UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Concept de magnétisme et enseignement de la physique au Burundi : cas de la mairie de Bujumbura

NININAHAZWE, Phocas; Sous la direction du : Dr BANUZA Alexis

2018-10
UB, INSTITUT DE PEDAGOGIE APPLIQUEE
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1035

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI

INSTITUT DE PEDAGOGIE APPLIQUEE
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE - TECHNOLOGIE

CONCEPT DE MAGNETISME ET ENSEIGNEMENT DE LA PHYSIQUE AU BURUNDI : CAS DE LA MAIRIE DE BUJUMBURA

Par :
NININAHAZWE Phocas

Sous la direction du :

Dr BANUZA Alexis

Mémoire présenté et défendu publiquement en vue de l'obtention du grade de Licencié en Pédagogie Appliquée, Agrégé de l'Enseignement Secondaire en Physique

Bujumbura, 18 octobre 2018

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY :

Président du Jury : Pr BAHASHU Mathias

Directeur du mémoire : Dr BANUZA Alexis

Secrétaire du Jury : Mr NSENGIYUMVA Ildephonse

DEDICACE :

A notre regretté Père ;

A notre mère ;

A nos frères et sœurs vivants et défunts ;

A tous les éducateurs ;

A tous nos amis ;

A tous ceux qui nous sont chers ;

Nous dédions ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Au terme de notre travail, nous sentons un agréable devoir d'exprimer nos sentiments de reconnaissance envers toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Notre profonde reconnaissance s'adresse plus particulièrement à Dr Banuza Alexis qui a accepté la direction de ce mémoire en dépit de ses multiples occupations. Ses conseils judicieux et sa rigueur scientifique nous ont été d'une grande utilité. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Nos vifs remerciements vont également à l'endroit des membres du jury pour le temps sacrifié à lire ce travail et de procéder à son évaluation.

Nos sincères remerciements s'adressent aussi à tous les formateurs depuis l'Ecole Primaire jusqu' à l'Université, spécialement ceux du Département de Physique –Technologie. Qu'ils trouvent dans ce mémoire le fruit de leurs efforts dans leur métier de former et d'éduquer.

Que notre profonde gratitude parvienne spécialement à notre regretté Père et notre mère qui ont guidé nos pas vers l'école, qu'ils trouvent ici l'expression de nos sincères remerciements.

Notre reconnaissance va également à l'endroit de nos frères et sœurs, de la famille de Mr Dominique Nyandwi, de P. Rodrigo Delazar, de P. Mario Pulcini, de P. Claudio Jeria, de Mr Mauricio Cox, de A. J. Bosco Nintunze, de Mme Josette Pascale Ngendakumana et de ma cousine Nelly Nanette Inamuco, pour le soutien tant moral que matériel qu'ils nous ont accordé. Qu'ils trouvent satisfaction et honneur dans ce mémoire.

Nous remercions aussi tous nos enquêtés qui ont inconditionnellement accepté de répondre à notre questionnaire d'enquête.

Nous pensons également à tous nos camarades qui ont rendu le climat agréable durant notre séjour à l'Université du Burundi.

A toute personne dont le nom n'est pas explicitement cité mais qui, d'une manière ou d'une autre, a contribué à l'exécution de ce travail, nous disons sincèrement merci.

NININAHAZWE PHOCAS

RESUME

L'enseignement -apprentissage au Burundi s'effectue dans le cadre du nouveau programme fondé sur "l'Approche Par les Compétences : APC ". Les élèves sont mis en activités dans une nouvelle pédagogie de type socioconstructiviste.

C'est dans ce contexte que nous avons cherché à caractériser les connaissances des élèves sur le concept magnétisme en physique après une séquence d'enseignement-apprentissage en magnétisme. Ce travail s'inscrit dans une série de recherches initiées par le Centre de Recherche en Didactique des disciplines des Sciences (CRDS) depuis 2010 plus large pour tenter de comprendre les nombreuses difficultés des élèves de seconde en physique et proposer des solutions. Le but de notre travail étant de savoir comment l'enseignement-apprentissage du concept de magnétisme est abordé et connaître son impact sur les acquis éventuels des élèves ; préoccupation qui constitue le nœud de notre étude.

Un système éducatif est un tout cohérent. Il constitue une unité fonctionnelle. Un manquement constaté dans l'une de ses composantes entraîne à court ou à long terme un manquement de tout système. En plus, des études menées sur l'apprentissage des concepts du cours de physique approuvent les difficultés qu'éprouvent les élèves à s'éloigner des conceptions populaires au profit des connaissances scientifiques qu'ils apprennent à l'école.

Pour répondre à la problématique, nous avons consulté les programmes, les manuels et les cahiers des élèves dans le but de constater la part du concept de magnétisme dans l'enseignement de la physique au Burundi ; contacté les enseignants sous formes d'interview afin de se rendre compte de comment le concept de magnétisme est enseigné et recouru au questionnaire d'enquête pour tester si les élèves maîtrisent le concept de magnétisme.

Comme résultats, le concept de magnétisme occupe une part importante sur le programme, le concept de magnétisme n'est pas bien enseigné et les élèves ne maîtrisent pas le concept de magnétisme.

Mots clés : magnétisme, maîtrise conceptuelle, enseignement secondaire

ABSTRACT

Teaching- learning in Burundi takes place within the framework of the new program based on the « Skills-Based Approach: APC". Students are put into activities in a new socio-constructivist type pedagogy.

It is in this context that we sought to characterize learners' knowledge of the magnetism in physics after a teaching-learning sequence in magnetism. This work is part of a broader series of research initiated by the Center for Research in Didactics of Science Disciplines (CRDS) since 2010 to try to understand many difficulties in 2nd Poste Fundamental Science in physics and to propose solutions. The aim of our work is to know how the teaching-learning of the concept of magnetism is approached and to know its impact on the possible achievements of the learners, preoccupation which constitutes the crux of our study.

An education system is a coherent whole. It constitutes a functional unit. A failure noted in one of its components leads in the short or long term to a failure of any system. In addition, studies carried out on the learning of physics course concepts support the difficulties learners experience in moving away from popular conceptions in favor of the scientific knowledge they learn at school.

To answer the problem, we consulted the programs, textbooks and learners' notebooks in order to note the role of the concept of magnetism in the teaching of physics in Burundi, contacted teachers in the form of interviews in order to find out how the concept magnetism is taught and used the survey quiz to test whether learners have mastered the concept of magnetism.

As results, the concept of magnetism occupies an important part of the program, the concept of magnetism is not taught well and learners do not master the concept of magnetism.

Keywords: magnetism; conceptual mastery, secondary education.

TABLE DES MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY : i

DEDICACE : ii

REMERCIEMENTS iii

RESUME iv

ABSTRACT v

TABLE DES MATIERES vi

SYMBOLES ET SIGLES xii

LISTE DES TABLEAUX xiv

LISTE DES FIGURES xv

AVANT-PROPOS xvii

0. INTRODUCTION GENERALE 1

0.1. Justification du choix du sujet de recherche 1

0.2. Problématique 1

0.3. Hypothèses de recherche 4

0.4. Délimitations et composition de notre travail 4

CHAPITRE I : **NOTIONS DE MAGNETISME** 6

I.1. Historique du magnétisme 6

I.1 1. De l'antiquité au XVII^{ème} siècle 6

I.1.2. XVIII^{ème} Siècle 7

I.1. 3. XIX^{ème} siècle : la révolution de l'électromagnétisme 8

I.1. 4. XX^{ème} siècle : des progrès Scientifiques et techniques 10

I.1.5. XXI^{ème} Siècle 11

I.2. Le magnétisme 11

I.2. 1. Définition 11

I.2.2. L'aimant 12

I.2.2.1. Métaux magnétiques et non magnétiques 13
I.2.2.1.1. Matériaux magnétiques 13
I.2.2.1.2. Métaux non magnétiques 13
I.2.2.2. Types de matériaux magnétiques 13
I.2.2.2.1. Diamagnétisme 13
I.2.2.2.2. Paramagnétisme 14
I.2.2.2.3. Ferromagnétisme 14
I.2.2.2.3.1. Matériaux magnétiques doux 15
I.2.2.2.3.2. Matériaux magnétiques durs 15
I.2.2.3. Types d'aimant 18
I.2.2.3.1. Aimants naturels 18
I.2.2.3.2. Aimants artificiels 18
I.2.2.4. Boussole et pôles magnétiques d'un aimant 19
I.2.2.5. Action magnétique entre deux aimants 19
I.2.3. Notion de masses magnétiques et loi de Coulomb 20
I.2.3.1. Notion de masses magnétiques 20
I.2.3.2. Loi de Coulomb 20
I.2.4. Champ magnétique 20
I.2.4.1. Les lignes de champ 21
I.2.4.2. Le champ magnétique uniforme 22
I.2.4.3. Le moment magnétique 22
I.2.4.4. Le champ magnétique terrestre 23
I.2.4.4.1. Applications du champ magnétique terrestre 24
I.2.4.4.1.1. La boussole 24
I.2.4.4.1.2. Un bouclier protecteur de la vie 24
I.1.4.4.1.3. Un des moyens de guidage d'animaux migrateurs 25
I.2.4.5. Les monopôles 25

I.2.4.6. Champ magnétique créé par un courant 26
I.2.4.6.1. Quelques faits historiques 26
I.2.4.6.2. Exemples de calcul 28
I.2.4.6.3. Conclusion 31
I.2.4.7. Champ magnétique engendré par un aimant 31
I.2.4.8. Induction magnétique et auto-induction 31
I.2.4.8.1. Induction magnétique 31
I.2.4.8.1.1. L'induction de Lorentz 32
I.2.4.8.1.2. L'induction de Neumann 32
I.2.4.8.2. Auto-induction 32
I.2.5. Flux magnétique 33
I.2.6. Forces magnétiques 33
I.2.6.1. Force de Lorentz 33
I.2.6.2. Force de Laplace 34
I.2.7. Effet Hall 35
I.2.8. Aimantation du fer et de l'acier : électro-aimant 35
I.2.8.1. Explication du phénomène : perméabilité magnétique 35
I.2.8.2. Cycle d'aimantation ou cycle d'hystérésis 36
I.2.8.3. Les électro-aimants 37
I.2.8.3.1. Principe 37
I.2.9. Applications du magnétisme 38
I.2.9.1. Applications quotidiennes 38
I.2.9.1.1. Plaques à induction 38
I.2.9.1.2. La recharge par induction des batteries 38
I.2.9.2. Applications de l'électro-aimant 38
I.2.9.2.1. Electroaimant 38
I.2.9.2.1.1. Loquet de porte à électro-aimant : 39

I.2.9.2.1.2. Les disques durs 39
I.2.9.2.1.3. Bande magnétique 40
I.2.9 .2.1.4. Autres exemples d'utilisations 41
I.2.9.3 Applications médicales 41
I.2.9.3.1. Imagerie et caractérisation médicale 41
I.2.9.3.2. Les différents principes d'imagerie médicale 42
I.2.9.3.2.1. Rayons X 42
I.2.9.3.2.2. Les ultrasons 43
I.2.9.3.2.2.1. L'échographie 43
I.2.9.3.3. Le champ magnétique : l'imagerie par résonance magnétique (IRM) 43
I.2.9.3.4. Les rayons gamma : la scintigraphie 43
I.2.9.4 Applications liées au transport 44
I.2.9.4.1. Train à sustentation magnétique 44
I.2.9.4.2. Freinage magnétique 44
I.2.9.4.3. Capteurs magnétiques 45
I.2.9.5. Applications en électrotechnique 45
I.2.9.5.1. Les transformateurs 45
I.2.9.5.2. Les relais électromécaniques 46
I.2.9.5.3. Moteurs électriques 46
I.2.9.5.4. Génératrice 48
I. 3. Quelques expériences simples en magnétisme 48
I.3.1. Champ magnétique créé par un fil rectiligne 48
I.3.1.1. Introduction 48
I.3.1.2. Matériel 49
I.3.1.3. Montage et réalisation 49
I.3.2. Un petit moteur 49
I.3.2.1. Matériel 50

I.3.3. Fabriquer un électroaimant 52

I.3.3.1. Matériel 52

CHAPITRE II. METHODOLOGIE DE RECHERCHE 56

II.1. Cadre méthodologique 56

II.2. Population d'enquête et échantillon 56

II.2.1. Population d'enquête 56

II.2.2. Echantillon d'enquête 56

II.3. Méthodes de recherche 57

II.3. 1.Questionnaire d'enquête 57

II.3.1.1. Composition du questionnaire et son administration 58

II.3.1.2. Dépouillement des réponses au questionnaire 58

II.3.2. Etude documentaire 58

II.3.3. Interview 59

CHAPITRE III : PRESENTATION, ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS 60

III.1. La part du concept de magnétisme dans les programmes d'enseignement de physique au Burundi 60

III.2. La part du magnétisme dans les manuels d'enseignement du cours de physique au niveau du cycle supérieur de l'enseignement secondaire. 66

III.3. Analyse des cahiers des élèves 66

III.4. Résultats de l'enquête auprès des élèves 68

III.5. Résultats auprès des enseignants 75

III.5.1. Informations générales sur les enseignants 75

III.5.2. Les causes de la non maîtrise du concept de magnétisme par les élèves 76

III.5.3. Difficulté du concept de magnétisme 77

III.5.4. Les méthodes utilisées pour enseigner le concept de magnétisme 77

III.5.5. Les problèmes rencontrés en enseignant le magnétisme 77

III.5.6. Possession de laboratoire 77

III.5.7. Propositions 78

III.6. Conclusion 78

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES. 81

ANNEXES 85

SYMBOLES ET SIGLES

$A.m^2$: ampèremètre carré

A : surface plane d'aire

AVJ : avant Jésus

B : champ magnétique d'amplitude B

B : induction magnétique externe

$\vec{B}$: champ d'induction magnétique

CNRS : Centre National de Recherche Scientifique

CRDS : Centre de Recherche en Didactique des Disciplines et de Diffusion des Sciences

Cosθ : angle avec la normale à la surface

DCE : direction communale d'enseignement

$d\vec{F}$: force de Lorentz sous forme diffféntielle

dt : variation du temps

dΦ : variation du flux magnétique

e : force électromotrice

F : force d'attraction magnétique

Fe_3O_4 : Oxyde de Fer

$\vec{F}$: force de Lorentz

GMR : Giant Magnetoresistance (magnétorésistance géante)

$\vec{H}$: champ d'aimantation ou Champ d'excitation magnétique

I : Intensité du courant électrique

$I\vec{dl}$: portion infinitésimale de fil, symbolisée par un vecteur tangent à celui-ci.

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

$\vec{I}$: courant linéique

$\vec{j}_s$: vecteur densité de courant

l. d.f : ligne de force

m : masse magnétique

M : moment magnétique

MnO : oxyde de manganèse

N : unité de la force (newton)

N : pôle nord

n_1 : nombre de spires au primaire

n_2 : nombre de spires au secondaire

NE : direction nord-est

q : charge électrique

RMN : Résonance magnétique Nucléaire

S : pôle sud

SE : direction Sud-Est

T : unité dans le système international du champ magnétique (Tesla)

T_C : température de Curie

TMR : Tunnel magnetoresistance (Magnétorésistance tunnel)

T_N : température de Néel

U_1 : tension primaire

U_2 : tension secondaire

$\vec{v}$: vitesse de la charge

W : unité dans le système international de la puissance (watt)

ε_0 : permittivité diélectrique du vide

μ : perméabilité magnétique du matériau

μ_o : perméabilité magnétique du vide

μ_r : perméabilité magnétique relative du matériau

μT : unité du champ magnétique (micro tesla)

Π : Pi

Φ : flux magnétique

χ_r : Susceptibilité relative du matériau

LISTE DES TABLEAUX

TaTableau 1 : Classification des effets magnétiques 16
Tableau2 : Contenu et commentaires sur les programmes de physique de l'enseignement des humanités générales au Burundi..... 60
Tableau 3 : Matière vue sur le magnétisme ; contenus des cahiers des élèves..... 67
Tableau 4 : Répartition de l'échantillon des élèves selon les écoles 68
Tableau5 : Répartition de l'échantillon des élèves selon les variables sections et écoles 69
Tableau 6 : Distribution des fréquences des réponses des élèves sur la définition du magnétisme 70
Tableau 7 : Distribution des fréquences des réponses des élèves sur les concepts centraux du magnétisme……...71
Tableau 8 : Répartition des concepts physiques en grandeurs scalaires et en grandeurs vectorielle 73
Tableau 9 : Distribution des fréquences des réponses des élèves sur la facilité ou la difficulté des concepts de magnétismes représentés en grandeurs vectorielles..... 73
Tableau10 : Distribution des fréquences des réponses des élèves sur les expériences en magnétisme 74
Tableau11 : Diplôme et ancienneté des enseignants interviewés..... 76

LISTE DES FIGURES

Fig.1. (a) Echantillon paramagnétique en l'absence d'un champ magnétique et (b) échantillon paramagnétique avec un champ magnétique 14
Fig .2. Aimant naturel 18
Fig. 3. Action entre des aimants 19
Fig.4 : Les lignes de champ et spectre magnétique 22
Fig. 5 : Champ magnétique uniforme 22
Fig. 6 : Moment magnétique $\boldsymbol{\mu}$ d'une boucle de courant d'intensité *I* et de surface *S*. 23
Fig. 7 : Schéma du champ magnétique terrestre. 24
Fig. 8 : Expérience d'Oersted 26
Fig. 9 : Expérience d'Ampère 27
Fig.10 : Expérience de Rowland 27
Fig. 11 : Champ magnétique créé par un fil rectiligne infini. 28
Fig. 12 : Champ magnétique créé par une spire circulaire. 29
Fig. 13 : Champ créé par un solénoïde 30
Fig. 14 : Force de Lorentz 34
Fig. 15 : Effet Hall 35
Fig. 16 : Courbe de la première aimantation 36
Fig. 17 : Cycle d'hystérésis 37
Fig. 18 : Champ magnétique d'un électroaimant 39
Fig. 19 : Schéma de fonctionnement d'une tête de lecture 40
Fig.20. Schéma d'un disque de frein de Foucault 45
Fig. 21. Transformateur monophasé idéal 46
Fig. 22. Roue de Barlow 47
Fig. 23.Les boussoles autour d'un fil électrique(a) ; la limaille de fer 48
Fig. 24. Matériel pour réaliser un petit moteur 50
Fig.25. Plusieurs petits aimants sur le pôle positif de la pile 50
Fig.26a. Pliage du fil de cuivre 51
Fig.26b. Mise en forme du fil de cuivre 51
Fig.27 : Petit moteur 51
Fig. 28. Matériel pour réaliser un électroaimant 52
Fig. 29. Enroulement du fil de cuivre autour du clou ou du tournevis. 52
Fig. 30. Mise en contact d'un bout du fil dénudé avec un pôle de la pile. 53

Fig.31. Mise en contact du deuxième bout du fil dénudé avec le deuxième pôle de la pile... 53
Fig.32 : Déplacement du dispositif avec les trombones et ouverture du circuit électrique.... 54
Fig.33 : Expériences réalisées avec un tournevis 54

AVANT-PROPOS

Le choix de ce travail relève d'un certain nombre d'observation et d'analyses portant sur les difficultés rencontrées par les élèves dans leur apprentissage du concept de magnétisme. C'est dans ce contexte que nous avons cherché à caractériser les connaissances des élèves sur le concept magnétisme en physique après une séquence d'enseignement-apprentissage en magnétisme. Ce travail s'inscrit dans une série de recherches initiées par le Centre de Recherche en Didactique des disciplines des Sciences (CRDS) depuis 2010 pour tenter de comprendre les nombreuses difficultés des élèves de seconde en physique et proposer des solutions. Le but de notre travail étant de savoir comment l'enseignement-apprentissage du concept de magnétisme est abordé et connaître son impact sur les acquis éventuels des élèves.

Ce travail a été rendu possible grâce aux conseils judicieux du guide que nous avons trouvé en la personne de Dr. BANUZA Alexis tout au long de notre travail.

0. INTRODUCTION GENERALE

0.1. Justification du choix du sujet de recherche

Selon Gad (2005), *« Tout système éducatif se donne la mission de dispenser un enseignement de qualité, c'est-à-dire qui assure les meilleures performances à tout le monde ».*

En tant que futur enseignant, nous avons préféré une recherche qui a un rapport avec notre métier et prendre conscience des problèmes qui nuisent à l'enseignement de la physique en général et plus particulièrement au concept de magnétisme. Nous sommes partis d'un constat observé à l'école secondaire où la majorité des élèves échouent dans le cours de physique et surtout le concept de magnétisme semble être difficile à la fois pour les élèves et les enseignants. Le choix du domaine du magnétisme relève d'un certain nombre d'observations et d'analyses portant sur les difficultés rencontrées par les élèves dans leur apprentissage des phénomènes magnétiques. Comme déjà dit, certains auteurs dont quelques-uns sont : Banuza (2013) ; Nahayo (2012) ; Minani (2005) ; Ntibayindusha (2004) ; Kanyabitabo (1979) ont fait des recherches sur l'enseignement de physique au Burundi et s'intéressent aux facteurs d'échecs en physique, mais pas précisément sur la notion du magnétisme. Notre intention consiste à donner une contribution pour un enseignement de qualité en physique au Burundi, raison pour laquelle notre sujet de recherche est « Concept de magnétisme et enseignement de la physique au Burundi : cas de la mairie de Bujumbura ».

0.2. Problématique

Un système éducatif est un tout cohérent. Il constitue une unité fonctionnelle dans laquelle tout agit sur toute. Un manquement constaté dans l'une de ses composantes entraîne à court ou à long terme un manquement de tout système. En plus, des études menées sur l'apprentissage des concepts du cours de physique approuvent les difficultés qu'éprouvent les élèves à s'éloigner des conceptions populaires au profit des connaissances scientifiques qu'ils apprennent à l'école. Ceci est confirmé par Maniraha (2017) :

> « *L'apprentissage des concepts de base en science, tel que pratiqué dans de nombreuses classes de physique, de chimie et de biologie, ne semble pas faciliter les apprenants en général et les étudiants en particulier à surmonter leurs conceptions et ces derniers (apprenants et étudiants) y recourent le plus souvent de manière spontanée, lorsqu'ils sont confrontés à une réflexion sur certains problèmes de la vie courante faisant intervenir ou non la matière de classe ».*

L'école n'est pas le seul lieu d'acquisition des savoirs et les élèves sont loin d'être ignorants avant une séquence d'enseignement ; ils possèdent sur l'objet enseigné un certain nombre d'informations plus ou moins organisées sur l'objet de l'enseignement.

L'enseignement des sciences en général et celui de la physique en particulier est indispensable pour le développement socio-économique de tout pays.

En général, la science étudie les phénomènes qui se posent partout où l'on vit. En termes conventionnels, c'est l'étude du milieu physique, donc l'étude des questions qui viennent à l'esprit curieux des gens, à chaque étape de leur vie de développement.

« Enseigner la physique au niveau de l'enseignement secondaire est une activité étonnante. La plupart des phénomènes abordés en effet sont liés à la vie courante : la majorité des concepts développés en physique sont donc intimement associés au quotidien des élèves ; ce qui a priori devrait faciliter l'enseignement de cette discipline. Par contre, l'expérience qu'ont les élèves des phénomènes physiques et l'interprétation qu'ils en ont élaborée inconsciemment au cours de leur vie, peuvent perturber l'apprentissage » (Banuza, 2013).

