymères, et sont largement utilisées dans notre laboratoire.

A titre d'exemple, nous avons effectué des mesures, sur des échantillons de PVC stabilisé, qui complètent celles de Souad Souilem [18].

² La technique des Courants Thermo Stimulés (T.S.C.) a été mise au point par Bucci et al. [15] lors de l'étude des cristaux ionique, elle a été appliquée aux polymères par l'équipe de C. Lacabanne [16]. Elle est largement utilisée au sein de notre équipe, depuis la thèse de Magister de A. Gourari [9].

3. Mesures de Courants thermostimulés avec du PVC

3.1. Principe :

L'échantillon est polarisé grâce à un champ électrostatique E_p (figIII. 12) à une température T_p durant un temps t_p , on le porte ensuite à basse température T_0 (température de l'azote liquide), il est alors court-circuité sur un électromètre qui mesure le courant de dépolarisation au cours d'une remontée linéaire en température. Ce courant passe par des maximums correspondant aux différentes relaxations et transitions dans le matériau. Les spectres des thermocourants sont en général complexes : ils traduisent l'existence d'une distribution des temps de relaxation. En adoptant des conditions de polarisation particulières, il est possible de les résoudre en 'spectres élémentaires' correspondant à un seul temps de relaxation.

3.2. Analyse d'un spectre élémentaire :

Suite à l'application d'un champ électrique E_p , l'échantillon acquiert une polarisation isotherme P_0 à la température T_p :

$$P_0 = \frac{N\mu^2}{3kT_p} E_p$$

N : nombre de dipôles par unité de volume
 μ : moment dipolaire de l'unité polarisée
 k : constante de Boltzmann

L'abaissement de la température fige cette polarisation. Lors d'une remontée linéaire en température, et dans l'hypothèse d'un temps de relaxation unique, la polarisation s'exprime par :

$$P(T) = \int_T^{\infty} J(T') dT'$$

Le temps de relaxation est alors obtenu par la méthode d'intégration partielle (figure III.14.) en utilisant la formule :

$$\tau(T) = \frac{P(T)}{J(T)}$$

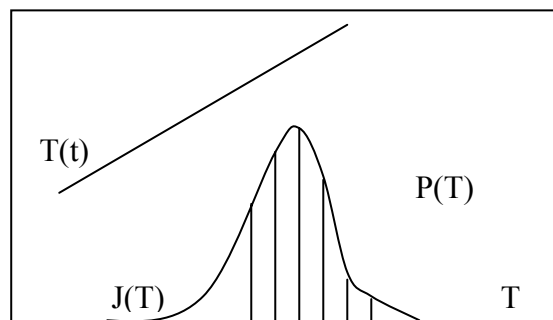


Figure III.14. : Exploitation d'un pic élémentaire de CTS par la méthode d'intégration partielle

Les variations de $\ln(\tau(t))$, en fonction de $1/T$, permettent de tirer les caractéristiques de chaque processus élémentaire, à savoir, l'énergie d'activation et le facteur pré-exponentiel τ_0 pour le processus activé.

3.3. Le Polymère :

Le matériau étudié est le chlorure de polyvinyle auquel on a ajouté un stabilisant à base de calcium et de zinc dans les proportions suivantes : 10g de stabilisant pour 100g de PVC à l'état de résine [18]. A l'état semi fini, après avoir mélangé le stabilisant et le PVC, il se présente sous forme de poudre blanche. Les échantillons sont obtenus en comprimant 200 mg de poudre, à l'aide d'une presse hydraulique, sous une pression de 10 tonnes/cm². On obtient des pastilles d'environ 1 mm d'épaisseur et de 10 mm de diamètre.

3.4. Dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental est décrit dans la thèse de Benrekaa [17] et celle de Souilem [18] par exemple. La pastille est placée entre deux armatures circulaires horizontales, en acier inoxydable, formant le condensateur porte échantillon. Ce dernier est suspendu par deux tiges métalliques reliées à l'alimentation électrique et au dispositif de mesure. L'ensemble est placé dans un cylindre, en acier inoxydable, qui sert de blindage électrostatique

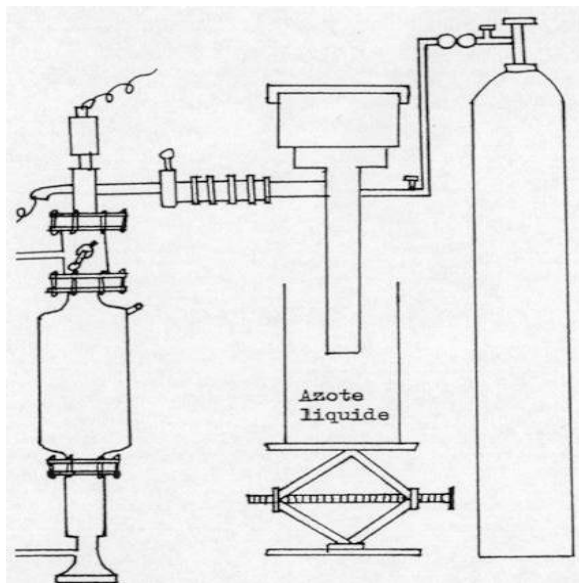
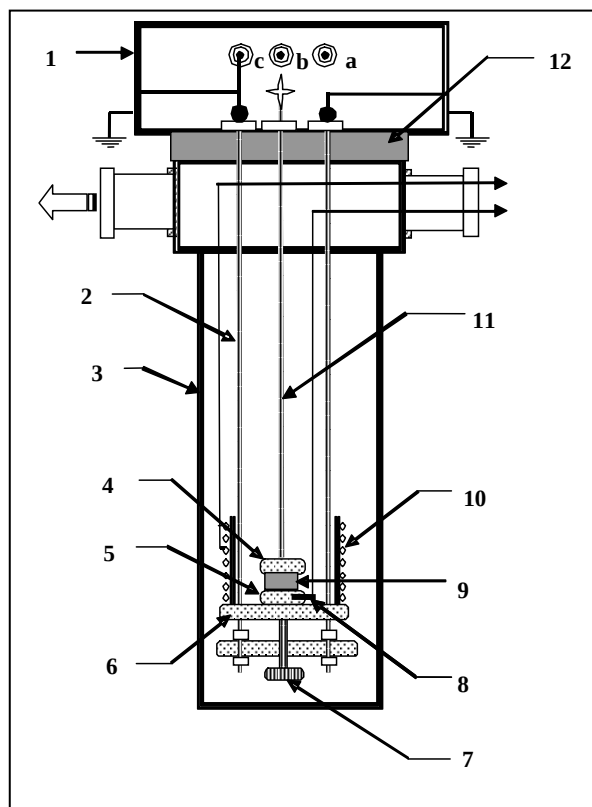


Figure III. 15: dispositif de mesure



- 1) Blindage électrostatique
- 2) Tige en acier reliée à la masse
- 3) Enceinte de mesure
- 4) Electrode de mesure
- 5) Electrode de masse
- 6) Support mobile
- 7) Vis de serrage
- 8) Sonde de température Pt100
- 9) Echantillon
- 10) Thermocoax
- 11) Tige rigide de mesure
- 12) Téflon

Figure III.16 : Cellule de mesure, (thèse N. Benekaa [17])

et à l'intérieur duquel on peut contrôler la pression et la température. Il est fermé, en haut par un couvercle en téflon à travers lequel passent les deux tiges électrodes. Il est muni de deux passages latéraux : le premier est relié à un groupe à vide permettant d'atteindre 10^{-5} mbar et à une bouteille d'hélium sec. Le second sert au passage des fils électriques reliés, les premiers à une résistance chauffante, de type thermocoax, enroulée autour du porte échantillon, et les seconds à une sonde de température. Cette enceinte peut être plongée dans un vase contenant de l'azote liquide. Elle est surmontée par une boîte de connexion qui permet d'effectuer les opérations de polarisation et de dépolarisation.

3.5. Résultats :

Spectre global :

Nous avons appliqué à l'échantillon une polarisation pendant $t_p = 3$ mn, avec un champ électrique constant $E_p = 3 \cdot 10^5$ V/m à une température de polarisation $T_p = 130^\circ\text{C}$. L'échantillon est ensuite court-circuité à la température $T_{cc} = 0^\circ\text{C}$. Nous avons obtenu un spectre complexe représenté sur la figure III.17. , ce dernier fait apparaître clairement deux pics situés respectivement à $T_{M1} = 96^\circ\text{C}$ et $T_{M2} = 130^\circ\text{C}$ désigné par pic α et pic à haute température.

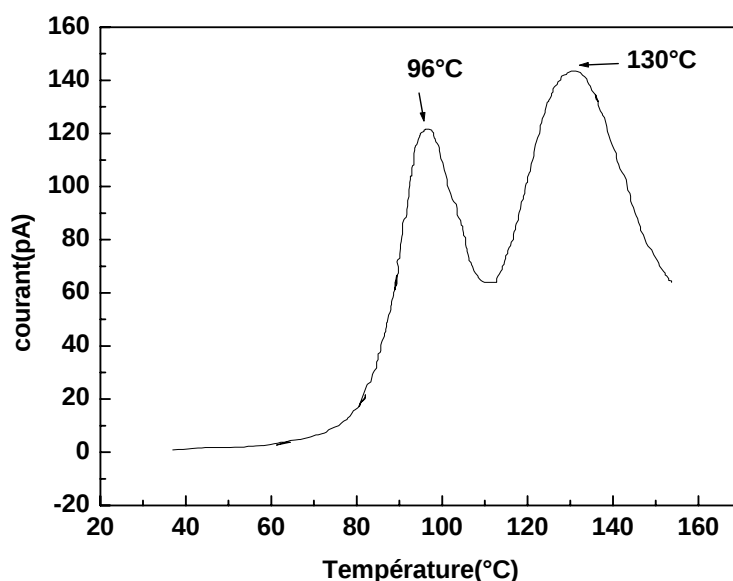


Figure III.17. : spectre global (PVC+10%stab)

Isolation du pic α

Pour isoler le pic à 96°C, l'échantillon est polarisé par un champ électrique $E_p = 3.10^5$ V/m, à $T_p = 95^\circ\text{C}$, pendant 3mn puis court-circuité à $T_{cc} = 0^\circ\text{C}$.

Le courant de dépolarisation est reproduit sur la figure III.18. Celle-ci fait apparaître un pic avec une température au maximum $T_M = 96^\circ\text{C}$, le pic s'étend sur une plage de température allant de 70°C jusqu'à 115°C , la largeur du pic à mi-hauteur est d'environ 15°C .

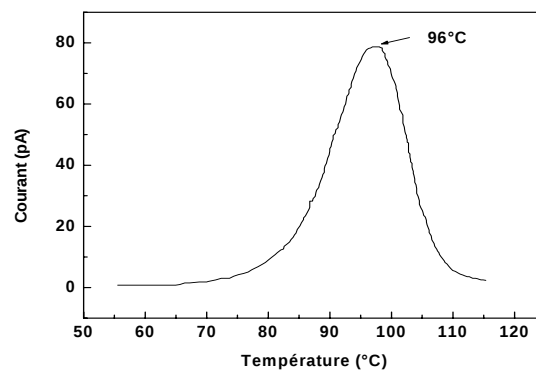


Figure III.18. : Pic isolé à 96°C

Décomposition du pic α

Le pic α a été décomposé en spectres élémentaires par la méthode des polarisations fractionnées. La figure III.19. représente les pics obtenus, l'enveloppe de ces pics reproduit qualitativement la forme du spectre initial. Les énergies d'activation $(\Delta H)_i$ et les facteurs pré-exponentiels τ_{oi} qui sont les paramètres caractéristiques de chaque processus élémentaire ont été obtenus après exploitation de chaque pic élémentaire (tableau 1). La méthode d'intégration partielle a été utilisée à cette fin. Signalons enfin que la résolution en spectres élémentaires a été effectuée en appliquant un champ $E_p = 3.10^5$ V/m sur des fenêtres de températures $[T_p, T_p - \Delta T]$ telles que $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ sur la gamme de température $[70^\circ\text{C}, 115^\circ\text{C}]$. Le diagramme d'Arrhénius des temps de relaxation τ_i en fonction $10^3/T$ relatif au pic à moyenne température est représenté sur la figure III.20.

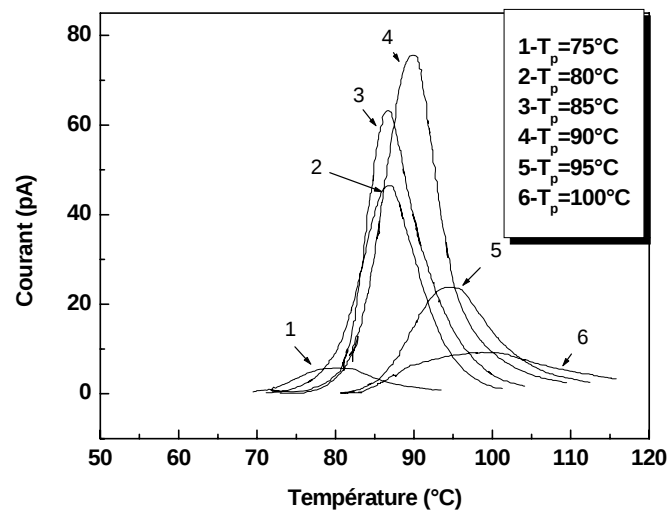


Figure III.19. : Décomposition du pic à moyenne température

T_p (°C)	T_{max} (°C)	ΔH (ev)	τ_0 (s)
75	89	1.33	$6.22 \cdot 10^{-21}$
80	94	1.87	$2.56 \cdot 10^{-26}$
85	94	2.49	$5.55 \cdot 10^{-35}$
90	97	1.84	$7.20 \cdot 10^{-40}$
95	102	3.42	$1.72 \cdot 10^{-47}$
100	108	4.03	$3.16 \cdot 10^{-56}$

Tableau (1): paramètres d'Arrhénus des spectres élémentaires associés au pic à moyenne température

3.6. Discussions

Nous avons pu, mettre en évidence deux modes de relaxations situés respectivement à $T_{M1}=96^\circ\text{C}$ et $T_{M2}=130^\circ\text{C}$. nous avons attribué le mode de relaxation apparaissant à 96°C à la transition vitreuse du matériau qui est généralement due à des phénomènes de réarrangement de segments de chaînes moléculaires.

Quant au mode de relaxation qui apparaît à 130°C, il vérifie bien la relation empirique de Boyer :

$$T_{el}[^{\circ}\text{K}]/T_g[^{\circ}\text{K}]\approx 1.2$$

Cette transition est attribuée d'après Boyer aux mouvements moléculaires de grandes amplitudes puisque, d'après le même auteur, elle correspond à la rupture des forces intermoléculaires.