Compte tenu de l'importance de la physique dans le développement socio-économique des pays en voie de développement, il est question de s'interroger sur la qualité de son enseignement.

Pour notre cas, C'est la préoccupation de mieux comprendre les réalités de l'évolution d'apprentissage en sciences physiques qui nous a incité à déterminer et à analyser les difficultés des élèves face au concept magnétisme à l'exemple des autres concepts physiques. D'autres chercheurs se sont déjà intéressés à d'autres concepts comme Habimana (2018) pour le concept de gravitation ; Maniraha (2016) pour l'Energie et Muteriteka (2017) pour le champ électrique. Ils ont trouvé que ces concepts n'étaient pas du tout maîtrisés par les élèves. Ceci entre dans la suite d'autres chercheurs qui ont trouvé que dans l'ensemble, la physique est considérée comme le cours le plus difficile par les élèves (Banuza, 2013 ; Muteriteka ; 2017 ; Niyiragira, 2018 ; Niyongabo, 2018, …). En dehors de notre pays, des chercheurs ont fait des investigations sur les concepts. Notamment, Lumonge (2010) et Benyamma (1987) pour les concepts d'énergie et chaleur respectivement. Benyamma a montré que, malgré un enseignement long en physique, les élèves interprètent les phénomènes liés au concept de chaleur comme s'il existait une substance « chaleur », ce qui les conduit à des impasses intellectuelles importantes. Autrement dit, les élèves ont intégré le terme chaleur à l'aide des représentations substantialistes qu'ils avaient élaborées avant tout enseignement de la physique. Donc, la littérature est riche en exemples où la notion de représentation est largement utilisée dans d'autres domaines tels que la mécanique, l'électricité, l'optique, etc.

(Clément, 1982 ; Closset, 1983,1989 ; Shipstoneetal ; 1988 ; Osborneetal, 1993). Gioia et De Cecchi (1990) [consulté par Maarouf] insistent sur la présence des préconceptions dans les raisonnements des élèves et le caractère résistant que ces conceptions premières affichent face à l'enseignement scientifique ; avant tout enseignement systématique des notions, les élèves possèdent pratiquement des idées sur les objectifs d'étude et interprètent le phénomène donné ou une information entendue à travers un questionnement.

Au cours de la dernière décennie, plusieurs essais de rénovation de l'enseignement des sciences physiques ont vu le jour. Axés principalement sur un remodelage de l'organisation séquentielle des contenus et non sur les difficultés éprouvées par les élèves dans leur apprentissage des sciences physiques, ces essais ont montré leurs limites. Le programme de recherche portant sur les conceptions spontanées (Pfundt& Duit, 1991) [consulté par Maarouf] qui a, en quelque sorte, pris au sérieux non seulement ce que les élèves savent déjà au moment où ils abordent l'étude des sciences mais aussi, comment ils le savent, éclaire d'un jour nouveau les problèmes liés à l'apprentissage des sciences. En effet, avant que ce programme ne soit amorcé au début des années soixante-dix, quand l'accent est mis sur ce que l'élève savait déjà, c'est en termes de prérequis que cela est fait. Dans la pratique d'enseignement/apprentissage, on n'a jamais posé de questions sur la façon selon laquelle ce savoir est structuré ni sur ses significations.

Maarouf (1997) s'est appuyé sur le concept de représentation pour donner sens aux difficultés rencontrées par les élèves marocains dans leur apprentissage des phénomènes magnétiques au lieu de considérer ces difficultés comme de simples accidents de parcours. Ainsi, son objectif principal est de répondre aux deux questions :

-quelles représentations se font les élèves de quelques phénomènes magnétiques ?
-comment évoluent ces représentations lorsqu'ils avancent dans l'apprentissage du magnétisme ?

En ce qui nous concerne ; nous allons faire des investigations à propos du concept de magnétisme dans l'enseignement de la physique. Voir (i) si le concept de magnétisme est bien représenté sur les programmes de physique au Burundi, (ii) comment il est enseigné et (iii) comment les élèves burundais conçoivent le concept de magnétisme. L'enseignement -apprentissage au Burundi s'effectue dans le cadre du nouveau programme pour "l'Approche par les compétences". Les institutions ministérielles de l'éducation préconisent de mettre les élèves en activités dans une nouvelle pédagogie de type socioconstructiviste. Mais les enseignants ne disposent principalement que des documents et des manuels des anciens programmes par objectifs.

C'est dans ce contexte que nous avons cherché à caractériser les connaissances des élèves sur le concept magnétisme en physique après une séquence d'enseignement-apprentissage en magnétisme. Ce travail s'inscrit dans une recherche plus large pour tenter de comprendre les nombreuses difficultés des élèves de seconde en physique. Le but étant de savoir comment l'enseignement-apprentissage du concept de magnétisme est abordé et connaître son impact sur les acquis éventuels des élèves ; préoccupation qui constitue le nœud de notre étude.

Cette étude s'appuie sur les questions suivantes qui constituent le fil conducteur de réflexion :

- Quelle est la part du concept de magnétisme sur le programme de la physique au Burundi ?
- Comment le concept de magnétisme est-il enseigné au Burundi ?
- Est-ce - que les élèves en seconde scientifique maîtrisent bien la notion du magnétisme ?

Partant de ces questions nous tirons les hypothèses de recherche dans le paragraphe suivant.

0.3. Hypothèses de recherche

Une hypothèse de recherche est la réponse présumée à la question qui oriente une recherche. Un objectif de recherche est la contribution que les chercheurs espèrent apporter à un champ de recherche en validant ou en invalidant une hypothèse. Une hypothèse est une supposition qui est faite en réponse à une question de recherche.

Pour notre cas, l'hypothèse générale est : L'enseignement du magnétisme au Burundi ne permet pas aux apprenants de surmonter leurs conceptions relatives au concept magnétisme en physique.

A partir des questions spécifiques, nous déduisons les hypothèses spécifiques suivantes :

- Le concept de magnétisme n'est pas bien développé dans le programme de la physique au Burundi.
- Le concept de magnétisme n'est pas bien enseigné au Burundi.
- Le concept de magnétisme n'est pas bien maîtrisé par les élèves de la seconde scientifique.

0.4. Délimitations et composition de notre travail

Notre sujet entre dans le cadre d'autres recherches et activités qui visent à améliorer la qualité de l'enseignement des sciences en général et la physique au Burundi en particulier et qui ont été initiées par le CRDS depuis 2010. Nshimirimana (2016), Ntukamazina (2017), Hakizimana (2018) et Nibigira (2018), Niyongabo (2018), Shemezimana (2018), Nkeshimana (2018) se sont intéressés

à l'état des lieux de l'enseignement de la physique dans quelques provinces où ils ont trouvé que la physique n'est pas bien enseignée.

Maniraha (2016), Niyibigira (2016), Muteriteka (2017) ; Nijimbere (2018), Tuyishemeze (2018) ; Nduwayo (2018) et Nsabiyumva (2018) quant à eux ont mené une étude sur certains concepts de la Physique et c'est dans ce sens que notre apport est de travailler sur le concept magnétisme.

Ce concept est composé essentiellement par les points suivants : les aimants, le champ magnétique, le champ magnétique terrestre, le champ magnétique créé par un courant, l'action d'un champ magnétique sur un élément parcouru par un courant : loi de Laplace, travail des forces électromotrices d'induction & flux d'induction, l'aimantation du fer et de l'acier.

Notre travail est composé par trois chapitres entourés par une introduction générale, une conclusion générale et une résolution des exercices du concept de magnétisme donné en seconde scientifique (annexe 3). Le premier chapitre donne beaucoup de détails sur le concept de magnétisme, le deuxième chapitre trace la méthodologie utilisée, alors que le troisième et dernier chapitre présente et analyse les résultats.

CHAPITRE I : NOTIONS DE MAGNETISME

I.1. Historique du magnétisme

Depuis la nuit des temps et au fil des âges, le magnétisme a toujours attiré des esprits. Considéré comme un des grands miracles de la nature, il fut encore au 17ème siècle appelé « le labyrinthe et abîme impénétrable des philosophes » par Athanasius Kircher dans son monumental traité sur l'aimant. Ce phénomène physique hors du commun est à l'origine de choses surprenantes comme l'attraction ou la répulsion d'objets, voire dans certains cas leur lévitation. Cependant, les conditions de la découverte du magnétisme restent encore à ce jour inconnues : impossible donc d'y associer une date précise.[1]

I.1 1. De l'antiquité au XVIIème siècle

La 1ère discussion scientifique sur le magnétisme a été attribuée à Aristote avec Thalès de Milet. Vers la même période, le chirurgien indien Sushruta a été le premier à faire usage de la pierre d'aimant pour des raisons chirurgicales. Mais la découverte de l'aimantation a été véritablement attribuée au philosophe grec Platon (427AVJ-347AVJ).

Il est extrêmement compliqué de situer l'invention de la boussole ; mais c'est pourtant le premier objet qui permit aux hommes d'apprivoiser et d'utiliser le magnétisme pour leur faciliter la vie. Pour les européens, cette invention est située à la fin du 17ème siècle. Alexander Neckar (1157-1217) a écrit « De naturis rerum » dans lequel il mentionne la « boussole qui indique le nord et guide les marins ». On a longtemps attribué l'invention de la boussole à l'italien Flavio Gioia en 1302, mais les historiens ont prouvé au 20ème siècle que ces faits n'étaient pas fondés. Une autre hypothèse a alors été avancée : ce serait un majorquin du nom de Raymond Llull (1232-1315) qui aurait découvert pour la première fois le pouvoir d'une aiguille d'acier touchée par l'aimant de se diriger vers le nord qu'il aurait utilisé pour naviguer. Pour les chinois, cette découverte remonte à une époque plus ancienne. L'ouvrage « Mengxi bitan » écrit en 1088 par le médecin Shen Gua (960-1127) décrivait déjà une aiguille indiquant le sud lorsqu'elle était frottée par la pierre d'aimant. Enfin, l'hypothèse selon laquelle les arabes auraient apporté la boussole de Chine en Europe par la navigation a été abandonnée. La réalité la plus probable est que la boussole a été inventée indépendamment en Europe et en Chine.

[1]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme, consulté le 24 octobre 2017

Au 16ème siècle, les premières expériences sont menées par l'érudit napolitain Giambattista Della Porta. Il rend compte dans « Magia naturalis » en 1589 de ses expériences de physique sur l'attraction du fer par la pierre aimantée, sur les propriétés des deux pôles de l'aimant, sur le fonctionnement d'un aimant cassé.

A peu près à la même période, le savant anglais William Gilbert (1544-1603) travaillait sur le magnétisme d'une manière beaucoup plus systématique. Dans son ouvrage « De magnete » publié en 1600, il fit le bilan de près de vingt ans d'expériences. Il préfigure, par la mise en pratique de la méthode expérimentale, le savant du type baconien.

Puis au 17ème siècle, le physicien René Descartes (1596-1650) marque une évolution dans l'histoire du magnétisme. Il fut le premier à établir une théorie physique sur le magnétisme dans son ouvrage « Les principes de la philosophie » en 1644. [2]

I.1.2. XVIIIème Siècle

En décembre 1765, pour les encyclopédistes des lumières, « le magnétisme est le nom général qu'on donne aux différentes propriétés de l'aimant ». Ils attribuent ses effets à une « matière subtile, différente de l'air » (parce que ces phénomènes ont également lieu dans le vide) qu'ils appellent magnétique. Plus loin, ils affirment que c'est encore une question non moins difficile que de savoir s'il y a quelque rapport entre la cause du magnétisme et celle de l'électricité ; car on ne connaît guère mieux l'une que l'autre.

La deuxième moitié du 18ème siècle voit un intérêt croissant pour les phénomènes électriques ainsi que le début d'une quête visant à découvrir le lien entre l'électricité et le magnétisme. Cela commence avec le physicien et médecin italien Luigi Galvani. Ce dernier fait l'étude sur l'influence de l'électricité sur les membres inférieurs de grenouilles. Ses expériences l'amènent à publier ses résultats dans une étude : « De viribus electricitatis in motu musculari » en 1791. Dans cette étude, il formula l'hypothèse d'une électricité animale secrétée par le cerveau et qui se déchargerait en reliant les nerfs et les muscles par du métal.

Ces travaux inspirèrent le médecin viennois Franz Mesmer qui exploitait « Le magnétisme animal » pour prodiguer des soins à ses patients.

Devant la popularité de cette méthode pourtant controversée, le roi Louis 16 ordonne en1784 à deux commissions composées de médecins et de scientifiques d'évaluer la rigueur scientifique de cette méthode.

[2] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme, consulté le 24 octobre 2017

Ces commissions condamnèrent le magnétisme animal pour cause de moralité publique. C'est à cette époque que le magnétisme prend deux sens différents à savoir le magnétisme animal et le magnétisme physique.[3]

I.1. 3. XIX^{ème} siècle : la révolution de l'électromagnétisme

Jusqu'au début des années1820, on ne connaissait que le magnétisme des aimants naturels à base de magnétite. En1820, le lien entre l'électricité et le magnétisme est mis en évidence pour la première fois par le physicien danois Hans Christian Œrsted au cours d'une expérience.

Il place une boussole sous un fil dans lequel il fait passer un courant électrique et observe comme résultat que l'aiguille de la boussole se place perpendiculairement à la direction du fil traversé de courant. Une vidéo de vulgarisation réalisée par le CNRS permet de voir et comprendre de ses expériences. Il publie ses résultats le 21 juillet dans un article intitulé « Expermienta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam » qui sera traduit et diffusé dans toute l'Europe. La même année, les résultats de Hans arrivent entre les mains des physiciens français François Arago et André-Marie Ampère qui s'empressent de refaire l'expérience avec succès.

Cette expérience marque le début de la « révolution électromagnétique » : les années qui vont suivre 1820 seront témoins de grands changements tant par la compréhension des phénomènes électromagnétiques que par la mise en application de ces derniers par de nouvelles inventions. Toujours en 1820, les français Jean Baptiste Biot et Félix Savart parviennent à décrire mathématiquement le champ magnétique généré par une distribution de courants continus. La loi de Biot et Savart constitue le pilier de la magnétostatique (étude des champs magnétiques indépendants du temps).

En 1821, André Marie Ampère théorise le magnétisme par l'existence dans les matériaux conducteurs d'innombrables particules minuscules chargées électriquement et en mouvement. La même année, Michael Faraday crée un premier moteur électrique primitif en inversant l'expérience d'Oersted. Il place un aimant permanent dans un bain de mercure et place un fil parcouru par un courant électrique dans ce bain. Le fil se met à tourner de manière circulaire. En 1822, le premier moteur électrique est inventé : la roue de Barlow.

André-Marie Ampère proposa peu après une loi phénoménologique, aujourd'hui démontrée dans le cadre général de l'électromagnétisme, appelé théorème d'Ampère, qui relie le champ magnétique aux courants.

[3]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme, consulté le 24 octobre 2017

En 1825, le physicien anglais William Sturgon crée le premier électro-aimant pratique. Peu de temps après l'invention du moteur électrique, Michael Faraday découvre en 1831 l'induction électromagnétique ; soit l'apparition d'une force électromotrice dans un conducteur électrique soumis à un champ magnétique variable. Ce phénomène constitue actuellement la base de notre technologie et est utilisé dans les transformateurs, les dynamos ou bien encore dans les alternateurs. Il décrit en 1845 le paramagnétisme et le diamagnétisme.

La deuxième partie du 19ème siècle sera marqué par la formulation des équations de Maxwell publiées en mars 1861 dans l'étude « On physical lines of forces ». Dans cette étude, le physicien écossais Maxwell réunit les travaux sur le magnétisme et sur l'électricité réalisés par Faraday et Ampère en un ensemble de vingt équations qui, plus tard, seront ramenées à quatre. Ces équations décrivent le comportement du champ électromagnétique et ses interactions avec la matière. En 1873, James Clerk Maxwell unifie le champ magnétique et le champ électrique, au sein de la théorie de l'électromagnétisme. Cefaisant, il découvre une incompatibilité entre les lois de la mécanique classique et les lois de l'électromagnétisme. Ces dernières prédisent que la vitesse de la lumière est indépendante de la vitesse d'un observateur par rapport à la source qui émet la lumière, hypothèse incompatible avec les lois de la mécanique classique. La même année, l'ingénieur belge Zénobe Gramme découvre le premier moteur électrique à courant continu, utilisable à grande échelle.

En 1887, l'inventeur et ingénieur américain d'origine serbe Nikola Tesla invente le premier moteur électrique à induction, utilisant les travaux de Faraday sur le moteur électrique, l'induction électromagnétique et le courant alternatif. La même année, les Américains Albert A. Michelson et Edward Morley vérifient expérimentalement (expérience de Michelson-Morley) les prédictions de Maxwell. En 1890. Le physicien et ingénieur James Alfred Ewing étudie les propriétés des métaux et découvre le phénomène d'hystérésis.

Quelques années plus tard, le physicien français Pierre Curie étudie à son tour les propriétés magnétiques des matériaux et met en évidence que la susceptibilité magnétique d'un matériau est inversement proportionnelle à sa température. Il en tire la loi de curie en 1895.Enfin, à la toute fin du 19ème siècle, l'ingénieur danois Valdemar Poulsen invente, en 1898, l'enregistrement magnétique en créant un dispositif permettant de transformer les variations de champ magnétique d'une bande en un signal électrique.[4]

[4] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme, consulté le 24 octobre 2017

I.1. 4. XX^{ème} siècle : des progrès Scientifiques et techniques

En 1905, Albert Einstein résoud le paradoxe découvert par Maxwell en montrant que les lois de la mécanique classique doivent être remplacées par celles de la relativité restreinte.

C'est à la fin du 19ème siècle et au début du 20ème siècle que l'étude théorique des matériaux magnétiques est absorbée avec succès. Paul Langevin, s'inspirant notamment des travaux de Pierre Curie, utilise la physique statistique de Boltzmann pour établir la théorie statistique classique du paramagnétisme. Il donne aussi les notions de magnétisme induit et permanent.

Ses théories de l'antiferromagnétisme (1936) et du ferrimagnétisme (1948) vaudront à Louis Néel le prix Nobel de physique en 1970. C'est un an après la première publication qu'est découvert le premier antiferromagnétique incontestable, MnO, par Henri Bizette et BellingTsaï.

L'avènement de la mécanique quantique et en particulier la découverte du spin de l'électron par George Uhlenbeck et Samuel Goudsmit permirent d'expliquer l'origine des champs moléculaires gigantesques observés dans les substances fortement magnétiques, dont l'existence ne pouvait être démontrée par la seule interaction dipolaire magnétique entre les moments magnétiques atomiques. Werner Heisenberg montra ainsi en 1929 que ces champs étaient d'origine électrostatique et de nature quantique, et qu'ils pouvaient s'interpréter en termes de couplage entre deux spins. En 1933, Walther Meissner et Robert Ochsenfeld découvrent qu'un échantillon supraconducteur plongé dans un champ magnétique a tendance à expulser celui-ci de son intérieur (effet Meissner).

En 1944, Lars Onsager propose le premier modèle (dit modèle d'Ising) décrivant le phénomène de ferromagnétisme.

Le phénomène de résonance magnétique nucléaire (RMN), basé sur le couplage entre le moment magnétique du noyau des atomes et le champ magnétique externe, est découvert par Felix Bloch et Edward Purcell en 1946, ce qui leur vaudra un prix Nobel en 1972. Dès les années 1960, des scientifiques comprennent que la RMN peut avoir des applications dans le domaine de la médecine, et c'est ainsi que la première image obtenue par résonance magnétique (IRM) est réalisée par l'américain Paul Lauterbur en 1973.

En 1966, le docteur Karl Strat découvre les premiers aimants samarium-cobalt, d'une énergie phénoménale. En 1968 sont découverts les pulsars, cadavres d'étoiles extraordinairement denses, sièges des champs magnétiques les plus intenses existant aujourd'hui dans la nature (4×10^8teslas pour le pulsar du Crabe, par exemple).

En 1983, une équipe internationale crée des aimants néodyme-fer-bore, les plus puissants aimants permanents connus à ce jour, soit environ 1,25T.

Une autre découverte importante du 20ème siècle est celle des supraconducteurs thermiques, effectuée par Kamerlingh Onnes en 1911. Les supraconducteurs ouvrent des perspectives immenses car ils permettent d'utiliser une composante du magnétisme jusqu'alors sous-exploitée : la lévitation. En 1986, Johannes Georg Bednorz et Karl Müller, découvrent des supraconducteurs à haute température critique (supérieure à 30 K), contredisant les théories établies jusqu'alors.

Cette famille de matériaux permet de transporter beaucoup plus d'électricité dans des câbles bien plus petits (section), et laisse donc envisager des progrès considérables dans les domaines des transports ou encore des nouvelles technologies.

Des trains à sustentation magnétique utilisant les supraconducteurs sont actuellement en fonctionnement et promettent une révolution de nos moyens de transport. En 1998, une équipe russe crée un champ magnétique pulsé par une explosion (compression très rapidement du champ magnétique dans une petite zone, c'est à dire la "compression du flux électromagnétique"). La pression étant trop forte, le champ magnétique rebondit et génère une explosion) qui atteint 2 800 T. [5]

I.1.5. XXIème Siècle

En 2006, des champs magnétiques pulsés ont atteint 100 T sans destruction. [6]

I.2. Le magnétisme

I.2. 1. Définition

Physiquement, le magnétisme est défini de manières différentes :

Sens1 : Le magnétisme représente un ensemble de phénomènes physiques dans lesquels les objets exercent des forces attractives ou répulsives sur les matériaux. Les courants électriques et les moments magnétiques des particules élémentaires fondamentales sont à l'origine du champ magnétique qui engendre ces forces. Tous les matériaux sont influencés, de manière plus ou moins complexe, par la présence d'un champ magnétique d'un matériau, et l'état magnétique d'un matériau dépend de sa température (et d'autres variables telles que la pression et le champ magnétique extérieur) de sorte qu'un matériau peut présenter différentes formes de magnétisme selon sa température.[7]

---

[5] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme, consulté le 24 octobre 2017
[6]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme, consulté le 24 octobre 2017
[7] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme,consulté le 24 octobre 2017

Sens 2 : Partie de la physique ayant pour objet l'étude des propriétés des aimants (naturels ou artificiels) et les phénomènes qui en résultent ou peuvent s'y rattacher (Dictionnaire petit Robert).

Sens 3 : Ensemble des phénomènes propres aux aimants et aux champs magnétiques (traduction anglais : magnetism).

Sens 4 : Partie de la physique étudiant les propriétés des aimants et des champs magnétiques.

Sens 5 : Ensemble des propriétés des aimants (dictionnaire physique).

Sens 6 : Etude physique des propriétés des aimants, des champs et des manifestions magnétiques (Encyclopédie Physique).

Le magnétisme est l'un des phénomènes qui a le plus frappé l'imagination de l'homme, au point que ce mot désigne aujourd'hui des réalités très diverses : il s'agit d'abord d'une science fort ancienne et néanmoins toujours d'actualité dont le champ d'application ne cesse de s'étendre ; ensuite, par extension, on parle du magnétisme d'une personne attrayante et capable de dynamiser son entourage ,enfin ,le magnétisme recouvre diverses pratiques parapsychologiques et dont les acteurs sont appelés magnétiseurs.

I.2.2. L'aimant

Un aimant est un morceau d'oxyde de fer autour duquel se manifeste le phénomène du magnétisme ou tout simplement corps qui possède la propriété d'attirer les métaux et alliages magnétiques. Les aimants furent découverts d'abord en Chine et puis en Grèce. Les premiers aimants sont des pierres noires qui ont la propriété d'attirer des objets en fer. Cette pierre est constituée de magnétite, un minerai de fer composé principalement d'oxyde de fer (Fe_3O_4). Le phénomène observé est le magnétisme. Au voisinage d'un aimant, les corps en fer s'aimantent et deviennent eux-mêmes des aimants. Ceci est observé pour d'autres matériaux comme le nickel et le cobalt. Certains de ces matériaux dits ferromagnétiques ne se désaimantent pas si on éloigne l'aimant ; on a ainsi réalisé un aimant permanent. Une des premières applications fut la boussole. Elle est constituée d'une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical. En un lieu donné, l'aiguille s'oriente toujours dans la même direction et dans le même sens. Cette propriété fait de la boussole un instrument de navigation. Un aimant permanent est capable d'attirer des corps ferromagnétiques. L'intensité de la force attractive diminue rapidement lorsqu'on éloigne le corps de l'aimant. La force est particulièrement intense aux extrémités de l'aimant appelées pôles magnétiques. En étudiant les interactions entre deux barres aimantées, on constate qu'il y a des forces attractives et répulsives. On en conclut qu'il y a deux types de pôles différents. Lorsqu'on suspend une barre aimantée, elle s'oriente dans une direction proche de la direction nord-sud géographique. L'extrémité de la barre

qui pointe vers le nord est appelée pôle nord et l'autre extrémité pôle sud. Des expériences simples permettent de montrer que deux pôles de même nom se repoussent et que deux pôles de noms différents s'attirent. Les pôles magnétiques apparaissent toujours par paires ; il n'existe pas de monopôle magnétique. En découpant une barre aimantée en deux, on obtient deux couples de pôles nord et sud (Michel .H ; 1992 ; Eugène. H ; 1999).

I.2.2.1. Métaux magnétiques et non magnétiques

I.2.2.1.1. Matériaux magnétiques

Ce sont principalement le fer, les aciers, la fonte, le nickel et le cobalt. D'autres métaux réagissent très faiblement au magnétisme, par exemple le manganèse, le chrome, le platine et l'aluminium.

I.2.2.1.2. Métaux non magnétiques

On peut considérer que tous les autres matériaux sont non magnétiques. Exemple : le cuivre, le plomb, l'acier inoxydable, l'étain, le zinc, l'eau, etc.

I.2.2.2. Types de matériaux magnétiques

I.2.2.2.1. Diamagnétisme

Le diamagnétisme est un comportement des matériaux qui les conduit, lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique, à générer un autre champ magnétique opposé, créé par une très faible aimantation. Lorsque le champ n'est plus appliqué, l'aimantation disparaît.
Le diamagnétisme est un phénomène qui apparaît dans toute la matière atomique, mais il est masqué par les effets du paramagnétisme ou du ferromagnétisme lorsque ceux-ci coexistent avec lui dans le matériau. Ce type de magnétisme est caractérisé par une susceptibilité relative négative, de faible amplitude. Le diamagnétisme est dû à un mouvement orbital des électrons, provoqué par le champ magnétique appliqué. Ce mouvement peut être assimilé à un courant microscopique dont le comportement serait comparable à celui d'un courant induit dans un solénoïde. En vertu de la loi de Lenz, le courant induit s'oppose au champ qui le produit, ce qui est en accord avec le fait que χ_r est négatif. Les gaz rares, certains métaux, la plupart des métalloïdes et un grand nombre de composés organiques sont diamagnétiques (D. Giancoli ; 1989 ; G. Cardinael ; 1971).

I.2.2.2.2. Paramagnétisme

Le paramagnétisme désigne en magnétisme le comportement d'un milieu matériel qui ne possède pas d'aimantation spontanée (fig.1.a) mais qui, sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, acquiert une aimantation orientée dans le même sens que le champ magnétique appliqué (champ d'excitation (fig.1.b)). Un matériau paramagnétique possède une susceptibilité positive en général assez faible. Cette aimantation disparaît lorsque le champ d'excitation est coupé.

En outre le paramagnétique ne désigne pas une propriété intrinsèque d'un matériau mais un comportement en réponse à un champ magnétique ; comportement qui peut changer selon les conditions considérées.

A l'échelle microscopique, on peut décrire un matériau paramagnétique comme un ensemble de dipôles magnétiques indépendants. Il se rencontre dans les substances dont les atomes possèdent un moment magnétique permanent, lorsque ces moments ne sont pas couplés les uns aux autres. Sont paramagnétiques la plupart des gaz, certains métaux, en particulier les matériaux alcalins, quelques sels, les matériaux ferromagnétiques et ferrimagnétiques lorsqu'ils sont chauffées au-dessus de leur température de Curie (D. Giancoli; 1989 ; G.Cardinael ; 1971).

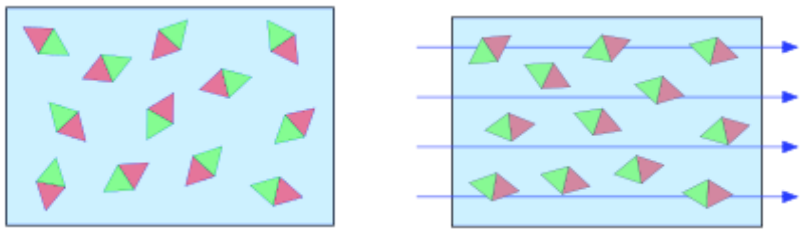


Fig.1. (a) Echantillon paramagnétique en l'absence d'un champ magnétique et (b) échantillon paramagnétique avec un champ magnétique

I.2.2.2.3. Ferromagnétisme

Le ferromagnétisme est le mécanisme par lequel certains matériaux (comme le fer) forment des aimants permanents, ou sont attirés par des aimants. C'est -à- dire que ce sont des corps qui ont la capacité de s'aimanter sous l'effet d'un champ extérieur et de garder cette aimantation.

Ces corps sont soit de type ferromagnétique, soit de type ferrimagnétique, de même que les matériaux qui se trouvent attirés par eux de façon significative.

Ils se différencient des paramagnétiques qui ne conservent pas leur aimantation à champ nul.
Il en existe deux sous catégories, à savoir les ferromagnétiques durs (que l'on appelle aimants permanents) et ferromagnétiques doux. Ces matériaux se rencontrent dans l'industrie comme dans la vie quotidienne. Le ferromagnétisme **se** trouve être très important pour l'industrie et les nouvelles technologies car il est à la base de nombreux appareils électriques et électrochimiques comme les électroaimants, les générateurs électriques, les transformateurs et les mémoires magnétiques (cassettes, disques durs, etc.). Le fer, le cobalt et le nickel sont les matériaux ferromagnétiques les plus utilisés dans les industries. Certaines terres rares sont également ferromagnétiques à basse température et utilisées dans l'industrie.

I.2.2.2.3.1. Matériaux magnétiques doux

Les matériaux ferromagnétiques doux forment un sous-groupe des matériaux ferromagnétiques, ce qui signifie qu'ils sont capables de s'aimanter lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique extérieur. La particularité des matériaux ferromagnétiques doux est que l'action de créer ou d'annuler l'aimantation dans le matériau nécessite moins d'énergie que pour les matériaux ferromagnétiques.

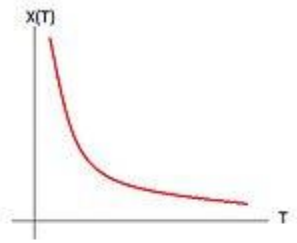
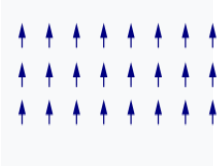
Ils sont utilisés dans les transformateurs, les électro-aimants ou dans toute application dans laquelle le matériau travaille à haute fréquence. Ils possèdent un champ coercitif très faible avec une très forte susceptibilité. C'est cette forte susceptibilité qui permet d'obtenir une forte induction à partir d'un faible champ magnétique extérieur et ainsi être utile dans les électro-aimants ou à la canalisation des lignes de champs. Les matériaux magnétiques doux sont utilisés pour réaliser des électroaimants (leur aimantation doit pouvoir facilement être annulée) ou des circuits magnétiques fonctionnant en régime alternatif (machines électriques, transformateurs).

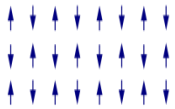
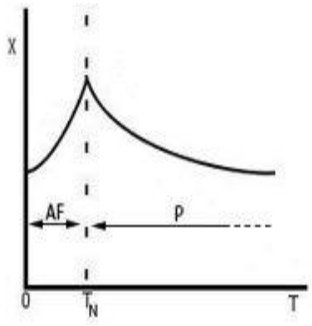
I.2.2.2.3.2. Matériaux magnétiques durs

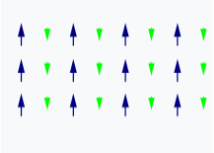
Les matériaux ferromagnétiques durs forment un sous groupe des matériaux ferromagnétiques.
Ils possèdent une aimantation naturelle en absence de champ extérieur ainsi qu'un champ coercitif.
Comme pour les autres matériaux ferromagnétiques, les ferromagnétiques durs ont la particularité de s'aimanter fortement en présence d'un champ magnétique extérieur. On distingue les ferromagnétiques durs des ferromagnétiques doux par leurs propriétés magnétiques. Les matériaux durs magnétiquement ne sont pas nécessairement durs mécaniquement. La dureté mécanique et la dureté magnétique sont deux propriétés différentes et non liées. Les matériaux ferromagnétiques durs sont à la base des aimants permanents, et notamment des aimants à forte puissance (D. Giancoli ; 1989 ; G. Cardinael ; 1971).

Les principales familles de matériaux magnétiques évoquées dans les paragraphes précédents sont classées selon leur susceptibilité dans le tableau 1 ci-dessous :

Tableau 1 : Classification des effets magnétiques

Type de magnétisme	Valeur de χ_r	Signe de χ_r	Moments Magnétiques des atomes	Variation de χ en fonction de la température	Exemples
Diamagnétisme	Extrêmement faible, de l'ordre de 10^{-5}	Négatif	Aucun	χ =une constante	Argent, or, cuivre, mercure, plomb, presque tous les composés organiques
Paramagnétisme	Très faible, de l'ordre de 10^{-3}	Positif	Orientés au hasard	χ suit une loi de Curie $\chi=\frac{C}{T}$ 	Platine, manganèse, aluminium et certains composés d'éléments ferromagnétiques
Ferromagnétisme	Très grande, il peut atteindre 10^{5}	Positif	Alignés et parallèles 	Au-dessus de la température de Curie T_C ; χ suit la loi de Curie-Weiss $\chi_m=\frac{C}{T-T_C}$	Fer, Cobalt, Nickel et un grand nombre de leurs alliages, en particulier les aciers, et certains

					de leurs composés, ainsi que certaines combinaisons d'éléments non ferromagnétiques
Antiferromagnétisme	Très grande	Positif	Alignés et antiparallèles 	Au-dessus de la température de Néel T_N, elle diminue avec l'augmentation de la température. En dessous de la température de T_N, elle diminue avec la diminution de la température T_N, elle atteint son maximum 	Chrome, oxyde de manganèse, hématite

Ferrimagnétisme	Très grande, il peut atteindre 10^5	Positif	Alignés, antiparallèles et inégaux 		Ferrite de baryum

I.2.2.3. Types d'aimant

Les aimants se classent en deux catégories, soit les aimants naturels et les aimants artificiels.

I.2.2.3.1. Aimants naturels

On rencontre les aimants naturels dans la nature sous la forme d'oxyde de fer (Fe_3O_4) appelé oxyde magnétique ou magnétite. La découverte des aimants naturels remonte au temps des anciens. Ceux-ci avaient remarqué que la magnétite, une pierre composée de minerai de fer noirâtre (fig.2), possédait la propriété d'attirer la limaille de fer. Les aimants naturels possèdent une faible aimantation et sont inutilisables industriellement.



Fig .2. Aimant naturel

I.2.2.3.2. Aimants artificiels

Les aimants artificiels sont des morceaux d'acier auxquels on a communiqué la propriété des aimants naturels par un traitement spécial. Ces derniers sont Fabriqués par l'homme en utilisant la propriété de certains métaux ou alliages pouvant acquérir de façon permanente et plus importante les propriétés des aimants naturels. On utilise en général des barreaux en acier (droit ou en fer à cheval) ou des alliages aciers plus additifs (tungstène, chrome, cobalt, nickel, titane, aluminium etc). Les aimants artificiels se classent en deux catégories. On distingue donc :

- les aimants temporaires ;
- les aimants permanents.

Les aimants artificiels temporaires perdent leur force d'attraction si on retire la source qui leur a fourni leur magnétisme. Les électro-aimants font partie de cette catégorie. Les aimants artificiels permanents deviennent aimantés lorsqu'on les place dans un champ magnétique intense. Ils conservent leur propriété magnétique après avoir été éloignés de ce champ magnétique. On emploie différents alliages dans la fabrication des aimants permanents.

En plus du fer, qui constitue l'élément principal, on retrouve du chrome, du tungstène ou du nickel, et des alliages à base de cobalt et de terres rares ou d'oxydes frittés (ferrites). On utilise les aimants artificiels dans différents appareils (moteurs, génératrices, appareils de mesure, haut-parleurs, etc (Michel .H ; 1992).

I.2.2.4. Boussole et pôles magnétiques d'un aimant

Les chinois ont été les premiers à constater qu'une fine aiguille aimantée suspendue par un fil ; loin de tout aimant ; prenait toujours une direction fixe correspondant à la direction sud- nord des pôles géographiques. Cette aiguille aimantée libre de s'orienter constitue la boussole. Les deux extrémités de l'aiguille ne jouent pas un rôle identique puisque c'est toujours la même pointe qui se dirige soit vers le pôle nord soit vers le pôle sud. De là vient la définition des deux pôles d'un aimant. L'extrémité de l'aimant se dirigeant vers le nord est appelée pôle nord de l'aimant ; l'autre le pôle sud (Michel .H ; 1992).

I.2.2.5. Action magnétique entre deux aimants

Si on approche successivement les pôles nord et sud d'un aimant du pôle nord d'une aiguille aimantée (fig.3) ; on constate que :
-Deux pôles de même nature se repoussent ;
-Deux pôles de nature différente s'attirent.

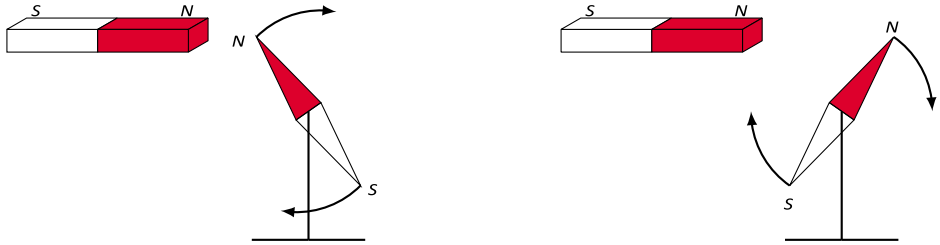


Fig. 3. Action entre des aimants

Cette propriété est utilisée pour déterminer la nature des pôles d'un aimant quelconque : il suffit d'approcher une boussole vers une des extrémités de l'aimant et d'observer quel pôle est attiré. Le pôle inconnu de l'aimant sera alors de nature différente. La terre agissant sur l'aiguille d'une boussole se comporte comme un aimant. Le nord de l'aiguille aimantée se dirige vers un point appelé par les géographes le pôle nord magnétique terrestre (voisin du pôle nord géographique). Pour les physiciens, ce pôle nord correspond en réalité au pôle sud magnétique de l'aimant équivalent à la terre. Au cours des différentes périodes géologiques, il y eut plusieurs inversions des pôles magnétiques.

La boussole est l'instrument simple qui va permettre de vérifier s'il existe un champ magnétique dans une région de l'espace. Il est possible aussi d'utiliser de la limaille de fer, petit, grain léger de fer qui va s'orienter avec le champ magnétique. Les limailles de fer sont attirées indifféremment par les pôles nord ou sud d'un aimant. Les petits gains de fer s'orientent donc dans le champ magnétique mais, contrairement à l'aiguille aimantée de la boussole, sans préciser le sens de l'action (Michel .H ; 1992).

I.2.3. Notion de masses magnétiques et loi de Coulomb

I.2.3.1. Notion de masses magnétiques

Les expériences de Coulomb et Gauss font admettre qu'à tout moment, le magnétisme est concentré en deux points : pôle nord (N) et pôle sud (S). On admet aussi que chaque pôle porte une quantité de magnétisme à laquelle a été donné le nom e masse magnétique. Les masses magnétiques portées par les pôles d'un aimant sont égales en valeur absolue de masse magnétique. On convient que la masse magnétique du pôle nord est positive et celle du pôle sud est négative. Les mêmes expériences ont montré que quand on superpose les pôles de plusieurs aimants ; les masses magnétiques s'ajoutent algébriquement.

I.2.3.2. Loi de Coulomb

La loi de Coulomb exprime que la force d'attraction (ou de répulsion) entre deux "masses" magnétiques m et m', écartées d'une distance d est égale à :

F= k $\frac{m_1 m_2}{d^2}$ *ou* F = $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ $\frac{m_1 m_2}{d^2}$ où F est la force magnetique exprime en [N],m_1 et m_2 les masses magnétiques expriment en [A-m], d la distance entre les masses magnétiques exprime en[m] , k est la constate de coulomb ou la constante de proportionnalité exprime en $N{\cdot}m^2/\ C^2$ et ε_0 est la permittivité du vide exprimée en $C^2/\ N.m^2$ et égale à $8{,}854\ 187\ 82 \times 10^{-12}$ F m^{-1}

I.2.4. Champ magnétique

Le champ magnétique est l'espace entourant un aimant dans lequel celui-ci exerce son influence. Donc, le champ magnétique est une force invisible qui est en quelque sorte l'espace dans lequel se fait sentir l'activité de l'aimant. Étymologiquement, deux champs vectoriels apparentés nous servent en physique à décrire les phénomènes magnétiques et peuvent de ce fait prétendre un nom générique «le champ magnétique» :l'un noté $\vec{B}$ décrit la densité du flux magnétique dans l'espace qui est à l'origine des effets à distance du magnétisme, et notamment de l'induction magnétique. Il s'exprime en teslas ; l'autre noté $\vec{H}$ qui est pratiquement plutôt utilisé dans l'étude de l'électromagnétisme des milieux continus, décrit au niveau local « l'aimantation » propre de la

matière, ou son excitation magnétique externe (dont l'effet global confère en particulier à un corps donné un moment magnétique d'ensemble). Il s'exprime en ampère par mètre.

Lorsqu'il est nécessaire de faire la différence entre les deux, le champ magnétique $\overrightarrow{B}$ peut être qualifié de champ d'induction magnétique, et le champ $\overrightarrow{H}$ de champ d'aimantation ou champ d'excitation magnétique. Bien que les normes internationales de terminologie prescrivent de réserver l'appellation de champ magnétique au seul champ vectoriel $\overrightarrow{H}$ en physique fondamentale, le terme champ magnétique pris absolument désigne le champ vectoriel $\overrightarrow{B}$, en dehors du cas spécifique de l'étude des milieux continus. C'est bien ce champ dont il est question dans la présente étude. Ce dernier est représenté usuellement par un vecteur $\vec{B}$, qui est défini dans trois dimensions et par trois paramètres : sa direction, son sens (du pôle sud de l'aiguille vers le pôle nord terrestre) et sa valeur, soit son intensité, qui diminue au fur et à mesure qu'augmente sa distance à la source. Il permet de modéliser et quantifier les effets magnétiques du courant électrique ou des matériaux magnétiques comme les aimants naturels.

Il existe trois sources de champ magnétique à savoir :

-le courant électrique,

-les aimants permanents,

-la variation temporelle d'un champ électrique (induction magnétique) (Michel .H ; 1992 ; Eugène. H ; 1999 ; D.Giancoli ; 1993).

I.2.4.1. Les lignes de champ

Les lignes de champ magnétique sont des courbes qui, en chacun de leurs points, sont tangentes au vecteur champ magnétique.

Les lignes de champ magnétique se referment sur elles-mêmes (éventuellement à l'infini) et convergent là où la force magnétique est concentrée, et restent espacées là où elle est faible. Par convention ces lignes partent du pôle nord vers le pôle sud (fig.4). L'ensemble des lignes de champ forment le spectre magnétique de l'élément considéré. On peut le visualiser en saupoudrant l'aimant ou la boussole de la limaille de fer ou par de nombreuses aiguilles aimantées. Chaque ligne composant le spectre magnétique est appelée ligne de force (l.d.f) du champ magnétique (Les classiques africains ; 1993 ; Michel .H ; 1992).

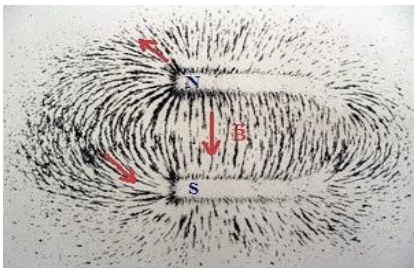


Fig.4 : Les lignes de champ et spectre magnétique

I.2.4.2. Le champ magnétique uniforme

Un champ magnétique est uniforme dans un domaine de l'espace si, en tout point de ce domaine, le vecteur champ magnétique a même direction, même sens et même intensité (valeur). Pour obtenir un champ magnétique uniforme, on peut se placer à l'intérieur d'un solénoïde, dans l'entrefer d'un aimant en U ou au voisinage du milieu de l'axe des bobines d'Helmholtz (Les classiques africains ;1993 Michel .H ;1992).

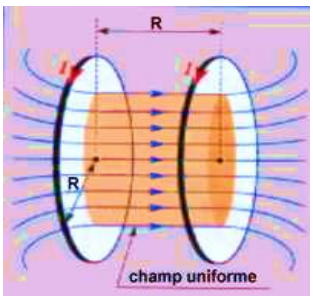


Fig. 5 : Champ magnétique uniforme

I.2.4.3. Le moment magnétique

En physique, le moment magnétique est une grandeur vectorielle qui permet de caractériser l'intensité d'une source magnétique. Cette source peut être un courant électrique, ou bien un objet aimanté. L'aimantation est la distribution spatiale du moment magnétique.

Le moment magnétique d'un corps se manifeste par la tendance qu'a ce corps à s'aligner dans le sens d'un champ magnétique, c'est par exemple le cas de l'aiguille d'une boussole qui se traduit par sa tendance à s'aligner dans le champ terrestre : laissée libre de tourner, elle s'aligne dans la direction du pôle nord, ce qui montre qu'elle subit un moment qui tend à l'aligner dans cette direction. Le couple qui tend à ramener l'aiguille aimantée sur la direction du champ magnétique est proportionnel au produit vectoriel du champ magnétique et d'une quantité extensive, caractéristique de l'aiguille, d'autant plus intense que l'aiguille est aimantée. Par définition, le moment magnétique $\vec{\mu}$ d'un objet est défini comme le vecteur dont le produit vectoriel par l'induction magnétique

externe $\vec{B}$ donne le moment de force $\vec{\Gamma}$ que subit l'objet. Cette relation se traduit mathématiquement par : $\vec{\Gamma} = \vec{\mu} \wedge \vec{B}$ (Michel .H ; 1992 ; D. Giancoli ; 1989).