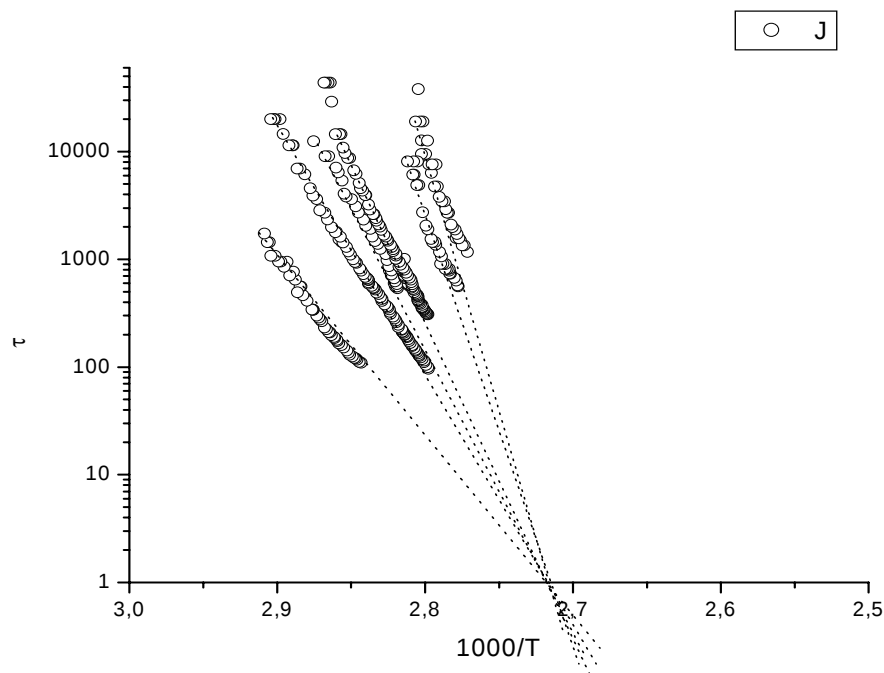


Figure III.20. : Diagramme d'Arrhénius relatif au mode de relaxation à moyenne température

L'exploitation des pics résolus, relatifs au mode α , nous a permis de tracer les diagrammes

$$\text{Ln}[\tau(T)] = f\left(\frac{10^3}{T}\right).$$

Les diagrammes obtenus correspondent à des temps de relaxation dont dépendance en température est bien décrite par des équations d'Arrhénius.

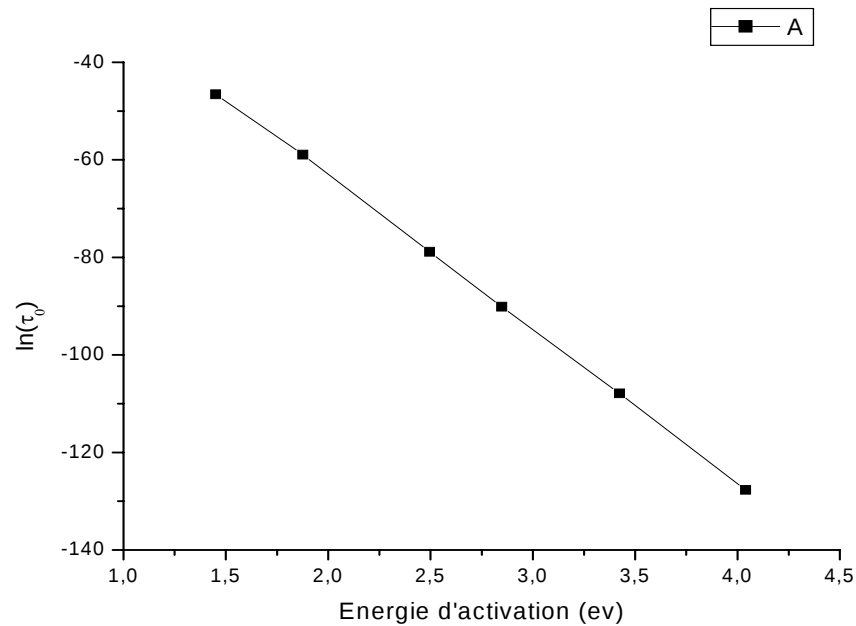


Figure III.21. : Variation de $\ln(\tau_0)$ en fonction de l'énergie d'activation

La linéarité de ces tracés nous a permis d'en déduire les paramètres caractéristiques du matériau, à savoir les énergies d'activation ΔH_i et les facteurs pré-exponentiels τ_{oi} . Nous avons constaté l'existence d'un phénomène de compensation dans le mode de relaxation qui apparaît à moyenne température.

En effet, on remarque que les 6 droites de la figure III.20 convergent vers un point dont les coordonnées déterminent les paramètres de compensation :

$$T_c = 94^\circ\text{C} \quad \text{et} \quad \tau_c = 1 \text{ s}$$

De plus le diagramme :

$$\ln(\tau_0) = f(\Delta H)$$

de la figure III. 21 illustre une bonne linéarité . Nous avons calculé la pente de cette droite et nous avons alors abouti à la température de compensation $T_c=93^\circ\text{C}$. Nous remarquons que cette valeur est décalée de celle calculée

graphiquement à partir des diagrammes d'Arrhénius, de 1°C . Nous avons accordé cette différence aux erreurs expérimentales.

L'existence de ce phénomène de compensation est propre à la phase amorphe mobile du polymère. Plusieurs auteurs [19], [20] associent l'apparition de ce phénomène à l'existence d'un ordre dans la phase amorphe du matériau.

4. Conclusion .

Ce chapitre a mis en évidence une analogie formelle entre la théorie de Debye qui explique, ici, les propriétés diélectriques des polymères et le modèle de Voigt qui traduit les caractéristiques mécaniques de ces matériaux. Ces deux théories sont structurées de la même façon : Les grandeurs électriques (E , P , dP/dt , ε^* , ε' , ε'') et les grandeurs mécaniques qui leur correspondent (σ , γ , $d\gamma/dt$, J^* , J' , J'') sont reliées par des lois qui s'expriment par des relations mathématiques absolument identiques.

Des techniques expérimentales, dont le principe est basé sur ces deux théories, ont été mises au point pour l'étude des propriétés physico thermiques des polymères. Elles ont montré que cette analogie formelle correspond, au niveau des mécanismes moléculaires, à une analogie substantielle : ce sont les mêmes mouvements de la chaîne principale, de segments de chaîne, ou de groupements latéraux qui se traduisent, à l'échelle macroscopique, par la réponse du matériau relevée par l'expérimentateur.

L'analogie permet de concevoir de nouveaux dispositifs expérimentaux. Ainsi la technique des courants thermo stimulés, mise au point par Bucci et al.[15] , dans les années soixante, s'étant révélée bien adaptée à l'étude des relaxations diélectriques des polymères, une méthode analogue, basée sur le fluage thermo stimulé, a été conçue, dans les années soixante dix. Ces deux techniques expérimentales sont complémentaires.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a montré le rôle éminemment important du raisonnement par analogie dans l'étude des matériaux, d'abord dans le cas des milieux magnétiques et diélectriques, puis, en ce qui concerne les polymères, lorsqu'il s'agit de considérer leurs propriétés mécaniques et diélectriques.

Dans ce dernier cas, il s'agit d'une analogie formelle associée à une analogie substantielle.

C'est au moment où le savant se trouve confronté à un problème nouveau ou qui n'a pas encore été résolu que le raisonnement par analogie peut se révéler utile.

C'est ainsi que le mathématicien Argand a pu découvrir la véritable nature des nombres complexes considérés depuis trois siècles déjà comme des nombres impossibles. Cette découverte a trouvé, par la suite de nombreuses applications notamment en électricité dans la représentation des grandeurs sinusoïdales. Elle a permis également l'introduction de la théorie des quaternions par Hamilton en 1843 qui a donné naissance au calcul vectoriel, suite aux travaux de Gibbs et Heaviside à la fin du XIX^{ème} siècle. Mais, lors de sa publication, aux Annales de Gergonne, l'article d'Argand fut sévèrement critiqué, parce que le raisonnement par analogie, utilisé, était jugé peu rigoureux par les mathématiciens.

De même, c'est une analogie fonctionnelle qui a permis à Ampère de donner une théorie du magnétisme qui allait à l'encontre de la théorie des fluides magnétiques adoptée par la communauté scientifique. Cette dernière est elle même issue, à partir d'un raisonnement par analogie, de la théorie des deux fluides électriques. Mais c'est l'hypothèse d'Ampère qui, malgré les violentes critiques dont elle fut l'objet, allait se révéler la plus féconde. Elle permit à

Conclusion

Weber puis à Langevin de proposer des théories du paramagnétisme et à Debye d'introduire la théorie dipolaire.

Cette étude a montré que l'analogie est un outil à double tranchant. *“ D'un côté, elle facilite le travail de recherche dans des voies inconnues en nous invitant à étendre l'acquis de nos connaissances à de nouveaux domaines.*

*Mais d'un autre côté, si on admet l'idée que le monde présente des aspects variés, l'analogie ne peut pas être étendue indéfiniment “*¹

En effet c'est parce que Ampère a voulu étendre le modèle newtonien à toutes les forces de la Nature qu'il n'a pas saisi l'originalité de la force découverte par Oersted et a laissé le champ libre à Faraday pour découvrir de nouveaux phénomènes en électromagnétisme.

Aussi comme l'a écrit Mario Bunge, il faut *“ aider la science à se débarrasser de son échafaudage heuristique qui, une fois le stade de la construction dépassé, risque de gêner l'édifice théorique dans son développement ultérieur.*²

¹ Bunge : Ref. [12] page 137

² Bunge page 159

Biographie des principaux savants

cités dans le mémoire

Aepinus Franz : physicien allemand, né en 1724 à Rostock en Allemagne, décédé en 1802 à Dorpat (Pays Baltes) enseigna la physique à St-Petersbourg. Ses travaux ont surtout porté sur l'électricité et le magnétisme, l'expérience d'Aepinus est à la base des cours d'électricité. Il a publié en 1759 un ouvrage intitulé : “ *Tentamen theoriae electricitatis et magnetismi*”.

Amagat Emile Hilaire : Physicien français (1841 – 1916) Ses travaux portent sur la thermodynamique.

Ampère André-Marie : Physicien et mathématicien français, né à Lyon le 20 janvier 1775, décédé à Marseille le 11 juin 1836. Autodidacte, il a appris les mathématiques et les sciences physiques en lisant des ouvrages scientifiques et l'encyclopédie .Il enseigna au lycée de Lyon puis à l'école polytechnique et au collège de France. Ses recherches ont porté sur les mathématiques et l'électricité. Ces travaux fondent l'électrodynamique et influencent considérablement la physique du XIXe siècle.(Voir Chapitre II)

Arago Francois : Astronome, physicien et homme politique français, né à Estagel dans les pyrénées-orientales le 26 février 1786, décédé à Paris le 2 octobre 1853. Ses études ont été consacrées à l'astronomie, au magnétisme et à la polarisation de la lumière.

Argand Jean-Robert : mathématicien suisse, né le 22 juillet 1768 à Genève, décédé le 13 août 1822 à Paris. Il exerça la fonction de libraire à Paris. En 1806 il publie une interprétation géométrique des nombres complexes qui passa inaperçue jusqu'à ce qu'elle soit reprise en 1813 dans les “Annales de Gergonne”. (Voir CH I .3)

Aristote : philosophe grec, né à Stagire en Macédoine, en 384 av. J-C, et décédé à chalcis en Eubée, en 322 av J.C. Elève de Platon, il fonde à Athènes le Lycée, il a été le précepteur d'Alexandre le Grand. Il est auteur d'un grand nombre de traités de logique, de physique et de métaphysique. Ses conceptions scientifiques ont servi de base à la physique jusqu' à Galilée.

Arrhénius Svante : (1859-1927) Physicien et chimiste suédois, il est l'auteur de la théorie de la dissociation électrolytique (1887) et donc l'inventeur du concept d'ions.

Bacon Francis : Homme d'état, scientifique et philosophe anglais. Il est né le 22 janvier 1561, à York House et mourut en 1626. Francis Bacon a contribué à la science, la philosophie, l'histoire et la littérature. Adversaire de la scolastique, il est le père de l'empirisme et de la méthode expérimentale.

Becquerel : Famille de physiciens français : **Becquerel Antoine** (1788, Châtillon-Coligny-1878, Paris) : En 1819, il découvre l'effet piézoélectrique dans les cristaux et met, en évidence, en 1827, le diamagnétisme, Son fils **Becquerel Alexandre Edmond** (1820, Paris -1891, id.) s'intéresse tout d'abord à la phosphorescence et à l'étude de la spectroscopie. Par la suite, ses recherches s'orientent vers le magnétisme, puis la conductibilité thermique des gaz. En 1855, il publie avec son père un "*Traité d'électricité et de magnétisme*" **Becquerel Antoine Henri** : fils du précédent , né le 15 décembre à Paris, et décédé le 25 aout 1908 au Croisic. Ses premiers travaux sont relatifs à l'optique. En 1896, Becquerel découvre la radioactivité alors qu'il faisait des recherches sur la fluorescence des sels d'uranium. Il partage, avec Pierre et Marie Curie, le prix Nobel de physique en 1903.

Bernard Claude : medecin et physiologiste francais, né à Saint-julien le 12 juillet 1813, décédé à Paris le 10 février 1878. Il est considéré comme l'un des principaux initiateurs de la démarche expérimentale hypothético-déductive.

Berzelius jons jacob : Célèbre chimiste suédois, né le 20 aout 1779 à Vaversunda Sorgard, décédé le 7 aout 1848 à Stockholm. Ses analyses chimiques étaient d'une grande précision. Il découvre plusieurs corps simples grâce au phénomène d'électrolyse après l'invention de la pile de volta. Il introduisit en chimie les notions et les mots allotropie, catalyse, isomérisation et protéine. Le système actuel de notation chimique fut adopté grâce à Berzelius qui le proposa en 1813. Berzelius fut l'un des premiers à publier une table des masses atomiques d'une exactitude satisfaisante. Il s'intéressa au magnétisme après l'expérience d'Oersted.

Biot jean-Baptiste : physicien francais, né à Paris le 21 avril 1774, et décédé dans cette même ville le 3 février 1862. Il formule , avec Félix Savart, la loi qui porte leurs noms. Les deux éditions de son traité de physique (Ref. [45] et [36] du chapitre II), la première en 1816 et la seconde en 1823 montrent le rôle fondamentale de l'expérience d'Oersted.