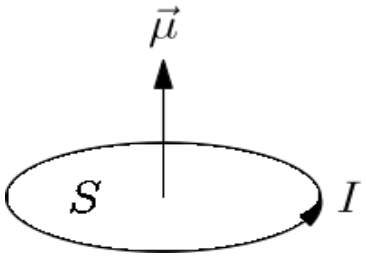


Fig. 6 : Moment magnétique $\vec{\mu}$ d'une boucle de courant d'intensité *I* et de surface *S*.

I.2.4.4. Le champ magnétique terrestre

Les chinois du onzième siècle savaient déjà que l'aiguille d'une boussole ne s'aligne pas partout dans la direction du nord-sud. Ce fait a été connu en Europe vers 1436, mais même de nos jours, beaucoup de gens sont surpris d'apprendre qu'une boussole indique rarement le vrai nord géographique. Une boussole à Chicago s'aligne presque exactement vers le nord mais à Los Angeles, elle s'oriente à 15° vers l'est et à New-York, elle s'oriente à $15°^{-}$ vers l'ouest.

Gilbert avait raison, au moins en affirmant que la terre produit un champ magnétique, comme si elle contenait un dipôle géant qui agit comme une aiguille aimantée relativement courte, placée au centre de la terre et inclinée à 11,5° par rapport à l'axe de rotation de la terre, dans le plan du méridien 70^{0-} ouest (fig.7). Mais, en fait, les choses sont beaucoup plus compliquées.

La terre produit un champ magnétique généré par des mouvements de convection du noyau externe constitué de métal liquide (essentiellement du fer et du nickel) de l'ordre de 10 µT. Ce noyau externe fonctionne comme une dynamo auto-excitée (on dit aussi auto-entretenue), c'est-à-dire que le champ magnétique est à l'origine des courants électriques qui eux-mêmes engendrent le champ (imbrication de l'induction électromagnétique et de la loi de Biot et Savart).

En outre, le noyau de la planète est trop chaud (≈ 2500 K) pour être totalement solide et aussi pour que les matériaux restent magnétiques ; nous n'avons donc pas une tige magnétique enterrée. Ce champ est de nature dipolaire et peut s'interpréter comme lié à l'existence d'un dipôle magnétique au centre de la terre de moment magnétique $\mu \approx 10^{23} A.m^2$ et dont l'axe est quasi-aligné avec l'axe des pôles. Il varie dans le temps, à la fois en module et en direction. Le dipôle pointe vers le sud géographique de telle sorte qu'une boussole à la surface de la terre indiquera le nord Géographique. Autrement dit, le nord géographique est un pôle sud magnétique.

En réalité, l'axe nord-sud magnétique n'est pas confondu avec l'axe sud-nord géographique. Il est incliné et subit quelques fluctuations journalières. Ce fait reste encore énigmatique pour les théoriciens. Il y a des astres où la configuration est encore plus exotique : par exemple, sur Neptune l'axe fait 90° avec l'axe de rotation. La valeur moyenne du champ magnétique est d'environ 0,5 gauss (soit 5.10^{-5}T) (G. Cardinael ; 1971 ; D. Giancoli ; 1989 ; Michel .H ; 1992).

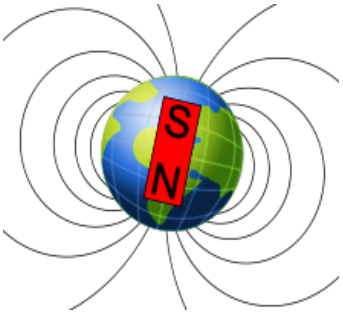


Fig. 7 : Schéma du champ magnétique terrestre.

I.2.4.4.1. Applications du champ magnétique terrestre

I.2.4.4.1.1. La boussole

L'aiguille d'une boussole parfaite (non perturbée par un champ parasite), s'oriente suivant la composante parallèle au cadran (normalement positionné horizontalement), restant tangente à la ligne de champ du lieu où elle se trouve. La boussole indique la direction du pôle nord magnétique (et non celle du pôle nord géographique) ; la différence angulaire relative étant appelée la déclinaison magnétique, dont la valeur dépend du lieu où l'on se trouve.

La boussole utilisée en navigation, appelée compas, n'indique généralement pas le nord magnétique, mais le nord compas, direction à laquelle il faut apporter encore une autre correction (appelée la déviation du compas), afin de retrouver la direction du nord magnétique.

La déclinaison magnétique d'un lieu est fournie sur les cartes détaillées (1/50 000 ou 1/25 000) de la région. Sur les cartes marines et aéronautiques est également fournie une estimation de sa variation annuelle (par exemple diminution de 6' par an). Pour certaines applications modernes (aviation, ...), on utilise plutôt un magnétomètre, qui mesure les trois composantes du vecteur champ magnétique.

I.2.4.4.1.2. Un bouclier protecteur de la vie

Le champ magnétique terrestre joue un rôle essentiel dans le développement de la vie sur la terre, en déviant les particules mortelles du vent solaire, formant ainsi les aurores boréales et australes.

Les scientifiques observent toutefois une diminution du champ magnétique terrestre, l'anomalie magnétique de l'Atlantique sud en étant le signe le plus spectaculaire.

Le noyau externe (liquide) qui génère le champ magnétique terrestre global, se refroidit très lentement. Le noyau interne (solide) grossit par la solidification du métal liquide du noyau externe en contact avec le noyau interne. Il est estimé que le noyau externe sera (presque) entièrement solidifié dans quelques milliards d'années, et que la terre présentera alors des conditions comparables à celles que présentent Vénus actuellement, sans champ magnétique global.

I.1.4.4.1.3. Un des moyens de guidage d'animaux migrateurs

De nombreux animaux grands migrateurs terrestres (ex : oiseaux) ou aquatiques (ex : tortues marines) semblent dotés d'une perception fine du champ magnétique terrestre, même si d'autres sens interviennent lors des migrations. Par exemple, les tortues caouannes sont sensibles à la latitude en fonction du champ magnétique terrestre et de son inclinaison. Ainsi, de très jeunes tortues de cette espèce placées, peu après leur éclosion, en bassin reproduisant des conditions de champ magnétique d'autres régions (Porto Rico et Cap-Vert, situés sur leur route migratoire habituelle à la même latitude (20°N), mais à des longitudes différentes) se sont rapidement orientées dans la direction qu'elles prendraient dans cet environnement (respectivement vers le NE et vers le SE) [8].

I.2.4.5. Les monopôles

En 1785, Coulomb a montré qu'une loi de la force magnétique pourrait être formulée sous une forme identique à la loi de la force électrostatique, à condition qu'on introduise la notion de charges magnétiques, ou monopôles. Cette théorie semblait si raisonnable qu'il fallut plus de 100 ans pour la réfuter. Le magnétisme n'est pas produit par des charges magnétiques.

Malgré cela, en 1931, P.A.M. Dirac présente des arguments théoriques ressuscitant la notion de monopôle magnétique.

Outre l'établissement d'une symétrie complète entre les charges électriques (+, -) et les pôles magnétiques (N, S), l'existence d'un monopôle magnétique fournit une explication de la quantification de la charge électrique. Actuellement, il y a des versions de la théorie dite grande unification (cfr physique des hautes énergies) qui essaie d'unifier toutes les forces de la nature.

Ces formulations considèrent que les monopôles furent créés lors du big-bang, qui a produit l'univers. S'il en reste des survivants, il n'est pas vraisemblable qu'il y a beaucoup autour de nous, encastrés dans des aimants. S'ils existent, les monopôles doivent être objets fascinants, beaucoup plus lourds que les autres particules (aussi massives qu'une bactérie) mais beaucoup plus petites qu'un proton.

[8] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme, consulté le 24 octobre 2017

Deux monopôles opposés s'attirent avec une force de 5000 fois plus grande que l'attraction coulombienne entre un proton et un électron.

Actuellement, au moins 35 groupes de recherche dans le monde essaient de trouver des monopôles. Mais jusqu'à présent, aucun résultat n'a pu être détecté. Ce résultat négatif pourrait signifier que les monopôles sont très rares et de trop grande masse pour qu'on puisse les produire actuellement, ou bien qu'ils n'en existent plus ou qu'ils n'ont jamais existé (Eugène. H ; 1999).

I.2.4.6. Champ magnétique créé par un courant

Au cours du 18ème siècle, un grand nombre de physiciens ont cherché à établir un rapport entre l'électricité et le magnétisme, mais ce n'est qu'en 1820 que Hans Christian Œrsted y est parvenu. Ayant toujours cru à l'unité de la nature, le physicien danois était convaincu sur le plan philosophique de l'existence d'u lien entre ces deux phénomènes, même si les expériences effectuées jusque-là démontraient qu'une charge électrique immobile et un aimant n'ont aucune influence l'un sur l'autre. Il s'est aperçu qu'une aiguille de boussole placée à proximité d'un fil électrique dévie aussitôt qu'on le branche à une pile et qu'un courant le parcourt.

I.2.4.6.1. Quelques faits historiques

1820 : expérience d'Œrsted

Au cours d'une expérience sur le courant électrique, le physicien danois Hans Christian Œrsted constate par hasard la déviation d'une boussole placée près d'un fil conducteur parcouru par un courant électrique (fig.8). Cette expérience prouve sans ambiguïté le lien entre courant électrique et champ magnétique. Par ailleurs, si on inverse le sens du courant, l'aiguille tourne de 180°. L'expérience d'Œrsted suscite un grand intérêt car c'est la première fois qu'on met en évidence une force qui n'est en interaction pas suivant la ligne joignant les deux corps et sera à l'origine de nombreux travaux sur le magnétisme.

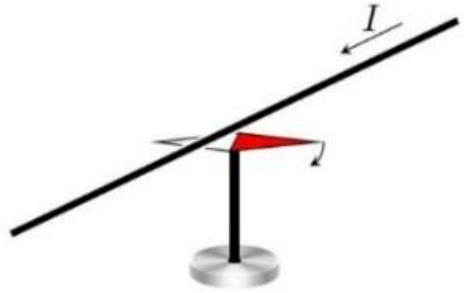


Fig. 8 : Expérience d'Oersted

1820 : les travaux d'Ampère et d'Arago

François Arago, après avoir assisté à une démonstration de l'expérience d'Œrsted à Genève, la présente à l'Académie des Sciences de Paris. Dans l'assemblée, Ampère est enthousiaste et se lance dans un travail expérimental et théorique. Ampère montre notamment que deux fils rectilignes parcourus par un courant s'attirent ou se repoussent selon que les courants sont dans le même sens ou pas (fig.9). Il montre également qu'une spire parcourue par un courant se comporte comme un aimant. On peut associer à une spire un pôle nord et un pôle sud. Si l'on change le sens du courant, la polarité change. Par ailleurs, Arago qui collabore avec Ampère découvre que le courant électrique a la propriété d'aimanter le fer, ce qui mènera à l'invention de l'électroaimant.

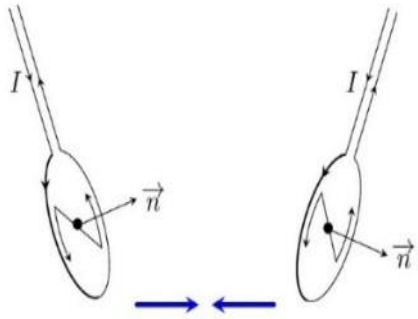


Fig. 9 : Expérience d'Ampère

Henry Rowland démontre à l'aide d'un travail expérimental très soigné qu'un disque chargé électriquement en rotation rapide produit un champ magnétique (fig.10). Autrement dit, les charges électriques en déplacement produisent les mêmes effets magnétiques qu'un courant électrique, ce qui suggère que le courant électrique est lié à un déplacement de charges électriques.

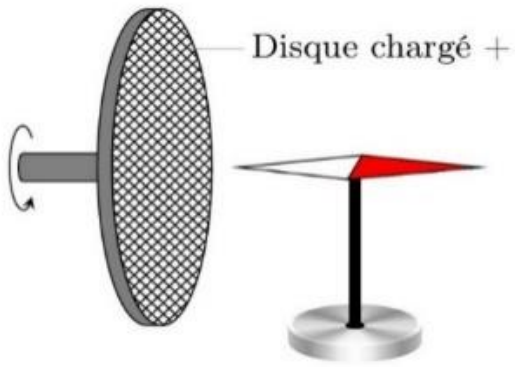


Fig.10 : Expérience de Rowland

I.2.4.6.2. Exemples de calcul

Champ magnétique d'un courant rectiligne

Un fil (conducteur) filiforme rectiligne transportant un courant produit un champ magnétique circulaire, ou plus précisément, un champ magnétique cylindrique dans l'espace qui l'entoure (fig.11). Ce champ a le même module en tous ces points équidistants du conducteur et il devient de plus en plus faible lorsque cette distance augmente. Des expériences, principalement menées par Jean -Baptiste Biot et Félix Savart en 1820, ont montré que le module du champ magnétique B dans l'air au voisinage d'un long conducteur filiforme et rectiligne est directement proportionnel à l'intensité du courant I qu'il transporte et inversement proportionnel à la distance r à ce conducteur : B~ I/r

Ce rapport se vérifie à condition que la distance perpendiculaire entre un point donné et le fil demeure très inférieure à celle qui sépare ce point des extrémités du fil. La constante de proportionnalité est $\frac{\mu_o}{2\pi}$ de sorte que : B= $\frac{\mu_o I}{2\pi r}$ .La constante μ_o ; appelée perméabilité magnétique du vide a une valeur de : $\mu_{o=4\Pi 10^{-7}}$ T.m/A.

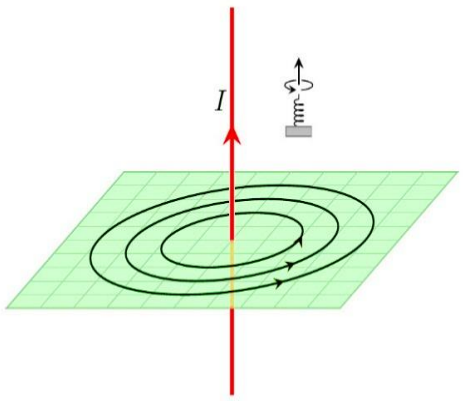


Fig. 11 : Champ magnétique créé par un fil rectiligne infini.

Après l'étude d'un champ magnétique d'un long conducteur rectiligne transportant un courant, Ampère eut une autre idée. Le courant rectiligne étant entouré par des lignes circulaires de champ magnétique (fig.12), si on courbe le conducteur pour former un anneau de courant ,on devrait concentrer le champ (comme c'est le cas en pliant une tige aimantée pour former un aimant en fer à cheval).Utilisant l'imagerie des lignes de champ magnétique ,nous pouvons prévoir que ces lignes qui s'étendent ,dans le cas du courant rectiligne ,pour remplir tout l'espace de chaque côté de la

ligne ,se trouvent encerclées et tassées ,lorsqu'on plie le conducteur pour former une spire de courant. Le champ à l'intérieur de la spire doit être beaucoup plus intense qu'à l'extérieur. La règle de la main droite donne toujours la direction d'un champ $\vec{B}$ .Si l'on inverse le sens du courant, la direction du champ est inversée. Les lignes de champ de la spire (fig.12) nous rappellent les lignes du champ d'un dipôle électrique dans la direction normale de la spire ou les lignes du champ magnétique d'une tige aimantée. Notant cette similitude, Ampère suggéra l'idée hardie que les courants électriques sont à l'origine du magnétisme. Ce qui est vrai, du moins en ce qui concerne l'origine du magnétisme orbital et intrinsèque de l'électron, il est dû au mouvement de sa charge.

Biot et Savart ont déterminé expérimentalement le champ magnétique au centre d'une spire de courant et ont trouvé qu'il est dirigé dans la direction de l'axe de la spire, dans une direction donnée par la règle de la main droite : si les doigts de la main droite sont placés dans la direction du courant, le pouce indique la direction $\vec{B}$ .Ils ont trouvé que le module du champ est proportionnel à l'intensité I et inversement proportionnel au rayon R de la spire :$B = \frac{\mu_o I}{2R}$

Si l'on place plusieurs spires identiques coaxiales l'une à côté de l'autre, on obtient une bobine. Si la bobine est plate et formée de N tours serrés transportant le même courant I, leurs champs, qui sont dans la même direction et égaux, s'ajoutent et l'on trouve : $B = N\frac{\mu_o I}{2R}$

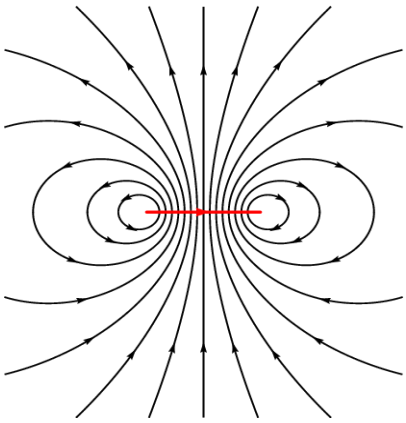


Fig. 12 : Champ magnétique créé par une spire circulaire.

Franchissant un degré supplémentaire, Ampère enroula un fil en une longue hélice (fig.13) ou solénoïde du nom grec, solénoïde qui veut dire « tube » et il trouva que, si le solénoïde transporte le courant électrique, il se comporte comme une tige aimantée. Dans le cas d'un solénoïde long et étroit (de longueur au moins 10 fois plus grande que son rayon) avec un enroulement serré, le

champ magnétique $\vec{B}$ à l'intérieur est intense et assez uniforme, surtout dans la région centrale proche de son axe.

Le solénoïde est l'un des éléments magnétiques les plus utiles (sonneries électriques, haut-parleur, systèmes de contrôle des équipements électroménagers, etc.). En tant qu'éléments de circuits, on les trouve dans les postes de radio, les téléviseurs, les ordinateurs, etc.

Un solénoïde est hélicoïdal ; il n'est pas donc pas exactement un ensemble de spires planes et parallèles, placées l'une à côté de l'autre. Le courant circule aussi d'une extrémité du solénoïde à l'autre ; nous avons donc une petite contribution supplémentaire au champ due à cette composante longitudinale superposée ; un nombre pair de couches ramène le courant électrique à son point de départ, ce qui élimine cette contribution supplémentaire du courant longitudinal.

Il est raisonnable de supposer que le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde est proportionnel à I. De plus, le champ augmente avec le nombre de tours qui le produit, mais nous devons aussi tenir compte de la façon dont ces tours sont enroulés. Transporter un courant de 100 tours sur une longueur de solénoïde de 1 m, produit surement un champ plus faible que 100 tours sur une longueur de 1cm.

Ce qui est important est donc le nombre de tours n par une unité de longueur du solénoïde. Si L est la longueur de la bobine et N est le nombre de tours ; alors n=N/L. on s'attend donc à avoir B~nI et effectivement on trouve expérimentalement que le champ d'un solénoïde dans l'air est donné par la relation : $B= \mu_o nI$.

Si on l'on s'imagine que le solénoïde de longueur L est formé par deux solénoïdes coaxiaux de longueur L/2, placés l'un après l'autre et transportant le même courant, on peut s'attendre à ce que chaque solénoïde produise au centre du solénoïde entier un champ égal à la moitié du champ du solénoïde entier : $\mu_o nI$. Nous déduisons que le champ produit par un solénoïde à son extrémité est la moitié du champ au centre.

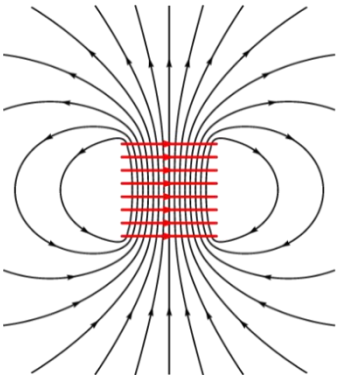


Fig. 13 : Champ créé par un solénoïde

I.2.4.6.3. Conclusion

Tout mouvement de charges, et notamment le courant électrique, est source de champ magnétique. L'étude quantitative des interactions entre aimants et courants fut réalisée par les physiciens Biot et Savart (1820). Ils mesurèrent la durée des oscillations d'une aiguille aimantée en fonction de sa distance à un courant rectiligne. Ils trouvèrent que la force agissant sur un pôle est dirigée perpendiculairement à la direction reliant ce pôle au conducteur et qu'elle varie en raison inverse de la distance. De ces expériences, Laplace déduisit ce qu'on appelle aujourd'hui la loi de Biot et Savart dont voici l'énoncé : Un circuit filiforme alimenté par un courant stationnaire d'intensité I produit un champ magnétique :$\overrightarrow{dB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \overrightarrow{dl} \wedge \vec{u}$ (G. Cardinael ; 1971 ; D. Giancoli ; 1989 ; Michel .H ; 1992).

I.2.4.7. Champ magnétique engendré par un aimant

L'aimant provoque une modification des propriétés de l'espace environnant (mouvement de particules chargées, aiguille aimantée). On dit que l'espace est le siège d'un champ magnétique. Ce champ magnétique peut être décrit en un point quelconque par un vecteur champ magnétique. L'aiguille aimantée est un vecteur de champ magnétique, elle permet de déterminer sa direction (droite SN) et son sens de S vers N de l'aiguille.

Le champ magnétique part du pôle nord de l'aimant créateur, car le pôle sud de l'aiguille est attiré par le pôle nord de l'aimant (Michel. H ; 1992).

I.2.4.8. Induction magnétique et auto-induction

I.2.4.8.1. Induction magnétique

L'induction magnétique, est un phénomène physique conduisant à l'apparition d'une force électromotrice dans un conducteur électrique soumis à un flux de champ magnétique variable. Cette force électromotrice peut engendrer un courant électrique dans le conducteur. Ce phénomène est notamment utilisé dans les transformateurs électriques, les bobines, ou encore les plaques à induction grâce aux courants de Foucault. Ce phénomène a pour origine la force de Lorentz appliquée aux électrons libres dans le conducteur électrique. On considère l'expérience suivante : un conducteur électrique se déplace dans un champ magnétique fixe. Suivant le référentiel dans lequel on choisit de se placer, on va observer deux types d'inductions, qui représentent le même phénomène :

I.2.4.8.1.1. L'induction de Lorentz

On parle de l'induction de Lorentz lorsqu'on considère le champ magnétique constant et qu'on déplace ou déforme le conducteur électrique. Dans ce référentiel les électrons ont alors une vitesse, et subissent une force, utilisée dans des machines à courant continu, qui correspond à la partie magnétique de la force de Lorentz :$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$

I.2.4.8.1.2. L'induction de Neumann

Dans le cas de l'induction de Neumann, le conducteur électrique est considéré rigide et fixe. Dans le référentiel du conducteur, les électrons n'ont pas de vitesse, donc la contribution de la force de Lorentz est nulle. Cependant, on observe la variation du flux du champ magnétique. C'est le cas des alternateurs, des moteurs asynchrones et moteurs à induction ainsi que des transformateurs électriques.