Bloch Félix : physicien suisse, né en 1905 à Zurich , décédé en 1983 . Ses travaux ont porté sur le magnétisme et la résonance magnétique nucléaire.

Boltzmann Ludwig-Eduard : physicien Autrichien, né le 20 février 1844 à Vienne, décédé en 1906 à Duino près de Trieste. Il est considéré comme le père de la physique statistique, fervent défenseur de l'existence des atomes.

Bombelli Raphael : mathématicien italien, né à Bologne en1526, décédé en 1572. Il découvre les "nombres complexes". Il est l'auteur d'un traité d'algèbre.

Brahé Tycho : astronome danois, né en 1546 à Knutstrop, en Scanie, décédé le 24 octobre 1601 à Prague. Ses observations, en astronomie, nombreuses et précises ont permis à Kepler de trouver les lois qui régissent le mouvement des planètes.

Cannizzaro Stanislao : Chimiste italien, né en 1826 à Palerme et décédé en 1910 à Rome. Il clarifia la distinction entre "atome" et "molécule" lors du Congrès de Karlsruhe en 1860.

Cardan Jérôme : mathématicien, philosophe et médecin italien, né à Paris, en 1501 décédé à Rome en 1576. Sa méthode de résolution des équations du troisième degré permit à Bombelli de découvrir les nombres "impossibles", qui deviendront nos nombres complexes au XIX^e siècle.

Carnéade : philosophe grec, né à Cyrène (Libye) v.219 av J.C, décédé à Athènes v. 129 av J.C. fut l'un des plus grands philosophes de la Nouvelle Académie et de l'Antiquité.

Cavendish Henry : physicien et chimiste anglais, né le 10 octobre 1731 à Nice, décédé le 24 février 1810 à Londres. Ses travaux en électricité, qui n'ont pas été publiés, sont connus grâce Maxwell (Voir page 31).

Cauchy Augustin Louis : mathématicien français, (1789 , Paris -1857 à Sceaux) la plus grande œuvre de Cauchy fut la mise en place de la théorie des fonctions holomorphes d'une variable complexe.

Coulomb Charles : physicien français, né le 14 juin 1736 à Angoulême, décédé le 23 août 1806, à Paris. Expérimentateur génial et très rigoureux, il réalise une expérience historique à l'aide d'une balance de torsion pour déterminer la force qui s'exerce entre 2 charges électriques ou 2 " masses magnétiques"

Curie Pierre : physicien français, né le 15 mai 1859 à Paris, décédé le 19 Avril 1906 à Paris. Sa thèse porte sur une étude expérimentale des propriétés magnétiques des corps à diverses températures. (Voir Ch II § 4). Ses travaux portent également sur la radioactivité. Il partage le prix Nobel, en 1903) avec son épouse **Marie Curie** (Varsovie 1867 – Sallanches 1934) et Henry Becquerel. Sa fille **Irène Joliot Curie** (Paris 1897 – Paris 1956) eut, avec son mari **Frédéric Joliot** (Paris 1900- id 1958), le prix Nobel en 1935, pour la découverte de la radio activité artificielle.

Dalton John : chimiste et physicien britannique, né le 6 septembre 1766 à Eaglesfield décédé le 27 juillet 1844 à Manchester. Il est plus particulièrement connu pour sa théorie atomique publiée en 1805.

Davy Humphry : chimiste et physicien britannique, né le 17 décembre 1778 à Penzance, décédé le 29 mai 1829 à Genève. il isola le sodium, le potassium, le baryum, le strontium et le calcium grâce à l'électrolyse .

Debye Peter Joseph William : physicien et chimiste néerlandais, né le 24 mars 1884 à, décédé le 2 novembre 1966 à. Sa contribution scientifique à l'étude des diélectriques et de la chimie moléculaire a été d'une importance capitale.

de la Rive Gaspard : physicien suisse (1770 – 1834), professeur de chimie à l'Université de Genève, son laboratoire était le mieux équipé en Europe : " Ses piles de Volta, par leur importance, n'avaient pas de rivaux sur le continent" et avec la collaboration de l'industrie horlogère suisse, il pouvait reproduire les appareils

Biographies

imaginés par Ampère. Son fils **de la Rive Auguste** a poursuivi les travaux de son père et a entretenu des liens étroits avec Ampère et Faraday. Son "Traité d'Electricité théorique et appliquée" est recommandé par Maxwell.

Descartes René : philosophe, mathématicien, physicien français, né à la Haye en Touraine, le 31 mars 1596, décédé à Stockholm, le 11 février 1650. Ses œuvres philosophiques et ses travaux scientifiques sont universellement reconnus. Selon Maxwell *"l'introduction des axes coordonnées en géométrie, due à Descartes a été un des plus grand progrès fait dans les mathématiques"*

Einstein Albert : physicien allemand, né le 14 mars 1879 à Ulm décédé Le 18 avril 1955 à Princeton Etats-Unis. Ses travaux ont porté sur la relativité , l'effet photoélectrique (prix Nobel 1921) et la mécanique statistique.

Euclide : mathématicien grec, né à Athènes vers 330 av J.C, décédé vers 230 av J.C. Ses *Éléments*, qui se composent de treize livres, constituent une synthèse de la géométrie grecque .

Euler Leonhard : Mathématicien et physicien suisse, né à Bale en 1707, décédé en 1783 à Saint-Petersbourg. Il contribua à l'essor de l'analyse mathématique et établit les équations générales de l'hydrodynamique.

Faraday Michael : Physicien et chimiste anglais, né à Londres le 22 septembre 1791, décédé à Hampton court le 25 août 1867. Ses travaux concernent l'électricité, le magnétisme et la chimie. On lui doit, entre autres, l'énoncé des lois de l'électrolyse, la découverte en 1831 de l'induction électromagnétique, et l'introduction du concept de champ.

Franklin Benjamin : Physicien américain, (1706, Boston – 1790, Philadelphie). Il est célèbre pour ses expériences sur la foudre. Il invente le paratonnerre et on lui doit les termes "batterie", "positif", "négatif", "charge", etc.

Galilée (Galileo Galilei) : physicien et astronome italien, né à Pise le 15 février 1564, décédé à Florence le 8 janvier 1642. Il étudie les mouvements et la chute des corps et défend les idées de Copernic et de l'héliocentrisme . Il inventa et perfectionna de nombreux instruments dont la lunette astronomique et le thermomètre. Il est considéré comme étant le fondateur de la physique moderne qui a mis fin aux théories d'Aristote et qui est basée sur l'expérience et les mathématiques. Il est l'auteur de la première théorie de la relativité.

Gergonne Joseph Diaz : Mathématicien français, né à Nancy en 1771, décédé en 1859. Il fonda en 1810 " les Annales de Mathématiques pures et appliquées".

Gibbs Josiah Willard : physico-chimiste américain, né le 11 février 1839 à New Haven, décédé le 28 avril 1903 à. Il est un des fondateurs de l'analyse vectorielle. En chimie physique, il est principalement connu pour ses travaux en thermodynamique, Ses plus importants travaux ont été publiés sous le titre *Équilibre des substances hétérogènes* (1876-1878) et constituent la base de la thermodynamique chimique.

Biographies

Gilbert William (Colchester, 1544 - Londres, 1603) Physicien et médecin anglais. Il s'intéressa à l'électricité et au magnétisme, il constate que l'ambre, la résine, le verre...se comportent, d'un point de vue électrique, de la même façon, mais pas les métaux.

Gonseth Ferdinand : philosophe et mathématicien suisse, né à Sonvilier en 1890, décédé en 1975.

Gray Stephen : astronome et physicien anglais, (Canterbury 1666 - Londres 1736). Ses travaux, sur la conduction électrique, lui ont permis de faire la distinction entre "conducteurs" et "isolants". Il découvrit l'électrisation par influence.

Green George : physicien britannique, (1793 - 1841). Auteur d'un Essai sur l'application de l'analyse mathématique aux théories de l'électricité et du magnétisme en 1928.

Hamilton William Rowan : mathématicien, physicien et astronome irlandais, (1805 - 1865). Il est connu pour sa découverte des quaternions mais il contribue aussi au développement de l'optique, de la dynamique et de l'algèbre. Ses recherches se révèlent importantes pour le développement de la mécanique quantique.

Heaviside Oliver : physicien britannique, autodidacte, (1850 - 1925) Entre 1880 et 1887 il développa le calcul opérationnel et l'analyse vectorielle. Ses travaux en électricité ont été remarquables.

Heisenberg Werner Karl : physicien Allemand, né le 5 décembre 1901 à Wurzburg, décédé le 1 février 1946 à Munich. Il développa le premier formalisme de la mécanique quantique, en 1925, et introduisit le "principe d'incertitude".

Hertz Heinrich Rudolf : physicien Allemand, (1857 -1894). Il met en évidence, en 1888, l'existence des ondes électromagnétiques découvertes par Maxwell en 1873.

Kant Emmanuel : philosophe Allemand, né le 22 avril 1724 à Königsberg, et y décéda le 12 février 1804. Il est considéré comme le père de la philosophie contemporaine. Il a apporté d'importantes contributions tant en théorie de la connaissance, qu'en éthique, en métaphysique ou en philosophie politique.

Kepler Johannes : Astronome Allemand, né le 27 décembre 1571 à Weil der Stadt, décédé le 15 novembre 1630 à Ratisbonne. Il a découvert les lois qui régissent les mouvements des planètes sur leurs orbites. Elles furent exploitées par Newton pour élaborer la théorie de la gravitation universelle.

Langevin Paul : physicien français, né à Paris le 1872, décédé 1946 à Paris. Ses travaux portent essentiellement sur le magnétisme.

Laplace Pierre-Simon : mathématicien, Astronome, Physicien français, né le 23 mars 1749 à Beaumont-en-Auge, en Normandie, décédé le 5 mars 1827 à Paris. Il est célèbre pour ses travaux en mécanique céleste et sur les probabilités.

Legendre Adrien-Marie : mathématicien français, (1752, Paris - 1833, Paris). Il s'intéressa à la théorie des nombres, aux algèbres abstraites et à l'analyse.

Leibniz Gottfried Wilhelm : philosophe, mathématicien Allemand, né à Leipzig, le 1 juillet 1646, décédé à Hanovre le 14 novembre 1716. Il met en place, indépendamment de Newton, les bases du calcul infinitésimal.

Lobatchevski Nicolai Ivanovitch : mathématicien russe,(1792, Nijni-Novgorod - 1856 Kazan). En 1837, il publie en France l'article Géométrie imaginaire dans lequel il met au point une géométrie non-euclidienne, appelée géométrie hyperbolique.

Lorentz Hendrik Antoon : Physicien hollandais (Arnhem 1853 – Haarlem 1928) .Il s'intéressa à la théorie électronique de la matière. Il expliqua la dispersion des ondes électromagnétiques (lumière) dans les diélectriques. Ses travaux ont servi de base à la théorie de la relativité restreinte. Prix Nobel en 1902.

Maxwell James Clerck : physicien écossais, né le 13 juin 1831 à Edimbourg, en Ecosse, décédé le 5 novembre 1879 à Cambridge. Il est célèbre pour sa théorie électromagnétique de la lumière (équations de Maxwell) et ses travaux en thermodynamique (statistique de Maxwell Boltzmann). Son " Traité d'électricité et de magnétisme" , traduit en plusieurs langues, a longtemps servi de référence

Mossotti Ottaviano Fabrizio (Novara, 1791- Pise, 1863), physicien et mathématicien italien . Il s'intéressa au comportement des diélectriques.

Musschenbroek Van Petrus : Physicien hollandais (Leyde 1692 – id 1761) inventeur du premier condensateur électrique (bouteille de Leyde)

Newton Isaac : philosophe, mathématicien, physicien, et astronome anglais, né le 25 décembre 1642 à Woolsthorpe , décédé en mars 1727 à Kensington. Il est à l'origine de la mécanique classique . Il inventa, en même temps que Leibniz , le calcul différentiel, qu'il nomma méthode des fluxions et qu'il utilisa pour formaliser sa description de la gravitation comme force d'attraction universelle.

Néel Louis Eugène Félix : physicien français, né à Lyon le 22 novembre 1904, décédé le 17 novembre 2000. Ses principaux travaux portent sur le magnétisme, il découvre le ferrimagnétisme et l'antiferromagnétisme. Il partage avec Alfvén le Prix Nobel de physique en 1970.

Planck Max Karl Ernst Ludwig : physicien Allemand,(1858 , Kiel – 1947, Gottingen). En 1900, Max Planck découvre la loi du rayonnement d'un corps noir qui va servir de base à la mécanique quantique.

Poincaré Henri : mathématicien, physicien et philosophe français, né le 29 avril 1854 à Nancy, décédé à Paris le 17 juillet 1912. Poincaré est le fondateur de la topologie algébrique. Ses principaux travaux mathématiques ont eu pour objet la géométrie algébrique. En physique, il peut être considéré comme le fondateur de la théorie de la relativité restreinte. En effet, les concepts de temps et d'espace ont été discutés par Poincaré et le principe de relativité émis avant 1905. L'article de Poincaré a été publié deux semaines avant qu' Einstein ne remette le sien aux "Annalen". Par contre la théorie de la relativité générale est l'œuvre du seul Einstein.

Biographies

Poisson Siméon Denis : mathématicien et physicien français, (1781, Pithiviers – 1840, Paris). En mathématiques, il développe la loi des grands nombres dans la théorie des probabilités. En physique, se basant sur la théorie de Coulomb, Poisson calcule la distribution des charges électriques sur la surface d'un conducteur. Il démontre par la suite que ces éléments sont applicables au magnétisme.

Oersted Hans Christian : physicien et chimiste danois, né le 14 août 1777 à Rudkøbing, décédé le 9 mars 1857 à Copenhague. En 1820 il découvre l'action d'un courant sur une aiguille aimantée : l'électromagnétisme était né.

Onsager Lars : chimiste norvégien (1903 Christiania – 1976, Miami) Prix Nobel 1968. Il s'intéressa à l'étude des diélectriques (Théorie d'Onsager)

Riemann Bernhard : mathématicien allemand, né le 17 septembre 1826 à Berselenz, Hanovre, décédé le 20 juillet 1866 à Selasca en Italie. Il est célèbre pour ses travaux en analyse et en géométries non euclidiennes

Savart Félix : médecin et physicien français, (1791 à Mézières - 1841 à Paris). Ses travaux portent sur l'acoustique et l'électromagnétisme : La loi de Biot-Savart.