I.2.4.8.2. Auto-induction

On parle d'auto-induction lorsque la source du champ magnétique à l'origine d'une force électromotrice dans un circuit est le courant électrique parcourant ce même circuit. Le champ magnétique établit une rétroaction des variations du courant dans le circuit sur elles-mêmes.
L'auto-induction est la propriété électromagnétique remarquable qu'a un conducteur parcouru par un courant électrique, de s'opposer aux variations de celui-ci.
En effet, un conducteur parcouru par un courant électrique génère un champ magnétique (cf. loi de Biot et Savart). La loi de Lenz-Faraday décrit le phénomène suivant : lorsque le flux du champ magnétique qui traverse un circuit conducteur varie au cours du temps, il apparaît dans ce circuit une tension appelée force électromotrice. La f.é.m. ainsi créée est orientée de façon à générer des courants s'opposant à la variation d'un flux : $e = -\frac{d\phi}{dt}$.Toute variation du courant produit une variation de ce champ induit, ce qui a pour effet de produire une tension qui s'oppose à la variation du champ donc qui s'oppose à la variation du courant :$u = L\frac{di}{dt}$où L s'appelle le coefficient d'auto-inductance du circuit ou inductance propre du circuit. Il ne dépend que de la configuration géométrique du circuit, et est toujours strictement positif (D. Giancoli ; 1989).

I.2.5. Flux magnétique

Le flux magnétique est une mesure du champ magnétique total qui passe à travers une surface donnée. C'est un outil dont on se sert pour représenter les effets de la force magnétique sur un objet occupant cette surface. La valeur du flux magnétique dépend de la surface choisie. On peut la choisir de n'importe quelle dimension et l'orienter indifféremment par rapport au champ magnétique.

En représentant le champ magnétique sous forme de lignes de champ, chaque ligne du champ passant à travers la surface donnée contribue au flux magnétique. L'angle que fait la ligne de champ avec la surface a aussi son importance. Une ligne de champ formant un angle rasant avec la surface ne va pas beaucoup contribuer au flux. Lors du calcul du flux magnétique la seule composante du vecteur champ magnétique qui est utilisée est celle qui est normale à la surface considérée.

Soit une simple surface plane d'aire A traversée par un champ magnétique (d'amplitude B) formant un angle θ avec la normale à la surface, alors le flux magnétique est par définition : $\phi=BA\cos\theta$. Dans le cas où la surface est perpendiculaire au champ, l'angle est nul et le flux magnétique s'écrit simplement BA.

I.2.6. Forces magnétiques

Oersted démontre qu'un courant exerce une force sur une aiguille aimantée. Pour vérifier que c'était une interaction purement magnétique, Ampère fit passer un courant dans 2 fils verticaux ; le premier, fixe et le second suspendu de façon de pouvoir s'écarter comme une pendule sous l'action d'un champ magnétique B de l'autre. Effectivement, il s'écarta. L'existence d'une action du courant sur un aimant implique en vertu du principe d'action et de réaction ($3^{ème}$loi de Newton) qu'un aimant ou un champ magnétique en général exerce une force opposée sur un courant.

L'expérience des deux courants d'Ampère et plusieurs appareillages pratiques comprenant les moteurs, générateurs électriques vérifient cette conclusion.

I.2.6.1. Force de Lorentz

Le champ magnétique influence les particules chargées au travers de la force de Lorentz. En l'absence de champ électrique, l'expression de cette force est, pour une particule de charge q animée d'une vitesse $\vec{v}$:$\vec{F} = q\vec{v}\times\vec{B}$ (fig.14).

On peut réécrire cette relation sous forme différentielle pour un fil, en introduisant le courant électrique : $d\vec{F} = I\vec{dl}\Lambda\vec{B}$ avec I l'intensité du courant électrique, $\vec{B}$ le champ magnétique et $I\vec{dl}$ une portion infinitésimale de fil, symbolisée par un vecteur tangent à celui-ci.

Cette expression se généralise aux distributions de courants bidimensionnelles (surfaces et courants surfaciques) aussi bien que tridimensionnelles (volumes et courants volumiques). On introduit dans ces cas la notion d'« élément de courant » $d\vec{C}$, défini par :

- $d\vec{C} = \vec{I}dl$ pour un « fil », où $\vec{I}$ est le courant linéique;
- $d\vec{C} = \vec{j}_s \cdot dS$ pour une surface, où $\vec{j}_s$ est le courant surfacique ;
- $d\vec{C} = \vec{j}\,.d\tau$ pour un volume, où $\vec{j}$ est le courant volumique.

On a ainsi une expression générale : $d\vec{F} = d\vec{C} \times \vec{B}$

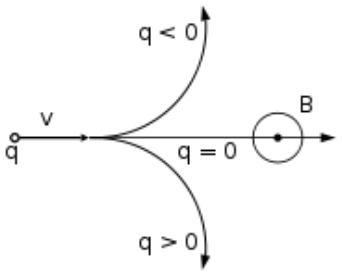


Fig. 14 : Force de Lorentz

I.2.6.2. Force de Laplace

La force de Laplace est simplement un cas particulier de la force de Lorentz, pour un barreau homogène et conducteur, parcouru par un courant électrique et placé dans un champ magnétique.
Contrairement à la force de Lorentz, elle ne traite pas des particules constituantes du barreau, mais de l'effet macroscopique : si son expression est similaire, le sens physique des objets considérés diffère. En particulier, la force n'est pas toujours orthogonale à la vitesse.

L'expression de la force de Laplace est : $d\vec{F} = I\vec{dl} \wedge \vec{B}$ où I est l'intensité du courant, $\vec{B}$ le champ magnétique et $\vec{dl}$ un élément infinitésimal du barreau (A. Brelot ; N.Hulin ; Jung-J. Klein ; 1967 ; Michel. H ; 1992 ; D.Giancoli ;1989).

I.2.7. Effet Hall

Un conducteur, parcouru par un courant électrique selon une direction, soumis à un champ magnétique dirigé dans une seconde direction, présente une différence de potentiel selon la troisième direction (fig.15). Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Hall, en l'honneur du physicien américain Edwin Herbert Hall.

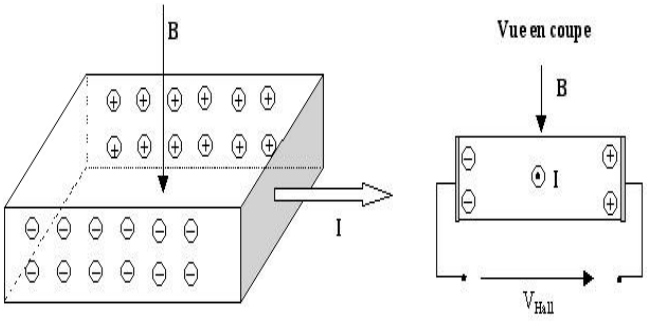


Fig. 15 : Effet Hall

On peut expliquer cet effet au travers de la physique classique, en considérant que les porteurs de charge (par exemple les électrons) qui se déplacent dans le corps du conducteur sont soumis à la force de Lorentz, donc déviés, de sorte que leur répartition est différente d'une part et d'autre part du conducteur, d'où la différence de potentiel. On peut l'expliquer de manière plus fondamentale du point de vue de la mécanique quantique. Cet effet est à la base de nombreux dispositifs de mesure du champ magnétique et du courant électrique (A. Brelot ; N. Hulin ; Jung-J. Klein ; 1967).

I.2.8. Aimantation du fer et de l'acier : électro-aimant

Alimentons la bobine simple en courant continu, elle présente une aimantation insuffisante pour soulever des clous. Par contre, introduisons dans la bobine (à l'intérieur de ses spires) un noyau de fer doux, les clous sont énergiquement attirés. Coupons l'alimentation, les clous retombent. Donc, cela signifie que l'aimantation prise par le fer doux est une aimantation temporaire.

I.2.8.1. Explication du phénomène : perméabilité magnétique

D'après l'expérience précédente, le fer canalise les lignes d'induction, on dit qu'il est plus perméable que l'air.

Le champ de la bobine crée dans tout milieu, un champ magnétique dont l'intensité est représentée, dans l'air par B_o, dans le fer par B. Nous constatons par l'expérience que B est plus grand que B_o.

Posons : B/ $B_o=\mu_r$ qui est la perméabilité relative (c'est-à-dire par rapport à l'air) du noyau utilisé. En effet, il existe donc une relation générale entre l'excitation magnétique (H) et le champ produit dans l'air (B_O) : $B=\mu_o .H$. Donc, nous pouvons écrire $B= \mu_r . B_o$; $B=\mu_r.\mu_o . H$; $B=\mu.H$ où $\mu =\mu_r.\mu_o$.

I.2.8.2. Cycle d'aimantation ou cycle d'hystérésis

On peut étudier les variations de B en fonction de B_O. (Cette expérience demande un rhéostat et un flux mètre).

Prenons le cas où le matériau n'a jamais subi d'aimantation et traçons sa courbe de première aimantation, nous aurons (fig.16) :

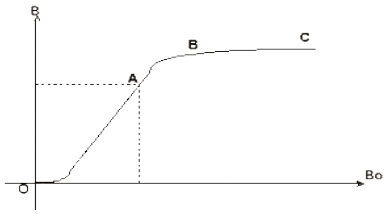


Fig. 16 : Courbe de la première aimantation

Puisque $B= \mu_r B_0$:

Pour la partie de la courbe OA, μ_r est grand.

Pour la partie de la courbe AB, $\mu_r$diminue rapidement.

Pour la partie de la courbe BC, $\mu_r$est presque constant.

On dit qu'il y a saturation du matériau. Donc on peut en conclure que la perméabilité relative du matériau n'est pas constante. Elle diminue à partir d'une certaine valeur. Si on mettait un noyau de composition différente, la courbe aurait toujours la même allure, mais la saturation sera atteinte plus ou moins rapidement.

Donc la perméabilité varie avec le matériau. Par contre à partir du point "C" faisons décroître, on constate que la courbe ne se superpose pas à la précédente courbe (CA), il y a retard à la désaimantation : c'est le phénomène que l'on appelle l'hystérésis. Quand est nul, il reste encore une certaine aimantation dans le matériau.

On l'appelle l'aimantation rémanente représentée sur le dessin (fig.17) par OA. Changeons le sens de (inversion de l'intensité). Pour une certaine valeur du champ magnétisant, l'aimantation disparaît. Ce champ est appelé champ coercitif : il correspond à OD sur le schéma. En continuant les variations de B_0 jusqu'à – B_{01}, puis en revenant à +B_{01}, on obtient une courbe fermée appelée cycle d'hystérésis.

Lorsqu'on soumet un matériau ferromagnétique à un champ magnétique croissant, son induction magnétique atteint une valeur maximale B, on dit qu'il y a saturation. Si le champ s'annule, le matériau conserve une induction rémanente B_s. Il faut appliquer un champ coercitif en sens inverse pour annuler cette induction.

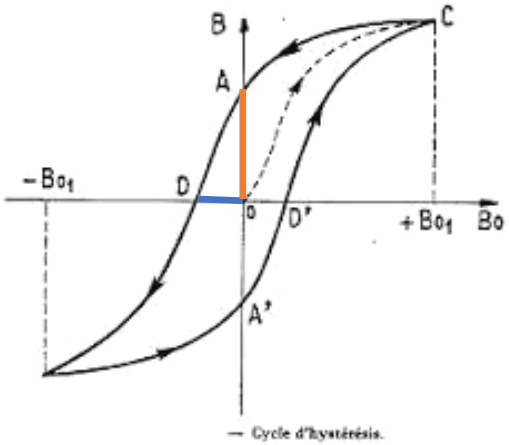


Fig. 17 : Cycle d'hystérésis

Il est intéressant de connaître le cycle d'hystérésis d'un matériau quant à son emploi dans la construction d'appareils ou de machines électriques. Si le champ coercitif est faible, la désaimantation sera faible ; donc le matériau sera inutilisable en tant qu'aimant permanent (fer doux, acier doux). Si le cycle a une grande surface, on démontre que le matériau s'échauffe d'autant plus que cette surface est grande, quand il est placé dans un champ magnétisant variable (cas du courant alternatif) ; il y aura une grande perte de puissance dans la machine où le matériau sera utilisé (D. Giancoli ;1989).

I.2.8.3. Les électro-aimants

Un électro-aimant produit un champ magnétique lorsqu'il est alimenté par un courant électrique : il convertit de l'énergie électrique en énergie magnétique. Il a été inventé par les Français André-Marie Ampère et François Arago.

Il est constitué d'un bobinage, d'une pièce polaire en matériau ferromagnétique doux appelé cœur magnétique qui canalise les lignes de champ magnétique, ainsi que d'un entrefer où est généré le champ magnétique utile.

I.2.8.3.1. Principe

Si nous plaçons un noyau de fer doux dans le champ d'une bobine magnétique, ce noyau prendra une aimantation temporaire de durée égale à celle du temps pendant lequel le courant circule dans la bobine. Nous constituons ainsi un électro-aimant. Un courant soumis à un champ subit une force.

Si l'on soumet un conducteur mobile, parcouru par un courant, à un champ magnétique, il se déplacera. C'est ainsi que fonctionnent tous les moteurs électriques (T. Etienne, 2000).

I.2.9. Applications du magnétisme

On dénombre de nombreuses applications du magnétisme dans la vie de tous les jours et dans le monde industriel ! Voici une liste explicative de ces dernières, certes non-exhaustive, mais évoquant les principales et les plus communes. Elles sont ci-dessous regroupées en catégories détaillées dans les paragraphes suivants.

I.2.9.1. Applications quotidiennes

I.2.9.1.1. Plaques à induction

Des bobines alimentées en courant alternatif génèrent un champ magnétique oscillant sur le fond ferromagnétique des casseroles. Puisque toute variation temporelle du flux magnétique traversant un matériau ferromagnétique y induit un courant de Foucault, il s'établit un courant dans le fond de la casserole. Cette mise en mouvement des électrons par la force de Lorentz entraîne une dissipation d'énergie par effet Joule, et donc sert à chauffer la casserole.

I.2.9.1.2. La recharge par induction des batteries

Suivant le même principe (cas des plaques à induction), la bobine située sur le socle de recharge induit des courants Foucault, cette fois-ci dans une seconde bobine située proche de la batterie de l'appareil à charger. Ces courants induits peuvent ainsi alimenter la batterie de l'appareil et la recharger. Pour obtenir un maximum de rendement, il est nécessaire d'aligner au mieux les bobines.
À la date du 23 juin 2015, la puissance maximale capable d'être transmise à un téléphone compatible avec le chargeur à induction est de 15 W. Le rendement entre le courant secteur et la batterie est d'environ 52% contre 65% en filaire.

I.2.9.2. Applications de l'électro-aimant

I.2.9.2.1. Electroaimant

Un électroaimant est un aimant pour lequel le champ magnétique est produit à partir d'un courant électrique. La manière la plus simple de réaliser un électroaimant est d'enrouler un fil conducteur autour d'un matériau ferromagnétique ou ferrimagnétique et l'alimenter. Ainsi le champ magnétique créé par le courant circulant dans le bobinage est porté par le cœur magnétique.
De nombreuses applications utilisent des électroaimants comme ci-bas indiqué :

I.2.9.2.1.1. Loquet de porte à électro-aimant :

Sur la partie fixe de la porte, il y a l'électroaimant et sur la porte, un matériau ferromagnétique ou ferrimagnétique permettant de fermer le circuit.

Ainsi, dans la gâche électrique d'une porte, quand l'électroaimant est alimenté, il tire le loquet bloquant la serrure, libérant ainsi la porte qui peut être ouverte sans clé ni poignée. Certains verrouillages de portes sont confiés à des électroaimants, dont la force d'attraction peut atteindre 6 000 N. Ce type de dispositif maintient des portes coupe-feu ouvertes dans certains immeubles, les libérant en cas d'incendie. Ce dispositif est appelé improprement ventouse. Cette application peut être schématisée comme ci-dessous (fig.18).

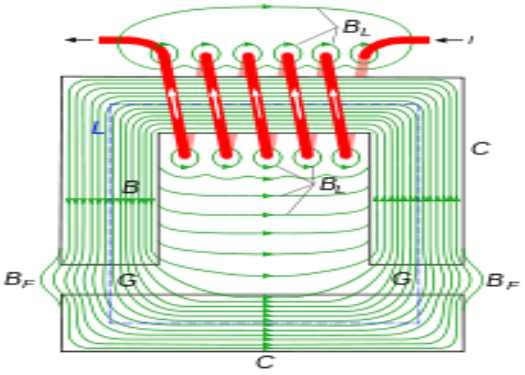


Fig. 18 : Champ magnétique d'un électroaimant

I.2.9.2.1.2. Les disques durs

Le stockage de l'information se fait en utilisant l'orientation de domaines magnétiques d'un film fin ferromagnétique déposé sur un disque. La taille de ces derniers est de l'ordre de 20nm. Sur un même bras mécanique, sont disposées la tête de lecture et la tête d'écriture. Cela permet à ces dernières de se positionner à n'importe quel endroit du disque en rotation pour qu'elles réalisent leurs actions. La tête de lecture la plus basique est une tête inductive constituée d'un électroaimant. Lorsqu'une zone magnétique passe à proximité de l'électroaimant, un courant électrique se forme dans le bobinage. Suivant la succession des régions magnétiques, le champ créé est plus ou moins intense, tout comme le courant induit (fig.19).

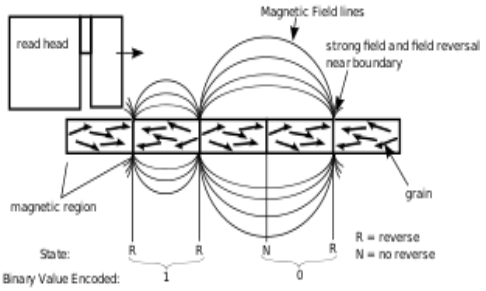


Fig. 19 : Schéma de fonctionnement d'une tête de lecture

Les têtes de lecture les plus récentes sont constituées de capteurs GMR et TMR, exploitant respectivement les effets de magnétorésistance géante et de magnétorésistance à effet tunnel. La variation du champ magnétique dans le disque influe sur la résistance électrique du matériau composant la tête de lecture. Ces têtes de lecture ont l'avantage, par rapport aux têtes inductives, d'être plus petites. Néanmoins, il est nécessaire d'effectuer un blindage magnétique autour du matériau magnéto résistif afin que seules les variations de champ magnétique du disque l'influencent. Dans méthode, la résolution entre deux pistes est limitée par la taille de l'élément magnéto résistif dans la tête de lecture.

La tête d'écriture est le plus souvent inductive. Constituée d'un électroaimant, cette dernière peut, suivant le sens du courant dans la bobine, appliquer aux différents domaines du disque des champs magnétiques opposés. L'objectif est d'appliquer un champ magnétique assez fort pour dépasser l'aimantation rémanente du matériau ferromagnétique et ainsi permettre au domaine magnétique de garder son aimantation en absence de champ magnétique.

I.2.9.2.1.3. Bande magnétique

La bande magnétique (ou ruban magnétique) est un support permettant l'enregistrement d'informations analogiques ou numériques à l'aide d'un magnétophone ou d'un magnétoscope. On y lit les informations en mesurant la polarisation de particules magnétiques (oxyde de fer) incluses dans un substrat souple. De part la robustesse de son stockage, son faible coût et sa grande capacité de stockage, la bande magnétique est idéale pour archiver des données ; d'autant plus que ce procédé de stockage présente un gros avantage dans l'archivage longue durée : il n'est pas sujet aux pannes mécaniques que peuvent rencontrer les disques durs.

On peut la trouver sous différentes formes : bandes magnétiques en bobine libre (bandes maintenues par le seul noyau), bandes en cassette, cartouches de bandes magnétiques. Lorsqu'il est question de stockage longue durée, il faut s'assurer de la robustesse du procédé. Le facteur limitant la durée de vie de la bande magnétique est l'altération dans le temps des particules magnétiques. Cette altération dépend fortement de la température d'entreposage [9].

[9] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme, consulté le 24 octobre 2017

I.2.9 .2.1.4. Autres exemples d'utilisations

-Les relais électromagnétiques, les disjoncteurs, les télérupteurs sont basés sur l'attirance d'une masse ferromagnétique par un électroaimant. Cette masse contrôle le déplacement des contacts électriques.

-Dans de nombreux automatismes électromécaniques, des mouvements linéaires relativement courts (moins de 5 centimètres) sont confiés à un électroaimant à noyau plongeur, application particulière de l'électroaimant.

-Le levage de masses métalliques ainsi que le tri des déchets métalliques est confié à de puissants et grands électroaimants.

-Les injecteurs de carburant (essence et gazole) des moteurs montés dans les automobiles actuels sont des électroaimants pilotés directement par le calculateur électronique de gestion du moteur. Lorsque le calculateur veut injecter du carburant, il fournit un courant électrique à l'injecteur, l'aiguille bouchant le trou d'injection recule laissant ainsi entrer le carburant sous pression dans le moteur. L'aiguille est remise en place par un ressort à la disparition du courant.
-Dans les enregistreurs magnétiques (magnétophone, magnétoscope, piste magnétique), l'électroaimant sert à aimanter les particules métalliques du support de l'information.

Pendant que le support magnétique (bande ou disque) défile devant une tête magnétique à une vitesse contrôlée, un courant électrique (image) de la source à enregistrer passe dans la tête, transférant ainsi l'information sous forme magnétique. Pour la lecture, le support défile de nouveau devant la tête magnétique, dans laquelle les variations de champ magnétique induisent un courant électrique, qui est amplifié et adapté pour être restitué dans sa forme originale.

-Dans la reproduction sonore, l'électroaimant est le moteur des haut-parleurs : une membrane est mise en mouvement par une bobine plongée dans le champ magnétique d'un aimant permanent. La membrane vibre au rythme du signal alimentant le signal (T. Etienne, 2000).

I.2.9.3 Applications médicales

I.2.9.3.1. Imagerie et caractérisation médicale

L'imagerie médicale regroupe les moyens d'acquisition et de restitution d'images du corps humain à partir de différents phénomènes physiques tels que l'absorption des rayons X, la résonance magnétique nucléaire, la réflexion d'ondes ultrasons ou la radioactivité, auxquels on associe parfois les techniques d'imagerie optique comme l'endoscopie. Apparues, pour les plus anciennes, au

tournant du 2O^{ème} siècle, ces technologies ont révolutionné la médecine grâce au progrès de l'informatique, en permettant de visualiser indirectement l'anatomie, la physiologie ou le métabolisme du corps humain. Développées comme outil diagnostique, elles sont aussi largement utilisées dans la recherche biomédicale pour mieux comprendre le fonctionnement de l'organisme. Elles trouvent aussi des applications de plus en plus nombreuses dans différents domaines tels que la sécurité, l'archéologie et l'art.

Le but de l'imagerie médicale est de créer une représentation visuelle intelligible d'une information à caractère médical. Cette problématique s'inscrit plus globalement dans le cadre de l'image scientifique et technique : l'objectif est en effet de pouvoir représenter sous un format relativement simple une grande quantité d'informations issues d'une multitude de mesures acquises selon un mode bien défini. [10]

I.2.9.3.2. Les différents principes d'imagerie médicale

I.2.9.3.2.1. Rayons X

Le scanner

Le scanner est une technique d'imagerie médicale qui permet d'étudier les différentes parties du corps humain, comme notamment le cerveau, la cage thoracique, l'abdomen ou encore les os. Le scanner permet de rechercher les anomalies qui ne sont pas visibles sur des radiographies de bases ou l'échographie, de mettre en évidence des infections, une hémorragie, des kystes ou encore des tumeurs, des ganglions ; permet aussi de localiser avec précision un organe par rapport à l'autre, et aussi définir le trajet du vaisseau. Son principe consiste à réaliser des images en coupes fines du corps de la personne. A l'inverse d'être fixe, le tube de rayons X va tourner autour de la personne et grâce à un système informatique puissant, on obtient par la suite l'image. Dans la plupart des cas, afin d'obtenir une meilleure qualité, un produit de contraste est utilisé à base d'iode.

Radiographie osseuse

La radiographie osseuse permet d'analyser tous les os et articulations du corps humain ; de détecter une fracture, une luxation, une tumeur ou encore de l'arthrose ; rechercher au niveau articulaire des signes de vieillissement comme l'arthrose, ou encore une accumulation de liquide dans une articulation comme l'épanchement, et encore une luxation. Le principe de celle-ci consiste à mettre sur un film radiographique les différences de densité des tissus radiographiés. Le film sera plus ou moins noirci selon les structures rencontrées. [11]

---

[10]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Imagerie médicale, consulté le 13 janvier 2108
[11] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Imagerie médicale, consulté le 13 janvier 2108

I.2.9.3.2.2. Les ultrasons

I.2.9.3.2.2.1. L'échographie

L'échographie permet l'étude de multiples organes de l'abdomen, du petit bassin, de cou (thyroïde, ganglions, foie, rate, pancréas, …), mais aussi des vaisseaux (artères et veines), des ligaments et du cœur. Elle recherche des anomalies qui pourraient atteindre ces organes (tumeurs, infections, malformations) et peut parfois guider un prélèvement en profondeur.
Au cours d'une grossesse, elle permet d'étudier la vitalité et le développement du fœtus, de dépister des anomalies ou encore de déterminer le sexe de l'enfant.

Son principe consiste à appliquer une sonde (comme stylo) contre la peau en regardant l'organe à explorer. Cette sonde émet des ultrasons qui traversent les tissus puis lui sont renvoyés sous forme d'un écho.

Ce signal, une fois recueilli, va être analysé par un système informatique qui transmet en direct une image sur un écran vidéo. L'échographie est une imagerie qui est à la fois morphologique et fonctionnelle selon le cas. [12]

I.2.9.3.3. Le champ magnétique : l'imagerie par résonance magnétique (IRM)

L'IRM étudie avec une grande précision de nombreux organes tels que le cerveau, la colonne vertébrale, les articulations et les tissus mous. L'IRM est d'une utilité lorsqu'une analyse très fine est nécessaire et que certaines lésions ne sont pas visibles sur les radiographies standards, le scanner ou l'échographie. Elle permet de faire des images en coupes dans différents plans et de reconstruire en trois dimensions la structure analysée. L'IRM utilise un champ magnétique (aimant) et des ondes radio. Aucune radiation ionisante n'est émise.

Son principe consiste à réaliser des images du corps humain grâce aux nombreux atomes d'hydrogène qu'il contient. Placés dans un puissant champ magnétique, tous les atomes d'hydrogène s'orientent dans la même direction : ils sont alors excités par des ondes radio durant une très courte période. A l'arrêt de cette simulation, les atomes restituent l'énergie accumulée en produisant un signal qui est enregistré et traité sous forme d'images par un système informatique.[13]

I.2.9.3.4. Les rayons gamma : la scintigraphie

La scintigraphie est une technique d'exploration qui permet de diagnostiquer des maladies. La scintigraphie est une méthode d'imagerie médicale qui procède par l'administration, dans

[12] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Imagerie médicale, consulté le 13 janvier 2108
[13] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Imagerie médicale, consulté le 13 janvier 2108

l'organisme, d'isotopes radioactifs afin de produire une image médicale par la détection des rayonnements émis par ces isotopes après captation par les organes à examiner. On injecte au patient un traceur : c'est l'association d'une molécule vectrice et d'un marqueur radioactif. La molécule vectrice se localise de façon sélective sur une structure particulière de l'organisme. Le marqueur radioactif sert d'émetteur et renseigne sur sa localisation. Il émet un rayonnement gamma qui va être détecté par un détecteur externe appelé gamma-camera. Le gamma-camera est une caméra à scintillation qui donne les scintigraphies. La scintigraphie s'effectue au niveau des os, des poumons et du cœur.

L'examen se déroule de façon suivante : après avoir administré le radiotraceur, on demande au patient de s'allonger, puis l'on fait déplacer autour du lit le gamma-camera à rotation ou translation.

Le délai entre l'administration du produit et l'examen proprement dit est variable selon l'organe que l'on désire explorer par scintigraphie [14] ; NTAGIRABIRI, R. (1997).

I.2.9.4 Applications liées au transport

I.2.9.4.1. Train à sustentation magnétique

Depuis le tout premier chemin de fer, peu de choses ont changé en termes de concepts techniques de base : les trains sont toujours soutenus, guidés et propulsés par les roues. Mais un nouveau système de trains a fait son apparition : ce sont les trains à lévitation magnétique, qui sont soutenus, propulsés et guidés par la seule force électromagnétique. Ce nouveau concept présente de nombreux avantages grâce à sa technique révolutionnaire dite de " non-contact ». Un train à sustentation magnétique est un train monorail utilisant les forces magnétiques pour se déplacer.[15]

I.2.9.4.2. Freinage magnétique

Le frein magnétique est utilisé comme frein supplémentaire dans le domaine ferroviaire et autoroutier en utilisant le principe du courant de Foucault.
Dans le domaine autoroutier, ces freins sont utilisés sur les camions et autocars et fonctionnent comme des ralentisseurs, plutôt que des freins, par le principe du courant de Foucault généré dans une masse métallique conductrice. Des disques solidaires des roues sont encadrés par des électroaimants. Sous tension, ces électroaimants vont induire un courant dans les disques, générant ainsi un couple de freinage.

[14]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Imagerie médicale, consulté le 13 janvier 2108
[15] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme,consulté le 24 octobre 2017

Il est utilisé dans le ferroviaire en complément du freinage pneumatique ou électrique pour accroître l'effort de freinage. Ce système n'est mis en fonction que pour les freinages d'urgence, quand il est nécessaire de freiner sur la distance la plus courte possible. Constitués d'un ensemble vérins + patins fixés sur le châssis du bogie (un bogie est un chariot situé sous un véhicule ferroviaire, sur lequel sont fixés les essieux ou les roues et relié au châssis principal par une articulation à pivot), les freins entrent en action par la descente des patins contre les rails grâce aux vérins. Afin de plaquer les patins sur les rails, un champ magnétique est créé [16].

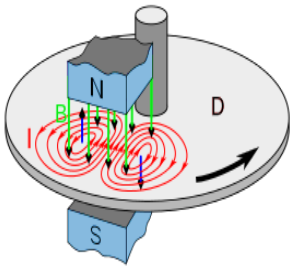


Fig.20. Schéma d'un disque de frein de Foucault

I.2.9.4.3. Capteurs magnétiques

Les capteurs magnétiques sont implantés dans de très nombreux objets qui du quotidien. Par exemple, une voiture récente peut en contenir plus d'une trentaine. Ceux-ci sont aussi présents dans les réfrigérateurs, les machines à laver, et même certaines chaussures de sport. En effet, des chercheurs travaillent actuellement sur la réalisation d'une semelle capable de s'adapter constamment.

Il existe environs quinze types de capteurs. Parmi eux, certains sont des capteurs de champs (capteurs mesurant directement la valeur du champ magnétique selon un ou plusieurs axes) et d'autres sont des capteurs de flux (capteurs mesurant l'intégrale du champ passant à travers une surface) [17].

I.2.9.5. Applications en électrotechnique

I.2.9.5.1. Les transformateurs

Un transformateur électrique est un convertisseur qui permet de modifier les valeurs de la tension et de l'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement. Il est analogue à un engrenage en mécanique

[16] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme,consulté le 24 octobre 2017
[17] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme, consulté le 24 octobre 2017

(le couple sur chacune des roues dentées étant l'analogue de la tension et la vitesse de rotation étant l'analogue du courant).

Un transformateur est constitué de deux parties : le circuit magnétique et les enroulements (fig.21). Les enroulements créent ou sont traversés par un flux magnétique que le circuit magnétique permet de canaliser afin de limiter les pertes. Dans le cas d'un transformateur monophasé parfait pour lequel toutes les pertes et les fuites de flux sont négligées, le rapport des nombres de spires primaires et secondaires détermine totalement le rapport de transformation du transformateur. Ainsi, si on note respectivement $n_1$et n_2 les nombres de spires au primaire et au secondaire (fig.21), on obtient :$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}$[18].

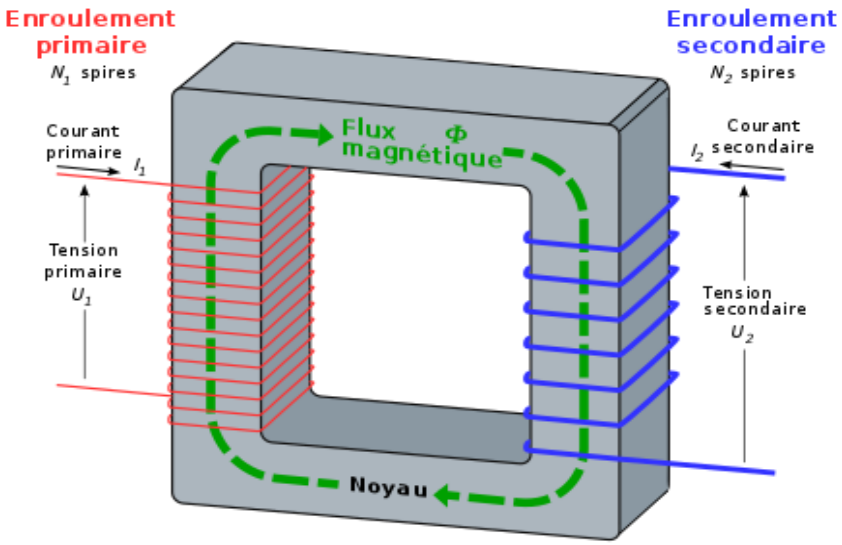


Fig. 21. Transformateur monophasé idéal

I.2.9.5.2. Les relais électromécaniques

Un relais est un composant électronique commandé par des faibles puissances (basses tensions et faibles courants) qui permet de jouer le rôle de commutateur sur des circuits électroniques à haute puissance (hautes tensions et forts courants) [19].

I.2.9.5.3. Moteurs électriques

Le moteur électrique est un dispositif électromécanique utilisant l'électromagnétisme pour permettre de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique.

---

[18] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme,consulté le 24 octobre 2017
[19] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme,consulté le 24 octobre 2017

Ce processus est réversible et permet également de produire une énergie électrique à partir d'une énergie mécanique. L'énergie produite est proportionnelle au couple et au déplacement angulaire du moteur. Les forces enregistrées par les champs magnétiques, formulées par la relation de Lorentz, permettent d'envisager des dispositifs qui utilisent un tel champ pour transformer l'énergie électromagnétique en énergie mécanique. Le premier moteur électrique fut construit par Peter Barlow en 1822 : la « roue de Barlow » qui est une plaque métallique en forme d'étoile et dont les pointes plongent dans un bac rempli de mercure qui permet la conduction électrique (fig.22).

C'est une roue, soumise à un champ magnétique permanent. Il exerce donc une force sur cette roue, qui se met alors en rotation. Elle constitue de fait le premier moteur électrique à courant continu. Cependant, elle ne produit qu'une faible force juste suffisante pour faire tourner la roue, ce qui ne permet pas d'application pratique.

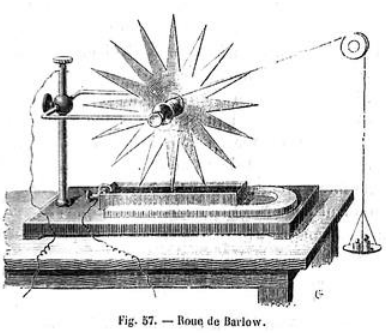

Fig. 57. — Roue de Barlow.

Fig. 22. Roue de Barlow

Les liens entre champ magnétique et champ électrique, exprimés par les équations de Maxwell, font qu'il est possible de construire des systèmes qui créent un champ magnétique non permanent à partir d'une source de courant au moyen d'électroaimants.

Au sein de tels appareils, on crée un champ magnétique à l'aide d'électroaimants fixes : ils constituent le « stator » et sont parcourus par un courant électrique d'intensité variable, par exemple triphasé. Un centre, une partie mobile et sensible au champ magnétique, constitué par exemple d'aimants permanents, est ainsi mise en mouvement : c'est le « rotor » dont le mouvement de rotation est transmis à un arbre. Ce principe est par exemple mis en œuvre pour les machines synchrones et les machines asynchrones. Une autre possibilité est de créer un champ permanent au stator d'aimants permanents ou d'enroulements parcourus par un courant continu et de réaliser un champ magnétique tournant au rotor par un système de connexions glissantes afin que ce champ

rotorique reste en quadrature avec le champ statorique. C'est le principe mis en œuvre pour la machine à courant continu [20].

I.2.9.5.4. Génératrice

Un générateur électrique est une machine permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie. En 1869, l'inventeur belge Zénobe Gramme améliore les premières versions archaïques d'alternateurs et rend possible la fabrication des génératrices à courant continu. En 1871, il présente la première génératrice industrielle de courant continu à l'Académie des Sciences de Paris, la machine de Gramme.

Le premier brevet n° 391968 du moteur électrique à courant alternatif actuel, est déposé par le physicien d'origine croate Nikola Tesla en 1887[21].

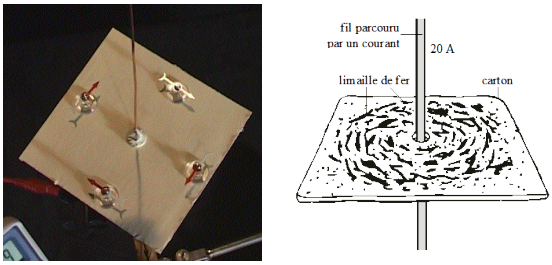
I. 3. Quelques expériences simples en magnétisme

Nous avons constaté que bon nombre d'écoles ne possèdent pas de laboratoires et ceux qu'on trouve dans certaines écoles ne sont pas bien équipés. Pour ce, nous proposons 3 expériences qui demandent des matériels didactiques simples :

I.3.1. Champ magnétique créé par un fil rectiligne

I.3.1.1. Introduction

Quatre petites boussoles sont disposées autour d'un fil électrique. Elles indiquent toute la direction du nord, mais lorsqu'un courant électrique passe dans le fil, leur position change et dessine le contour d'une ligne de champ magnétique (fig. 23)



(a) **(b)**

Fig. 23. Les boussoles autour d'un fil électrique(a) ; la limaille de fer

[20]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme, consulté le 24 octobre 2017
[21] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme, consulté le 24 octobre 2017

I.3.1.2. Matériel

Pour réaliser une telle expérience, les matériels suivants sont nécessaires :

- Une alimentation électrique (pile ou autre alimentation)
- Du fil conducteur en cuivre
- Un morceau de carton (environ 10 cm × 10 cm)
- 4 petites boussoles ou de la limaille de fer.

I.3.1.3. Montage et réalisation

Une expérience réussie nécessite un bon montage. Pour la nôtre, voici les étapes à suivre :
Poser un morceau de carton à cheval sur deux supports et le traverser en son milieu avec le fil de cuivre. Appliquer une tension continue aux bornes du fil. On voit alors les boussoles s'orienter dans la direction du champ magnétique. Ou si l'on utilise la limaille de fer, lorsqu'on tape sur le carton, on voit la limaille de fer déposée sur le carton sous forme des cercles concentriques autour du fil (fig.23.b).

II.3.1.4. Explications

Un conducteur parcouru par un courant crée un champ magnétique dans l'espace qui l'entoure. Les petites boussoles ou la limaille de fer s'orientent dans ce champ magnétique le long des lignes de champ car le fer est ferromagnétique. .
La disposition concentrique des lignes de champ résulte de la géométrie du dispositif expérimental. On tapote le carton simplement pour permettre aux petites boussoles ou aux grains de limaille de fer de se placer le long des lignes de champ malgré les frottements qui existent sur l'axe des petites boussoles ou entre les grains et le carton. Cette expérience est décrite dans certains livres avec une simple pile de lampe de poche comme alimentation : c'est parfaitement illusoire. Le champ magnétique créé par le courant de court-circuit d'une pile de 12 V est beaucoup trop faible pour permettre de réaliser son spectre dans ces conditions. Il faudra au maximum une tension de 10V.

I.3.2. Un petit moteur

Cette expérience de physique amusante est facile à réaliser mais demande quelqu'un pour dénuder le fil de cuivre et le mettre en forme.

I.3.2.1. Matériel

Le moteur peut être défini par ce qui donne le mouvement. Un mouvement peut être engendré par exemple grâce aux éléments suivants (fig.24) :

- Du fil de cuivre d'assez gros diamètre
- Une pile de 1,5V
- Trois ou quatre petits aimants
- Des conducteurs d'électricité.



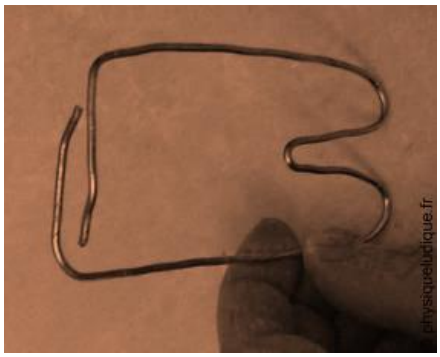
Fig. 24. Matériel pour réaliser un petit moteur

Mets plusieurs petits aimants sur le pôle positif de la pile, comme sur la photo (fig.25).



Fig.25. Plusieurs petits aimants sur le pôle positif de la pile

Dénude une vingtaine de centimètres de fil de cuivre. Puis plie le fil de cuivre de manière à avoir la forme indiquée sur la photo (fig.26.a). Il faut que la partie qui va être en contact avec les aimants, assure bien un contact électrique, sans qu'il y ait pour autant trop de frottements. La mise en forme de cette partie du fil de cuivre est la partie la plus délicate de l'expérience… (fig.26.b)



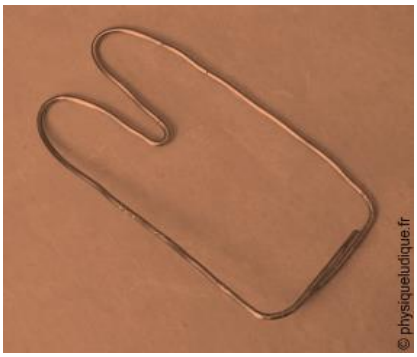


Fig.26a. Pliage du fil de cuivre **Fig.26b. Mise en forme du fil de cuivre**

Place le fil de cuivre ainsi modelé sur la pile, comme indiqué sur la photo et observe. (Fig.27). Ne laisse pas le fil de cuivre tourner trop longtemps car le fil et la pile chauffent assez rapidement (par effet Joule).





Fig.27 : Petit moteur

On vient de fabriquer un petit moteur puisque le fil de cuivre tourne !

Cette expérience met en évidence une force appelée par les physiciens *force de Laplace*. Cette force s'exerce sur un fil parcouru par du courant électrique à partir du moment où ce fil est dans une région de l'espace où un champ magnétique est présent. Dans notre expérience, le fil de cuivre est parcouru par du courant car les petits aimants sont conducteurs et le champ magnétique est également créé par ces petits aimants.

On peut montrer que cette force de Laplace est perpendiculaire au fil conducteur sur lequel elle s'exerce, et au champ magnétique. Son sens dépend du sens du courant et du sens du champ magnétique. Tu peux essayer de changer le sens des aimants et voir si ton moteur tourne également dans l'autre sens !

I.3.3. Fabriquer un électroaimant

I.3.3.1. Matériel

Un électroaimant est composé d'un noyau en fer doux, autour duquel circule un courant électrique. Pour en fabriquer un, il te faut un noyau de fer (clou ou tournevis), un bobinage de cuivre et une alimentation électrique (pile 1.5V). Tu dois créer un bobinage, c'est-à-dire un enroulement de fil de cuivre autour d'un élément en fer (clou, tournevis). Le fil sera ensuite relié à une pile ou une batterie, ce qui transformera votre bobinage en un électroaimant capable d'attirer de petits objets métalliques (fig.28). Même si les courants des dispositifs évoqués dans cette étude sont faibles, il n'en reste pas moins que c'est de l'électricité et qu'il faut donc faire attention.



Fig. 28. Matériel pour réaliser un électroaimant

I.3.3.2. Expérience

Prends une vingtaine de centimètres de fil de cuivre puis dénude chacun des bouts du fil. Enroule le fil de cuivre sur le clou (ou sur le bout du tournevis). Fais une dizaine de tours.

Le fil de cuivre doit avoir un diamètre assez gros (pour pouvoir supporter un courant de l'ordre de 0.5 A) et être à la fois assez flexible pour réaliser l'enroulement (fig.29).



Fig. 29. Enroulement du fil de cuivre autour du clou ou du tournevis.

Mets en contact un bout du fil dénudé avec un pôle de la pile à l'aide du scotch. Il faut faire en sorte qu'il y ait bien contact électrique.

Sans mettre en contact le deuxième bout dénudé du fil de cuivre avec le deuxième pôle de la pile, essaie d'accrocher des trombones avec le dispositif en les soulevant. Fais de même mais cette fois, en fermant le circuit électrique. Compare le nombre de trombones soulevés.

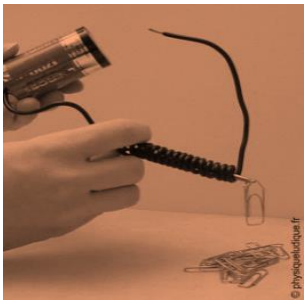


Fig. 30. Mise en contact d'un bout du fil dénudé avec un pôle de la pile

Avec le circuit électrique ouvert ; on soulève un trombone. Le champ magnétique créé n'est pas fort pour soulever plusieurs trombones (Fig.30)

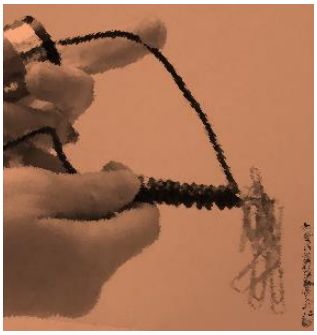


Fig.31. Mise en contact du deuxième bout du fil dénudé avec le deuxième pôle de la pile

Avec le circuit électrique fermé, on soulève une dizaine de trombones. Le champ magnétique créé est particulièrement fort, car il est canalisé dans le clou ! Le clou devient magnétique. L'électroaimant (plusieurs boucles de fils enroulés autour d'un noyau métallique) attire alors les trombones, comme le ferait un simple aimant**.** (Fig.31).

Déplace le dispositif avec les trombones, puis ouvre le circuit électrique en ne réalisant plus le contact électrique entre le deuxième bout dénudé du fil de cuivre et le deuxième pôle de la piler. Les trombones tombent (fig.32 et fig.33). Tu peux ainsi déplacer plusieurs trombones en même temps sans les toucher !