Seebeck Thomas Johann : physicien allemand, né à Reval en Prusse orientale le 9 avril 1770, décédé le 10 décembre 1831. En 1821, il découvre l'effet Seebeck qui permettra la mesure des températures par thermocouples.

Thénard Louis Jacques : chimiste français, né le 4 mai 1777 à La Louptière, décédé le 21 juin 1857 à Paris. Il découvre l'eau oxygénée en 1818, le bore et établit une classification des métaux. Son " traité de chimie élémentaire" servira de référence dans la première moitié du XIX^{ème} siècle.

Thomson William (lord Kelvin) : physicien britannique, né en 1824 en Irlande, décédé en 1907 à Netherhall. Ses travaux portent essentiellement sur la thermodynamique et l'électricité.

Thomson Joseph John : physicien britannique, né le 18 décembre 1856, dans le Banlieue de Manchester, en Angleterre, décédé le 30 août 1940 à Cambridge. En 1897 que J.J. Thomson réalise une série d'expériences qui amenèrent la découverte de l'électron. Prix Nobel 1906.

Volta Alessandro : physicien italien, né le 18 février 1745 à Come, décédé le 5 mars 1827 à Come. Il est l'inventeur de la pile électrique.

Von Guericke Otto : physicien allemand, né le 20 décembre 1602 à Magdebourg, décédé en 1686 à Hambourg. Guericke invente, une première machine électrostatique composée d'un globe de soufre que l'on électrise en le frottant avec la main.

Weber Wilhelm Eduard : physicien allemand, né le 24 octobre 1804 à Lutherstadt, Allemagne, décédé le 18 juillet 1891 à Göttingen. Ses travaux portent sur l'électromagnétisme

Biographies

Weiss Pierre : physicien français (1865 – 1940) , célèbre pour sa théorie du ferromagnétisme : formule de Curie Weiss.

Wessel Caspar : mathématicien norvégien (Vestby 1745 – Copenhague 1818) Il eut un emploi au service de la triangulation et de la cartographie de l'Académie royale du Danemark. Il présenta à cette académie un mémoire sur la représentation géométrique des nombres complexes, mais ce travail ne fut publié qu'un siècle plus tard.

Sources : Encyclopédie Encarta, Encyclopédie Wikipedia , Dictionnaire Larousse, Internet, et ouvrages Ref. Chapitre I [19], [20], Chapitre II [1], [2], [3], [4], [9].

Bibliographie

Bibliographie du chapitre I

- [1] CHABIN D. & MARIMBERT J.J. : *Philosophie* Ed. Vuibert 2000
- [2] CUVILLER A. : *Nouveau précis de philosophie* Tome 1 Ed. Armand Colin 1970
- [3] VIRIEUX-REYMOND A. : *Introduction à l'épistémologie* Ed. PUF 1972
- [4] VIRIEUX-REYMOND A. : *La logique formelle* Ed. PUF 1975
- [5] Cavailler F. : *Manuel de Philosophie* Ed. Ellipses 2003
- [6] Poincaré H. : *La science et l'hypothèse* Flammarion 1902 Reéd. Flammarion 1968
- [7] Lachelier J. : *Du fondement de l'induction* Thèse Paris 1871 Réédité par A. Fayard 1992
- [8] Ampère A.M. *Théorie mathématiques des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience.*
Editions Firmin Didot (1827) Réédité par Jacques Gabay 1990
- [9] Robardet G. *Enseigner les sciences physiques à partir de situations – problèmes* BUP N° 720, p. 17 – 28, (1990)
- [10] Dorolle M. *Le raisonnement par analogie* Ed. P.U.F. 1949
- [11] Grenet P. *Les origines de l'analogie* Editions contemporaines Bolvin 1948
- [12] Bunge M. : *Philosophie de la physique* Trad. F. Balibar Ed. du Seuil Paris 1975
- [13] Bolmont E. *Le rôle épistémique des analogies à l'exemple de l'électricité du magnétisme et de l'électromagnétisme au XIX^{ème} siècle* Thèse Nancy 1999
- [14] Belhous K. , Bendaoud M. *Champ et induction dans les milieux magnétiques & diélectriques : Aspects épistémologique & didactique*
SNMMS' 2005 : Tébessa Mai 2005
- [15] Bendaoud M. : *Vibrations et Ondes* Tome 1 Ed. O.P.U Alger 1979
- [16] Abdedou F. : *L'outil mathématique en électromagnétisme*
Mémoire de D.E.S USTHB Alger 2005
- [17] Cauty André : *Regards croisés sur la droite réelle* Amérindia N° 17
pages 173-180 , 1992 <http://www.vjf.cnrs.fr>
- [18] Lounis A. : *Considérations historiques et difficultés d'élèves à propos des grandeurs vectorielles* B.U.P. N° 721 , 1996

bibliographie

- [19] Wessel C. : *Essai sur la représentation analytique de la direction*
Copenhague 1897
- [20] Argand R. : *Essai sur une manière de représenter les quantités imaginaires*
Annales de Mathématiques pures et appliquées de Gergonne T. IV, 1813
Réédité par A. Blanchard Paris 1971
- [21] Bendaoud M. & Traïche R. *Innovation et tradition :Cas de la découverte d'Argand et de la théorie d'Ampère.* Congrès du CTHS Grenoble Avril 2006

Bibliographie du chapitre II

- [1] Devaux P. : *Histoire de l'électricité* Ed. P.U.F. 1954
- [2] Rosmorduc J.: *Histoire de la Physique* Tomes I & II Ed. Lavoisier 1987
- [3] Locqueneux. R. : *Histoire de la Physique* Ed. P.U.F. 1987
- [4] Bensaude B. & Stenger P. *Histoire de la chimie* Ed. La Découverte. 1995
- [5] Einstein A. : *Conceptions scientifiques* Trad. Solovine Ed. M. Flammarion 1990
- [6] Maxwell J. C.: "*Traité d'électricité et de magnétisme* " Tome 1 : Electricité
Trad Seligman Lui, Ed. Gauthier Villars Paris 1885
- [7] Maxwell J. C.: "*Traité d'électricité et de magnétisme* " Tome 2 : Magnétisme
Trad Seligman Lui, Ed. Gauthier Villars Paris 1885
- [8] de la Rive Auguste.: "*Traité d'électricité Théorique & Appliquée* " Tome 1 :
Ed. Baillères Paris 1854
- [9] Blondel . C.: "*Ampère et la création de l'électrodynamique*"
Ed. Bibliothèque Nationale, Paris 1982
- [10] Faraday M. . : "*Experimental Researches in Electricity* " 3 Tomes,
Ed. R. Taylor & W. Francis London 1855
- [11] Mascart E : *Leçons sur l'Electricité et le Magnétisme* Ed. Gautheirs –Villars 1896
- [12] Herpin A. : "*Théorie du magnétisme* " Ed . P.U.F 1968
- [13] Weiss P. et Fox " *Le Magnétisme* " Ed. Armand Colin Paris 1951
- [14] Néel Louis. *Thèse* Strasbourg 1931
- [15] Néel Louis. " *Propriétés magnétiques des Ferrites. Ferrimagnétisme et Antiferromagnétisme*". Ann. Phys. 3, 137, 1948