Fig.32 : Déplacement du dispositif avec les trombones et ouverture du circuit électrique

Lorsque le circuit électrique est ouvert, les trombones se décrochent **!**

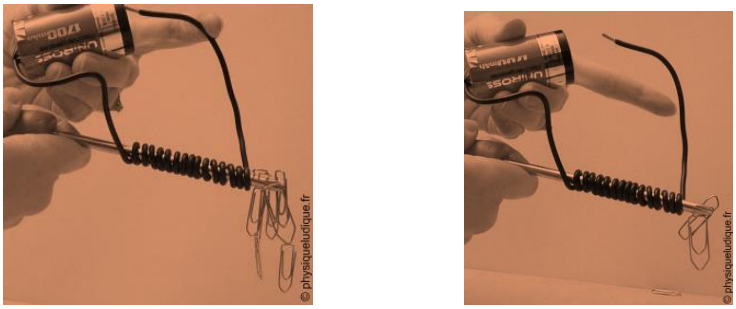


Fig.33 : Expériences réalisées avec un tournevis

Un courant peut créer un champ magnétique comme un aimant (voir les sources du champ magnétique)

Lorsque l'on enroule plusieurs boucles de fils autour d'un noyau métallique, comme le clou, le champ magnétique créé est particulièrement fort, car il est canalisé dans le clou ! Le clou devient magnétique. L'électroaimant attire alors les trombones, comme le ferait un simple aimant.

Lorsque tu coupes le courant qui parcourt le fil, on éteint le champ magnétique créé et les trombones tombent. On peut éteindre et allumer à volonté le champ magnétique créé, contrairement à ce qu'il se passe pour un aimant ! Les électroaimants présentent donc un réel avantage par rapport aux aimants permanents !

Dans l'expérience précédente, tu peux augmenter le nombre d'enroulements autour du clou et voir ainsi si le champ magnétique créé augmente en regardant si tu peux soulever un plus grand nombre de trombones.

Les électroaimants sont utilisés dans de nombreuses applications : pour déplacer des carcasses de voiture, dans le tri des déchets, dans des haut-parleurs, dans les trains à lévitation, dans de nombres circuits électroniques.

Conclusion

Dans le premier chapitre, nous avons donné un aperçu historique sur le magnétisme et présenté des généralités sur le concept de magnétisme. Nous avons également donné différentes applications du concept de magnétisme et proposé quelques expériences simples à réaliser en magnétisme.

CHAPITRE II. METHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce chapitre a pour but d'expliquer la méthodologie utilisée pour tester nos hypothèses. Dans un travail de recherche, plus la méthode utilisée est perfectionnée, plus sûrs et plus précis et donc plus utiles seront les résultats obtenus.

II.1. Cadre méthodologique

Dans notre travail, nous avons :
Consulté les programmes, les manuels et les cahiers des élèves dans le but de constater la part du concept de magnétisme dans l'enseignement de la physique au Burundi ;
Contacté les enseignants sous formes d'interview afin de se rendre compte de comment le concept de magnétisme est enseigné ;
Recouru au questionnaire d'enquête pour tester si les élèves maîtrisent le concept de magnétisme.

II.2. Population d'enquête et échantillon

II.2.1. Population d'enquête

Pour que la recherche soit valable et réalisable, il faut déterminer la population sur laquelle porte cette recherche. Selon Maurice Angers (1997), la population d'enquête est définie par l'ensemble d'éléments d'une ou plusieurs caractéristiques en commun qui les distinguent d'autres éléments sur lesquels porte l'investigation. Donc, une population donnée se reconnaît par un ou plusieurs critères qui rassemblent les éléments qui en font partie ; le nombre de ces éléments forme l'effectif de la population d'enquête. Les critères servant à délimiter cette population doivent être explicités selon la nature de l'enquête et des sujets à interroger.

Etant donné que le programme de physique dans l'ancien système nous montre que le concept de magnétisme est vu en seconde scientifique, nous avons choisi de mener notre étude auprès des élèves de la seconde scientifique des écoles secondaires en Mairie de Bujumbura.

II.2.2. Echantillon d'enquête

Selon Ghiglione et Matalon, (1978), étudier exhaustivement une population ou étudier tous ses membres est pratiquement impossible car cet exercice est long et coûteux voir même inutile ; il faut interroger un nombre restreint de personnes à condition qu'elles aient correctement été choisies, et

ce nombre peut apporter autant d'informations que toute la population, à une certaine erreur près, erreur calculable, et qu'on peut rendre suffisamment faible.

De ce fait, choisir un nombre restreint de personnes au sein de la population parente, c'est échantillonner qui, d'après G. De Landsheere (1979), signifie choisir un nombre limité d'individus, d'objets ou d'événements dont l'observation permet de tirer des conclusions applicables à la population entière à l'intérieur de laquelle le choix a été fait.

Ainsi, comme il n'est pas toujours possible voire même nécessaire d'étudier toute la population, le chercheur se contente de recueillir les informations nécessaires sur un échantillon. Par conséquent, les résultats obtenus auprès d'un sous-groupe doivent nécessairement refléter l'opinion de toute la population. En ce qui nous concerne, nous avons procédé à un échantillonnage de 8 établissements secondaires de la Mairie de Bujumbura qui sont : Ecole Indépendante, Ecole Saint Michel Archange, Lycée Clarté Notre Dame de Vugizo, Lycée du Saint Esprit, Lycée Municipal de Gihosha, Lycée Municipal de Gikungu, Lycée Scheppers, Lycée SOS.

II.3. Méthodes de recherche

II.3. 1.Questionnaire d'enquête

Le questionnaire est une méthode de recueil d'informations mise en place afin d'expliquer et de comprendre des faits. Selon Muchielli (1973) :« *Le questionnaire est une suite de propositions ayant une certaine forme et un certain ordre, sur lesquelles on sollicite l'avis, le jugement ou l'évaluation d'un sujet interrogé ».* On distingue deux types du questionnaire : le questionnaire ouvert et le questionnaire fermé. Pour le questionnaire ouvert, l'ordre des questions et leur formulation sont fixés. Cependant, le participant peut s'exprimer aussi longtemps qu'il le souhaite. L'enquêté a la possibilité de le relancer (Combessie, 2003) et pour le questionnaire fermé, les questions et la liste de propositions à soumettre aux participants sont fixées à l'avance. Ceci afin de permettre au locuteur de faire le meilleur choix possible (Combessie, 2003).

Le questionnaire auquel était annexée la motivation qui explique pourquoi nous sollicitons la collaboration des enquêtés est le principal outil pour collecter les données de notre travail. Contrairement à l'entretien et à l'observation qui sont des méthodes individuelles ou collectives, le questionnaire est une méthode seulement collective. En effet, c'est la quantité d'éléments collectés qui confère au questionnaire sa validité et qui permet aux données d'être jugées authentique. Selon les partisans de cette démarche, le fait d'élaborer un questionnaire permet de ne pas tomber dans le piège de la subjectivité. La méthode du questionnaire repose sur une démarche mathématique purement rationnelle (Vilatte, 2007).

II.3.1.1. Composition du questionnaire et son administration

Pour voir si les enquêtés ont ou pas compris le concept de magnétisme, nous avons formulé des questions pour y parvenir.

Il était demandé à chaque élève de compléter son identité et de suivre les consignes données avant de répondre au questionnaire (annexe 1).

Pour les élèves, nous avons laissé les questionnaires au professeur tout en expliquant comment il fallait les distribuer et nous avons récupéré les réponses soit après la leçon, soit le lendemain. Nous avons distribué 80 questionnaires. Concernant les enseignants, comme les disponibilités des enseignants étaient difficiles à avoir, les contacts (annexe 2) ont été effectués sur rendez-vous.

II.3.1.2. Dépouillement des réponses au questionnaire

Après avoir collecté toutes les réponses au questionnaire, nous avons commencé par lire ces réponses pour en prendre connaissances et par la suite, nous avons procédé au dépouillement de ces réponses pour dégager les résultats de notre enquête. A base des informations recueillies auprès de nos enquêtés, nous avons placé par catégorie les différentes réponses. Nous avons regardé combien de fois une réponse apparaît d'une manière globale. Nous avons calculé le pourcentage de chaque catégorie des répondants. Après le dépouillement, a suivi l'analyse (quantitative et qualitative).

II.3.2. Etude documentaire

Une étude documentaire est l'ensemble des méthodes, processus et techniques ayant pour objet de retrouver des références pertinentes (répondant à une demande d'information et les documents eux-mêmes. C'est une démarche méthodologique qui permet d'identifier

La recherche documentaire est une étape du travail de recherche qui consiste à trouver des sources afin de s'informer sur un sujet, répondre à une question ou réaliser un travail. La qualité du travail final est directement liée à la qualité de l'information utilisée pour le réaliser. C'est la raison pour laquelle la recherche documentaire constitue une étape cruciale dans la réalisation de tout travail de recherche. Autrement dit, lorsqu'on débite une réflexion sur un sujet, même si l'\'on a quelques idées, on se documente pour acquérir une meilleure connaissance. Cette méthode a été utilisée dans la réalisation de notre travail pour analyser le contenu de divers types de documents qui portent sur le concept de magnétisme. Cette méthodologie a été utilisée dans le but de constater la part du concept de magnétisme dans l'enseignement de la physique au Burundi.

II.3.3. Interview

Selon le dictionnaire Larousse, l'entretien désigne une nouvelle une conversation entre deux ou plusieurs personnes sur différents sujets. Les personnes peuvent être des amis, des membres de la famille ou autres.

Au sens scientifique l'entretien est une méthode de recherche et l'investigation. Par le biais de cette méthode, l'enquêteur cherche à obtenir des informations sur les attitudes, les comportements, les représentations d'un ou de plusieurs individus dans la société. A propos de cette méthode, Quivy et L.Van Campenhoudt (2011), signale qu'elle permet « *l'analyse du sens que les acteurs donnent à leurs pratiques et aux événements auxquels ils sont confrontés : leurs systèmes de valeurs, leurs repères normatifs, leurs interprétations de situations conflictuelles ou non, leurs lectures de leurs propres expériences*».

Les questions de l'entretien se préparent avant sa mise en place. En effet, avant d'aller sur le terrain, le chercheur élabore une série de questions qui va lui servir de guide tout au long de l'entretien. La préparation de l'entretien implique également la sélection des personnes à interroger. Le chercheur va interviewer uniquement les personnes qui ont probablement des informations sur son objet de recherche. A ce propos A. Anger (1997) indique que « *le chercheur interroge telle personne parce que cette personne possède telle caractéristique, parce que qu'elle appartient à telle couche sociale, parce qu'elle a comme tel type d'expérience* ».

Etant donné que l'interview est une méthode de recueil d'informations qui consiste en des entretiens oraux, individuels ou en groupes, avec plusieurs personnes sélectionnées soigneusement ; afin d'obtenir des informations sur des faits ou des représentations, dont on analyse le degré de pertinence, de validité et fiabilité en regard des objets du recueil d'informations, nous nous sommes servis de cette méthodologie a été utilisée afin de recueillir des informations, au sens le plus riche, auprès des enseignants et nous rendre de comment le concept de magnétisme est enseigné.

CHAPITRE III : PRESENTATION, ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Dans ce dernier chapitre ; nous allons présenter, analyser et interpréter les résultats obtenus avec nos investigations.

III.1. La part du concept de magnétisme dans les programmes d'enseignement de physique au Burundi

L'analyse faite était centrée plus précisément sur la partie qui parle du concept de magnétisme. Les programmes de physique au niveau de l'enseignement des humanités générales sont repris dans le tableau 2 ci-dessous :

Tableau2 : Contenu et commentaires sur les programmes de physique de l'enseignement des humanités générales au Burundi.

Classe	**Contenu**	**Commentaires**
7ème Année	1. Autour de nous : le changement 2. Le mouvement 3. Les forces 4. La chaleur 5. La lumière 6. Le son 7. Les mélanges 8. Séparation des constituants d'un mélange 9. Divisibilité de la matière	Aucune notion parlant du magnétisme n'est vue en 7ème Année
8ème Année	1. Objet de la physique 2. Masse d'un corps 3. Volume d'un corps 4. Masse volumique d'un corps 5. Notion de force 6. Poids d'un corps **Statique des fluides** **7.** Introduction 8. Notion de pression	On remarque que les notions du magnétisme ne figurent pas sur ce programme

	9. Pression dans les fluides	
9ème Année	**Première Partie : Statique Des Fluides** 1. Principe fondamental de l'hydrostatique 2. Poussée d'Archimède **Deuxième Partie : Optique** 6. Propagation rectiligne de la lumière 7. Les lentilles 8. Les miroirs 9. Les couleurs	Le magnétisme ne figure pas sur le programme en 9ème Année
10ème Année	**Thermodynamique** 1. Chaleur (rappel entre chaleur et température) 2. Transformation de l'énergie mécanique en énergie calorifique 3. Echanges de chaleur 4. Propagation de la chaleur 5. Changement d'état **Electrostatique** 1. Rappel : structure de la matière 2. Phénomènes d'électrisation 3. Loi de Coulomb 4. Bons et mauvais conducteurs 5. Applications -foudre **4. Electrocinétique** 1. Notion de courant électrique 2. Générateur de courant électrique 3. Intensité du courant 4. Tension entre deux points d'un circuit 5. Loi d'Ohm 6. Association des piles 7. Association des résistances 8. Les effets du courant électrique 9. Application	On remarque que le magnétisme en 10ème Année est vu superficiellement car on parle des aimants et d'effets magnétiques

	10. Puissance électrique **Electromagnétisme** 1. Les aimants 2. Effets magnétiques du courant 3. Application : sonnette électrique 4. Notion simple de courant alternatif 5. Fonctionnement de la génératrice de bicyclette comme moteur électrique 6. Emploi de transformateurs 7. Emploi de redresseurs	
3èScientifique	**Statistique des solides** 1. Masse d'un corps 2. Les forces 3. Principe d'action et de réaction 4. Equilibre d'un solide soumis à 2 forces 5. Equilibre d'un solide soumis à 3 forces 6. Equilibre d'un solide mobile autour d'un axe fixe 7. Couple de forces **Dynamique** 1. Travail et puissance 2. Quelques machines **Pressions créées par les solides et fluides** 1. Pressions créées par les solides 2. Pressions créées par les fluides 3. Pressions dans les fluides **Thermodynamique** 1. Etats de la matière 2. Dilatation des solides et des liquides 3. Loi des gaz parfaits 4. Calorimétrie 5. Changements d'état solide 6. Incertitudes	On constate que la notion du magnétisme n'est pas vue en 3ème Scientifique

2nde Scientifique	**Electrostatique** 1. Courant électrique **Electrocinétique** 1. Nature du courant électrique 2. Energie électrique consommée 3. Association des appareils électriques **Electromagnétisme** 1. Les aimants 2. Le champ magnétique 3. Le champ magnétique terrestre 4. Le champ magnétique créé par un courant 5. Action d'un champ magnétique sur un élément parcouru par un courant : loi de Laplace 6. Travail des forces électromagnétiques 7. Aimantation du fer et de l'acier 8. Induction électromagnétique **Optique géométrique** 1. Propagation rectiligne des ondes lumineuses 2. Réflexion de la lumière par un miroir plan 3. Réfraction 4. Prisme 5. Composition de la lumière blanche 6. Lentilles sphériques minces 7. Lentilles minces convergentes 8. Lentilles minces divergentes 9. L'œil 10. La loupe 11. Microscope 12. Appareil photographique 13. Les incertitudes	On remarque que la partie qui nous parle du magnétisme ne figure pas directement sur le programme mais il est inclus dans l'électromagnétisme
1ère Scientifique	**Cinématique**	Le magnétisme n'est pas vu

	1. Mouvements rectilignes 2. Mouvements curvilignes 3. Mouvement rectiligne sinusoïdal 4. Mouvement circulaire uniforme **Dynamique** 1. Relation fondamental de la dynamique pour un mouvement de rotation autour d'un axe 2. Quantité de mouvement 3. Moment cinétique 4. Energie cinétique d'un système 5. Energie cinétique d'un système : déformation 6. Energie mécanique d'un système 7. Pendule pesant **Vibrations et ondes** 1. Généralités 2. Interférences mécaniques 3. Le son 4. Ondes stationnaires 5. Interférence lumineuse 6. Panorama général des ondes électromagnétiques **Courant alternatif** 1. Production d'une f.é.m. alternative 2. Lois générales 3. Les effets du courant alternatif 4. Lois d'Ohm 5. Puissance en courant alternatif **Effet Thermoélectrique** 1. Principe de l'émission des électrons d'un métal par chauffage **Effet photoélectrique-nature corpusculaire de la lumière**	en 1ère Scientifique

	1. Cellule photo-émissive 2. Interprétation 3. Intérêt pratique 4. Double nature corpusculaire et ondulatoire de la lumière **Equivalence Masse-Energie** 1. Création et annihilation des paires « particules-antiparticules » 2. Généralisation de la relation précédente **Radioactivité** 1. Détection et nature des rayonnements émis spontanément par certains noyaux 2. Période d'un radio-nucléide 3. Radioactivités	

Après avoir passé en revue le programme de physique en vigueur dans les écoles secondaire, on remarque que quelques notions comme celle de la force reviennent plusieurs fois dans différentes classes. Ici le concept magnétisme n'est pas approfondi comme la force alors qu'il est un des fondements de la technologie qui est la base du développement du pays.

Il nous plaît de rappeler que, compte tenu des réformes menées dans le système éducatif, le cours de physique en soi n'existe pas dans le 4ème cycle de l'école fondamentale (cycle inferieur de l'ancien système).

Pour le nouveau système, le programme de physique en seconde est le même à part qu'on exclut le point parlant des aimants. Le volume horaire de physique est largement supérieur à celui de l'ancien système (7 heures par semaine en Maths-Physique-Technologies et 4 heures pour la Biologie-Chimie -Sciences de la Terre) ; ce qui permet aux enseignants de développer les points du concept de magnétisme.

III.2. La part du magnétisme dans les manuels d'enseignement du cours de physique au niveau du cycle supérieur de l'enseignement secondaire.

Les manuels ont une grande importance dans l'enseignement. Le manuel scolaire, par son statut d'instrument d'enseignement et d'apprentissage des sciences physiques, largement utilisé par les élèves et les enseignants, ne laisse pratiquement pas de place aux représentations. C'est dire combien le discours scientifique d'enseignement continue à ignorer les conditions même de sa réception.

Il revient à l'enseignant de transformer, restructurer les savoirs mentionnés dans un manuel scolaire et l'enrichir. Pour enseigner un savoir qui répond aux objectifs d'un enseignement bien conçu, l'enseignant doit avoir une formation solide et se documenter. Or la formation des enseignants de physique est organisée au niveau de l'enseignement supérieur en grande partie. Donc, nous allons voir le rôle accordé au concept de magnétisme par les manuels scolaires utilisés au Burundi.

Parmi les manuels utilisés au Burundi, celui qui est conforme au programme de la seconde scientifique est le manuel : « Physique premières C, D, E ; Paris ; Hachette ». Ce dernier présente un avantage étant donné qu'on trouve des questions de synthèse pouvant permettre une bonne compréhension de la matière à la fin. Le reste du programme d'enseignement de physique au niveau du cycle supérieur de l'enseignement secondaire au Burundi se trouve dans d'autres manuels comme : Physique seconde C et T, Edition Saint-Paul Duala.et Physique terminales C-D-E, Paris ; Hatier. Le concept de magnétisme se trouve seulement dans le manuel : « Physique terminale C et E ; Paris ; Hachette ».

III.3. Analyse des cahiers des élèves

L'analyse faite à base des cahiers et qui se focalise plus précisément sur la partie qui parle du concept de magnétisme nous montre que la notion du magnétisme n'est pas bien approfondie suite à l'insuffisance horaire hebdomadaire du cours de physique alors que le programme est trop vaste. Cela conduit à un problème pour certains enseignants ayant de problèmes pour exploiter la matière.

Si on analyse la façon dont est conçu l'enseignement de physique au Burundi, on constate que l'enseignement du concept de magnétisme repose essentiellement sur l'apprentissage et la manipulation des formules. Cet apprentissage est centré surtout sur l'aimantation et ses propriétés, ce qui répond à la définition qu'on trouve dans les cahiers des élèves (Le magnétisme est la partie de la physique qui étudie les propriétés des aimants et les phénomènes qui s'y rattachent). En outre, les applications du magnétisme ne figurent pas dans le plan du cours et les exercices donnés dans le manuel interpellent d'autres concepts physiques et la manipulation des formules.

Les contenus des différents cahiers consultés sont repris dans le tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3 : Matière vue sur le magnétisme ; contenus des cahiers des élèves

Ecole	**Type d'école**	**DCE**	**Qualification de l'enseignant**	**Matière vue sur le magnétisme**
Ecole1	Ecole à régime d'externat	Ntahangwa	Licencié en Physique	-Introduction avec quelques définitions -Les aimants -Le champ magnétique -Le champ magnétique terrestre -Le champ magnétique créé par un courant -Action d'un champ magnétique sur un élément parcouru par un courant : loi de Laplace
Ecole 2	Ecole à régimes d'externat et d'internat	Ntahangwa	Licencié en Physique	Toute la matière prévue sur le magnétisme est vue
Ecole 3	Ecole à régime d'externat	Ntahangwa	Licencié en Physique	-Introduction avec quelques définitions -Les aimants -Le champ magnétique -Le champ magnétique terrestre -Le champ magnétique créé par un courant -Action d'un champ magnétique sur un élément parcouru par un courant : loi de Laplace - Aimantation du fer et de l'acier
Ecole 4	Ecole à régime d'externat	Ntahangwa	Licencié en Physique	Même matière qu'à l'école 1
Ecole 5	Ecole à régimes d'externat et	Mukaza	Licencié en Pédagogie Appliquée, agrégé de l'enseignement	-Les aimants -Le champ magnétique -Le champ magnétique terrestre

	d'internat		secondaire en physique	-Le champ magnétique créé par un courant -Action d'un champ magnétique sur un élément parcouru par un courant : loi de Laplace
Ecole 6	Ecole à régime d'externat	Mukaza	Licencié en Physique	Même matière qu'à l'école 1
Ecole 7	Ecole à régime d'externat	Mukaza	Licencié en Pédagogie Appliquée, agrégé de l'enseignement secondaire en physique	Même matière qu'à l'école 2
Ecole 8	Ecole à régime d'externat	Mukaza	Licencié en Physique	Même matière qu'à l'école 1

III.4. Résultats de l'enquête auprès des élèves

Les réponses au questionnaire constitué par des questions fermées et ouvertes qui a été adressé aux ont été collectées, puis dépouillées. Dans cette partie, les résultats du dépouillement sont présentés sous formes de tableaux et de pourcentages. Ils sont ensuite analysés, interprétés et commentés. Le tableau 4 présente la répartition dans les écoles de l'échantillon, des questionnaires distribués aux élèves et des réponses (à ces questionnaires) collectées.

Tableau 4 : Répartition de l'échantillon des élèves selon les écoles

Localités	Questionnaires Distribués	Questionnaires récupérés	%
Ecole Indépendante	8	8	100
Ecole Saint Michel Archange	8	8	100
Lycée Clarté Notre Dame de Vugizo	16	16	100
Lycée du Saint Esprit	16	16	100
Lycée Municipal de Gihosha	8	8	100

Lycée Municipal de Gikungu	8	8	100
Lycée Scheppers	8	8	100
Lycée SOS	8	8	100
Total	80	80	100

En analysant ce tableau, nous voyons que les 80 élèves invités à répondre à notre questionnaire nous ont répondu, soit 100%. Cela était dû au fait que les professeurs donnaient le questionnaire comme un travail à coter. Le tableau 5 montre quant à lui la répartition des questionnaires dans les sections scientifiques (A et B) des écoles enquêtées.