- [16] Guyot M. *Science of ferrites in the 20th and 21st centuries*
Conference Kyoto (Japan) Sept 2000
- [17] Böttcher J.C.F. & Bordewijk P. : *Electrical Polarization* 2 Tomes
Ed. Elsevier 1978
- [18] Mossotti P.F. Bibl. Univ. Modena 6, p 193, 1847
- [19] Cole K.S. & Cole R.H. J. Chem. Phys. 9, p 341, 1941
- [20] Merz W.J. *Ferroelectricity* in " *Progress in dielectrics*" by Birks
Vol.4, p. 103-143 Ed. Heywood & Compagny, London 1962
- [21] Tareev B. *Physics of Dielectric Materials*, Ed. Mir Moscou 1979
- [22] Sawyer C.B. Tower C.H.: *Rochelle salt as a dielectric*, Phys. Rev. 35, p 269 1930
- [23] Durand E. *Electrostatique* 3 tomes Ed. Masson 1964
- [24] Ampère A.M. *Théorie mathématiques des phénomènes électrodynamiques
uniquement déduite de l'expérience*
Editions Firmin Didot (1827) Réédité par Jacques Gabay (1990)
- [25] Ampère A.M. *Mémoires sur l'électromagnétisme et l' électrodynamique*
Publié par M. Solovine Editions Gauthier Villars (1921)
- [26] Dhombres J. *Nombre, Mesure et Continu. Epistémologie & Histoire*
Ed. Fernand Nathan 1978
- [27] Dieudonné J. *Abrégé d'histoire des mathématiques* Ed. Hermann 1978.
- [28] Biot J.P. et Savart N.P. *Note sur le magnétisme de la pile de Volta*
Annales de Chimie et de Physique Vol 15 p. 222 1820.
- [29] Oersted H.C. *Expérience sur l'effet du courant électrique sur l'aiguille aimantée*
Ann. Chim. Phys. 14 417 – 25 (1820)
- [30] J.N.P. Hachette : *On the Electro Magnetic Experiments of MM. Oersted and
Ampère* Phil. Mag. Vol 57, N° 273 p. 40-47 1821
- [31] Williams L. Pearce: in *Faraday Rediscovered*
American Institute of Physics p. 83 -104 , 1989
- [32] Davy H. *On the magnetic phenomena produced by electricity*
Phil. Trans. 111 7 – 19 (1821).
- [33] Faraday M. *Sur les mouvements électro magnétiques et la théorie du
magnétisme* Ann. Chim. Phys. 18 337 – 70 (1821)
- [34] Ampère A. M. *Note relative au mémoire de M. Faraday*
Ann. Chim. Phys. 18 370 – 9 (1821).
- [35] de Launey L.: *Correspondance du grand Ampère* 3. Vol Ed. Gauthier Villars 1936
- [36] Biot J.B. : *Précis élémentaire de physique* Deuxième édition : 1823.

bibliographie

- [37] Faraday M. *Historical sketch of electro magnetism*
Ann. Phil. 18 195 - 200 & 274 - 90 & 19 107 - 21 (1821)
- [38] Faraday M. *On the induction of electric currents*
Phil. Trans. 122 125 - 62 ERE, 2, 140 - 264 (1832)
- [39] Ampère A.M. *Réponse de M. Ampère à la lettre de M. Van Beck*
J. Phys. 93, p 447-467 1821.
- [40] Coulomb Ch.A.. : *Mémoires relatifs à la physique* regroupés par Potier
Réédités par la Librairie Scientifique & Technique Paris 2002
- [41] Weber W. : *Ueber den Zusammenhang der lehre von diamagnetismus mit der lehre Magnetismus und der Electricität*
Annalen der Physik und Chemie p. 145 -189 LXXXVII N° 10 1852
- [42] Faraday M. : *Experimental Research* 1838
- [43] Müller J. : *Ueber die Magnetisirung von Eisenstäben durch den galvanischen strom.* Annalen der Physik und Chemie p. 337 LXXIX 1850
- [44] Curie Pierre. *Propriétés magnétiques des corps à diverses températures .*
Annales de Chimie et de Physique 7^{ième} Série t. V p. 289, 1895
- [45] Biot J.B. . *Traité de physique expérimentale et mathématique*
Tome 3, Ed. Deterville Paris 1816
- [46] Langevin Paul *Magnétisme et théorie des électrons*
Ann. de Chimie et Physique 5, 70 1905
- [47] Boltzmann Ludwig : *Leçons sur la théorie des gaz* Ed J. Gabay 1990
- [48] Curie Pierre. *Propriétés magnétiques des corps à diverses températures .*
Annales de Chimie et de Physique 7^{ième} Série t. V p. 289, 1895
- [49] Bruhat G. *Cours de Physique Générale : Mécanique*
5^{ième} Edition revue par Foch A. Masson 1955.
- [50] Bouasse H. *Cours de magnétisme et d'électricité* Tome 2
Ed. Delagrave Paris 1916
- [51] Debye P. Physik Z. 13, 97, 1912 in Debye P. *Polar Molecules*
Ed. Dover Pub. Inc. 1929
- [52] Faraday Michael. *Note on new electro magnetical motions*, Quart. J. sci. 12 , p 416 – 421, 1822.

Bibliographie du chapitre III

- [1] Etienne S. et David L. *Introduction à la physique des polymères* Ed. Dunod 2002

- [2] Buvet R in Champetier G. *Chimie macromoléculaire* Tome 1 pages 305-319
Ed. Hermann 1970
- [3] Boudet Alain, *Les polymères, structures et propriétés*
<http://www.techno-science.net/?onglet=article>
- [4] Marchelli.Renzo : *Les matières plastiques*
<http://www.sandretto.it/museonew/france/marchelli.htm> 2006
- [5] Boyer R.F. . *Encyclopedia of Polym. Sci.* 17 , 23 1989
- [6] Böttcher J.C.F & Bordewijk P. : *Electrical Polarization* 2 Tomes
Ed. Elsevier 1978
- [7] Von Hippel A. R. *Les diélectriques & leurs applications* Ed. Dunod Paris 1961
- [8] Blythe A.R. *Electrical properties of polymers* Cambridge University Press 1977
- [9] Gourari A. : *Thèse de Magister* Alger 1982
- [10] Newmann R.M. & Mac Knight W.J.: *Journal of Polym. Sc. Physics* Ed.
Vol. 19, p. 639, 1981
- [11] Gourari A., Bendaoud M, Lacabanne C & Boyer R.F.
Journal of Polym. Sc. Physics Ed. Vol. 23, N°5, p. 889-916, 1985
- [12] Nielsen L.E.. : *Mechanical Properties of Polymers and Composites*
Ed. M. Dekker inc New York , 1973
- [13] Khettab M. *Thèse Magister* Alger 1987
- [14] Lacabanne C, Goyaud P, Boyer R.F. *Journal of Polym. Sc. Physics* Ed.
Vol. 18, p. 277, 1980
- [15] Bucci C. , Fieschi R. *Phys. Rev. Letter* 12, 16 , 1964
- [16] Lacabanne C, Chatain. J. *Physique Chimie* 79, p. 283, 1975
- [17] Benrekaa N. *Thèse Doctorat* Alger 2005
- [18] Souilem S . *Thèse Magister* Alger 2005
- [19] Benrekaa N , Gourari A, Bendaoud M, Aït Hamouda K
Thermochimica Acta 413, p . 39-46, 2004
- [20] Diaz J.N., Marat-Mendes . *Proceedings on Electrets* , 1999