Tableau5 : Répartition de l'échantillon des élèves selon les variables sections et écoles

Ecoles	Scientifique A	Scientifique B	%
Ecole Indépendante	-	8	100
Ecole Saint Michel Archange	-	8	100
Lycée Clarté Notre Dame de Vugizo	8(50%)	8(50%)	100
Lycée du Saint Esprit	8(50%)	8(50%)	100
Lycée Municipal de Gihosha	-	8	100
Lycée Municipal de Gikungu	-	8	100
Lycée Scheppers	-	8	100
Lycée SOS	-	8	100
Total	16(20%)	64(80%)	100

Ce tableau nous montre que les élèves de la section scientifique B ((80%) du taux général) de nos enquêtés sont plus nombreux que ceux de la section scientifique A ((20%) du taux général). Ceci est dû au fait que la section scientifique A est dans très peu d'écoles.

Résultats pour chaque question

Q1 : Peux-tu définir le magnétisme ?

A travers cette question, nous avons voulu savoir comment les élèves conçoivent le concept magnétisme. Ce concept a des définitions complexes. Le tableau 6 montre les réponses des élèves enquêtés.

Tableau 6 : Distribution des fréquences des réponses des élèves sur la définition du magnétisme

Réponses	Fréquence	%
Oui	80	100
Non	-	0
Total	80	100

La lecture du tableau ci-haut nous laisse constater que tous les élèves enquêtés peuvent définir le magnétisme, soit 100%. Néanmoins les réponses données ne sont pas toutes correctes. Voici les différentes définitions de ce concept :

Sens 1 : Le magnétisme est défini par l'ensemble de phénomènes physiques dans lesquels les objets exercent des forces attractives ou répulsives sur d'autres matériaux[22].

Sens 2 : Partie de la physique qui étudie les propriétés des aimants (naturels ou artificiels) et les phénomènes qui s'y rattachent. (Dictionnaire petit Robert

Sens3 : Ensemble des phénomènes propres aux aimants et aux champs magnétiques (traduction anglais : magnetism)**.**

Sens 4 : Partie de la physique étudiant les propriétés des aimants et des champs magnétiques.

Voici certaines réponses que donnent les élèves comme définition du magnétisme :

- Le magnétisme est la partie de la physique qui étudie les propriétés des aimants et les phénomènes qui s'y rattachent ;
- Le magnétisme est la partie de la physique qui étudie les propriétés des aimants ;
- Le magnétisme est la partie de la physique qui étudie les phénomènes provoqués par des aimants ainsi leur propriété ;
- Le magnétisme est la partie de la physique qui étudie les aimants ;
- Le magnétisme est l'ensemble des phénomènes que possèdent les matériaux aimantés ;
- Le magnétisme est un phénomène de répulsion ou d'attraction qu'on observe entre deux ou plusieurs corps chargés ;

[22] . https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétisme,consulté le 24 octobre 2017

- Le magnétisme est la propriété de la physique que possède un aimant de pouvoir attirer les métaux contenant le fer ou le cobalt ;
- Le magnétisme est la propriété que possède un aimant de pouvoir attirer les objets métalliques contenant le fer, l'acier ou le cobalt ;
- C'est l'ensemble de phénomènes liés au champ magnétique ;
- C'est l'ensemble des lois et concepts basés sur l'attraction et la répulsion entre les objets et les corps magnétiques ;
- Le magnétisme est l'aimantation de l'acier ;
- Le magnétisme est une propriété physique qui concerne toutes les particules d'un aimant ;
- Le magnétisme est l'attraction entre deux corps différents.

Parmi toutes ces réponses, seule la première définition (1,17%) est correcte et les autres (98,83%) sont fausses mais proches de la réalité.

Q2 : Connais-tu les concepts centraux du magnétisme ?

En posant cette question, nous avons voulu nous rendre compte ou pas si les élèves connaissent le fondement du magnétisme. Les réponses des élèves à cette question sont résumées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Distribution des fréquences des réponses des élèves sur les concepts centraux du magnétisme

Réponses	Fréquence	%
Oui	60	75
Non	15	18, 75
Je ne sais pas	5	6,25
Total	80	100

En analysant le tableau ; nous constatons que l'avis des élèves disant qu'ils connaissent les concepts centraux du magnétisme couvre la majorité (75%). Il y a ceux qui disent qu'ils ne connaissent pas ces derniers (18, 75%). D'autres disent qu'ils ne savent pas la réponse (6,25%).

Les concepts centraux du magnétisme sont : le champ magnétique et le moment magnétique.

Voici certaines représentations des élèves :

❖ Moment magnétique et champ magnétique ;

❖ L'aimant et champ magnétique ;

❖ Champ et moment magnétique.

Q3 : Quelle est la différence entre une grandeur vectorielle et une grandeur scalaire ?

Les grandeurs vectorielles et scalaires sont différentes. Cette question a été posée dans le but d'inviter les élèves à donner les éléments qui servent à différencier une grandeur vectorielle et une grandeur scalaire.

Tout le monde a donné la différence entre une grandeur vectorielle et une grandeur scalaire et les réponses données à cette question donnent une représentation proche de la réalité.

La différence entre une grandeur vectorielle et une grandeur scalaire est qu'une grandeur vectorielle est une grandeur caractérisée par une origine (point d'application), une direction (la droite), un sens (indiqué par la flèche) et un module (représenté par la longueur du segment), tandis qu'une grandeur scalaire est une grandeur ordinaire déterminée par une simple valeur numérique positive ou négative.

Après dépouillement des réponses à la question, nous avons constaté que les réponses qui reviennent souvent sont :

- La différence entre une grandeur vectorielle et une grandeur scalaire est qu'une grandeur vectorielle est une grandeur qui a les caractéristiques : l'intensité, le sens, la direction ; tandis qu'une grandeur scalaire est une grandeur qui n'a pas ces caractéristiques ;
- La différence entre une grandeur vectorielle et une grandeur scalaire est qu'une grandeur vectorielle est variable tandis qu'une grandeur scalaire est invariable ;
- La différence entre une grandeur vectorielle et une grandeur scalaire est qu'une grandeur vectorielle est caractérisée par l'intensité, le sens, la direction ; tandis qu'une grandeur scalaire est invariable ;
- La différence entre une grandeur vectorielle et une grandeur scalaire est qu'une grandeur vectorielle est caractérisée par 4 caractéristiques : l'intensité, le sens, la direction et le point d'application tandis qu'une grandeur scalaire est finie.

Q4 : Répartis les concepts suivants en grandeurs vectorielles et en grandeurs scalaires :

champ magnétique, distance, masse, moment magnétique, vitesse, accélération, induction magnétique, pression, auto-induction, force de Lorentz, force de Laplace, intensité du courant, tension électrique, flux magnétique.

Cette question a été posée dans but de vérifier si les élèves sont à mesure de distinguer une grandeur vectorielle et une grandeur scalaire.

Après le dépouillement des réponses à la question, les réponses données par les élèves nous montrent qu'ils ont du mal à répartir les différentes grandeurs physiques en grandeurs vectorielles et en grandeurs scalaires. Le tableau 8 nous montre la répartition des grandeurs données en grandeurs scalaires et en grandeurs vectorielles.

Tableau 8 : Répartition des concepts physiques en grandeurs scalaires et en grandeurs vectorielle

Grandeur Scalaire	Grandeur Vectorielle
Distance Masse Pression Intensité du courant Tension électrique Flux magnétique	Champ magnétique Moment magnétique Accélération Vitesse Induction magnétique Auto-induction Force de Lorentz Force de Laplace

Q5 : Que penses -tu des concepts du magnétisme représentés en grandeurs vectorielles ?

En posant cette question, nous avions l'intention de vérifier si les élèves sont familiarisés avec ces dernières. Les diverses réponses à la question sont résumées dans le tableau 9.

Tableau 9 : Distribution des fréquences des réponses des élèves sur la facilité ou la difficulté des concepts de magnétismes représentés en grandeurs vectorielles

Réponses	Fréquences	Pourcentages
Très difficile	20	25
Difficile	56	70
Facile	4	5
Très facile	0	0
Total	80	100

Les résultats du tableau ci-dessus montrent que 20 élèves sur 80, soit 25% de nos enquêtés trouvent que les concepts de magnétisme représentés en grandeurs vectorielles sont difficiles .56 élèves sur 80, soit 70% disent qu'ils sont difficiles .4 élèves sur 80 nous répondent que les concepts de magnétisme représentés en grandeurs vectorielles sont faciles. Aucun élève n'affirme que les concepts de magnétisme représentés en grandeurs vectorielles soient très faciles. Ces résultats obtenus sur cette question sont très proches de ceux obtenus à la question 4 qui montrent que les élèves ne savent répartir certaines grandeurs physiques en grandeurs scalaires et en grandeurs vectorielles.

Q6 : Faites-vous des expériences en magnétisme ?

Le cours de physique est un cours expérimental. Cette question a été posée dans l'optique de vérifier si les enquêtés font des expériences et quels types d'expériences ils réalisent sur le concept de magnétisme. La répartition des réponses est montrée à la figure 10.

Tableau10 : Distribution des fréquences des réponses des élèves sur les expériences en magnétisme

Réponses	Fréquences	Pourcentages
Oui	24	30
Non	56	70
Total	80	100

En analysant ce tableau, sur 80 enquêtés, on remarque que 56 élèves, c'est-à-dire 70%, ont répondu qu'ils ne font pas des expériences sur le magnétisme faute de manque de laboratoire dans leurs établissements. Donc, des expériences sont faites seulement sur peu d'écoles ayant fait objet de notre enquête, soit 24% de nos enquêtés, mais ces écoles ne sont pas bien équipées.

Les expériences réalisées sont entre autres :

- Expérience sur le champ créé par un courant ;
- Expérience sur la loi de Laplace ;
- Expérience sur l'aimantation ;
- Expérience sur l'attraction entre les objets de nature différente.

Q7. Quels sont les problèmes rencontrés en apprenant le magnétisme ?

La question a été posée pour tester les problèmes rencontrés par les apprenants en abordant le concept de magnétisme.

Après le dépouillement des données, nous avons constaté que les réponses qui reviennent pour presque tous nos enquêtés sont :

- Manque de matériels didactiques ;
- Manque de laboratoire ;
- Beaucoup de formules un peu semblables ;
- Manque d'expériences ;
- Incompréhension des formules utilisées ;
- Des exercices non tous résolus.

Propositions des élèves

Q8. Que proposez-vous pour améliorer la situation ?

Cette question a pour but d'inviter les élèves à donner leurs contributions face aux problèmes rencontrés en apprenant le magnétisme.

Après le dépouillement des réponses de cette question, on constate que les propositions émises par nos enquêtés sont les suivantes :

→ Disponibiliser le matériel didactique ;

→ Construire ou équiper des laboratoires là où ils ne sont pas ;

→ Avoir des professeurs compétents ;

→ Prévoir des formations aux enseignants ;

→ Échange entre les enseignants sur la manière dont ils dispensent les leçons sur le magnétisme ;

→ Favoriser la pratique et les exercices plus que la théorie ;

→ Créer des clubs de physique.

III.5. Résultats auprès des enseignants

III.5.1. Informations générales sur les enseignants

Lors de notre recherche, nous avons pu contacter 8 enseignants de physique dans la Mairie de Bujumbura. Le tableau 11 nous donne les informations à propos de ces derniers.

Tableau11 : Diplôme et ancienneté des enseignants interviewés

Établissement	Diplôme	Ancienneté dans l'enseignement de la Physique
Ecole Indépendante	Licence en Pédagogie Appliquée, agrégé de l'enseignement secondaire en physique	8 ans
Ecole Saint Michel Archange	Licence en Pédagogie Appliquée, agrégé de l'enseignement secondaire en physique	6 ans
Lycée Clarté Notre Dame de Vugizo	Licence en Physique	12 ans
Lycée du Saint Esprit	Licence en Physique	12 ans
Lycée Municipal Gihosha	Licence en Physique	4 ans
Lycée Municipal Gikungu	Licence en Physique	15 ans
Lycée Sheppers	Licence en Physique	6 ans
Lycée SOS	Licence en Physique	13 ans

En analysant ce tableau, on remarque que 4 enseignants sur 8 interviewés ont une ancienneté de plus de 10 ans, soit 50% de l'effectif total. 50% représentent des enseignants scientifiquement qualifiés, mais pas pédagogiquement. Signalons que les licenciés en pédagogie appliquée sont plus qualifiés pédagogiquement pour enseigner au cycle supérieur des humanités générales, car ils ont eu au cours de leur cursus académique un grand volume horaire des cours de pédagogie comparativement aux licenciés en physique.

III.5.2. Les causes de la non maîtrise du concept de magnétisme par les élèves

Q1. En analysant les réponses données par les élèves, pourquoi certains élèves n'ont pas pu donner la définition du magnétisme ?

Sur cette question, des réponses variées ont été données dont voici quelques-unes :

- ✓ La définition du magnétisme est une définition complexe ;
- ✓ Peut-être que les élèves l'ont oubliée ou négligée ;
- ✓ Peut-être que les élèves n'ont pas consulté les cahiers avant de répondre.

Notons que les réponses à chaque établissement étaient presque semblables et seuls les élèves qui ont remis le questionnaire le lendemain ont donné des réponses issues des cahiers ou d'internet.

III.5.3. Difficulté du concept de magnétisme

Q2. D'après vous, le magnétisme est-il facile ou difficile à enseigner ?
Sur cette question, la majorité a répondu que le magnétisme est difficile suite au manque d'expérience, ce qui conduit à l'enseigner magistralement.

III.5.4. Les méthodes utilisées pour enseigner le concept de magnétisme

Q3. Quelles sont les méthodes utilisées pour l'enseigner ?
La majorité des enseignants enquêtés disent qu'ils utilisent la méthode expositive et que l'utilisation de la démarche expérimentale devrait être privilégiée. Mais à cause du manque de matériel didactique, nous préférons utiliser la méthode expositive et non expérimentale.

III.5.5. Les problèmes rencontrés en enseignant le magnétisme

Q4. Quels sont les problèmes rencontrés en enseignant le magnétisme ?
Les problèmes rencontrés en enseignant le magnétisme sont partagés avec les élèves entre autres :

1. Manque de matériel didactique ;
2. Manque de laboratoire ;
3. Manque de volonté des élèves et des professeurs ;
4. Manque d'expériences ;
5. Manque d'initiatives.

III.5.6. Possession de laboratoire

Q5. Votre établissement possède-t-il un laboratoire de physique ? Si oui est-il bien équipé pour les expériences sur le magnétisme ?
Parmi nos enseignants consultés, nous avons deux écoles qui ont un laboratoire fonctionnel mais pas bien équipées, soit 25% et une autre qui un laboratoire qui ne fonctionne plus, soit 1,17%, pour dire qu'on ne peut pas généraliser qu'il y a manque de laboratoire.
Pour ceux qui en ont, ils font quelques expériences sur le magnétisme :

- ✓ Le champ magnétique créé par un courant ;
- ✓ Attraction entre des corps de nature différente ;
- ✓ Description des lignes de champ magnétique ;

✓ Propriétés des aimants.

III.5.7. Propositions

Q6. Que proposez-vous pour améliorer l'enseignement du magnétisme ?

Les propositions données par les enseignants sont les suivantes :

- Construire des laboratoires et les équiper ;
- Avoir la volonté de se fabriquer le matériel didactique ;
- Organiser des formations continues des enseignants et d'échanges ;
- Actualiser le matériel didactique.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons en premier lieu analysé le programme, les manuels et les cahiers des élèves dans l'enseignement de la physique au Burundi. Nous avons constaté que le concept de magnétisme occupe une part importante sur le programme. Deuxièmement, nous avons présenté les résultats de l'enquête et de l'interview faits aux élèves et aux professeurs respectivement. A base des résultats de notre recherche, nous constatons que la façon dont le concept de magnétisme est enseigné serait la cause principale des difficultés des élèves sur cette notion. Leurs réponses montrent qu'après une séquence de cours, ils sont nombreux à ne pas maîtriser le concept de magnétisme. A la question de savoir pourquoi les élèves rencontrent des difficultés dans la compréhension des phénomènes magnétiques, les élèves se sont faits des représentations de ces phénomènes qui diffèrent de celles véhiculées par les modèles scientifiques. Les élèves ne fournissent pas d'effort pour des recherches et ils se contentent de la théorie donnée par les enseignants.

Pour tout le travail, nous allons donner une conclusion générale, quelques suggestions et perspectives.

CONCLUSION GENERALE ; SUGGESTIONS ET PERSPECTIVES

Au terme de ce travail de recherche qui s'intitule « Concept de magnétisme et enseignement de physique au Burundi : Cas de la Mairie de Bujumbura », une conclusion générale est nécessaire avec point de départ la problématique de la recherche et comme point de chute les principaux résultats établis qui conduisent à des suggestions et perspectives.

En effet, notre étude a porté sur le magnétisme en physique, l'objectif central de notre travail étant de contribuer à l'amélioration de la qualité de l'enseignement de la physique au Burundi en faisant des investigations sur le concept de magnétisme.

Notre travail s'est articulé sur trois chapitres essentiels se rapportant à des concepts théoriques du magnétisme, à la méthodologie de recherche et à un tour d'horizon sur les résultats, leur interprétation suivie d'une conclusion générale et des perspectives.

Dans le premier chapitre, nous avons rassemblé des informations données par la littérature sur le magnétisme. Ce chapitre parle de la genèse du magnétisme, des concepts du magnétisme vus en seconde scientifique et des différentes applications du magnétisme.

Au deuxième chapitre, nous avons parlé du cadre de notre démarche méthodologique où nous avons eu recours à la consultation des documents (programmes, manuels et cahiers des élèves), à l'enquête et à l'interview auprès des élèves et enseignants respectivement. Au troisième chapitre, nous avons présenté, analysé et interprété les résultats de notre recherche. L'analyse des résultats de notre étude a montré que le concept de magnétisme est développé sur le programme de physique mais est mal dispensé suite au manque de laboratoires équipés dans les écoles. Ceci conduit à la non maîtrise de ce concept par les élèves après enseignement/apprentissage. Le concept de magnétisme n'est pas bien enseigné et est par conséquent mal compris par les élèves.

Les choses sont ainsi au moment où le magnétisme est un phénomène qui possède de nombreuses applications, y compris dans la vie courante ; d'où il devrait avoir une importance majeure dans l'enseignement de la physique. Au terme de ce travail de recherche, nous trouvons qu'il est essentiel de formuler quelques suggestions pour améliorer la situation face à ces nombreux problèmes.

1. A l'endroit du Ministre de l`Éducation Nationale, formation Technique et Professionnelle :

Nous suggérons de :

- Organiser des séminaires de formation et d'échange didactique en rapport avec le magnétisme ;
- Construire ou équiper des laboratoires dans les différents établissements ;
- Organiser des formations continues pour les enseignants ;
- Disponibiliser des matériels didactiques qui permettraient un enseignement de qualité ;
- Faire la révision des programmes de physique régulièrement ;
- Améliorer les conditions de vie des enseignants.

2. A l'endroit des enseignants :

Nous suggérons de :

- Se documenter et s'informer pour donner un enseignement de qualité ;
- Se donner corps et âme en donnant des explications nécessaires aux élèves ;
- Créer des associations des enseignants de la physique pour favoriser un cadre d'échange et de partage d'expérience dans la pratique enseignante ;
- Fabriquer des matériels didactiques simples dans la mesure du possible ;
- S'intéresser aux problèmes réels de l'enseignement ;
- Faire une recherche pédagogique dans les différents domaines ;
- Intéresser les élèves aux phénomènes physiques à travers des questions qualitatives et non seulement à la résolution des exercices numériques de classe ;
- Organiser des recherches visant à faire participer les élèves à la construction de leurs propres savoirs et ne plus les considérer comme des vases à remplir des connaissances ou des têtes mal faites pour apprendre les sciences.

3. A l'endroit des élèves :

Nous suggérons de :

- Fournir beaucoup d'efforts pour étudier ;
- Demander des explications auprès de leur camarades et des professeurs ;
- Faire beaucoup d`exercices et de problèmes de physique notamment dans le chapitre du magnétisme ;
- Avoir l'esprit de créativité.

Nos résultats constituent donc une partie de la recherche sur le magnétisme et l'enseignement de la Physique au Burundi. Espérons que d'autres personnes intéressées par ce domaine y apporteront des compléments nécessaires et nous pensons que la recherche en didactique des sciences devrait être intensifiée et valorisée pour mieux cerner les difficultés des élèves pour former des citoyens utiles

pour eux-mêmes et pour le pays dans cet univers dominé par la technologie et la science. Nous proposons par exemple de vérifier la part de la non maîtrise de la langue d'enseignement au Burundi (le français), du manque de laboratoires équipés pour faire les expériences et le non usage de la méthode scientifique pour enseigner le concept de magnétisme.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

[1]. Alonso, F. (1997). *Physique générale, Tome 1*. Paris : Enter. Edition.

[2]. Angers, M. (1997). *Initiation pratique à la méthodologie des recherches*. Casbah université.

[3]. Armand, C. (1983). *Sciences physiques pour entrer en seconde*. Paris : Dunod

[4]. Astolfi, J-P.&Develay, M. (2005). *La didactique des sciences*. Paris : PUF.

[5]. Ayigbede, A. (2016). *Etude des connaissances d'élèves béninois de terminale D sur la production, les caractéristiques et les propriétés du champ magnétique après une séquence d'enseignement/apprentissage.* Thèse de doctorat soutenue le 22 janvier 2016.Calavi : Université d'Abomey.

[6] .Bagheri, R. &Venturini, P. (2006). *Analyse du raisonnement d'étudiants utilisant les concepts de base de l'électromagnétisme*. Lemme (Desei) : Université Toulouse 3 Paul Sabatier, EA 3692.p 28, 33-53

[7]. Banuza, A. (20013). *Introduire les bases de la dynamique dans l'enseignement de la physique au Burundi : Des Machines simples au concept de travail*. Thèse de doctorat. Môns : Université de Mons. p.1

[8]. Badende, I. (1974-1975). *Enseignement de la physique dans les écoles secondaires du Burundi*. Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[9]. Bikorindagara, R. (2002). *Etude de quelques conditions d'organisations d'une alternance dans la formation initiale des enseignants du Burundi : Enquêtes menées à l'Institut de Pédagogie Appliquée de l'Université du Burundi*. Thèse de doctorat : Louvain La-neuve

[10]. Cardinael, G. (1971). *Physique général : Electricité Magnétique*. Facultés Universitaire Notre-Dame de la Paix : Nemur.

[11]. Cessac, J. (1968). *Physique classe de 1ère C*. paris Fernand Nathan.

[12]. Combessie, J. C. (2003). La méthode en sociologie. Paris : La Découverte

[13]. Courtillot, D. et Kuffenach, M. (1997). *Enseigner les sciences physiques*. Edition Bordas/Sejer.

[14]. DeLandesheere, G. (1979). *Evaluation continue et examens ; précis de docimologie. Bruxelles* :3ème Ed. Labor

[15]. Elie, L. (1988). *Dictionnaire de Physique sous la Direction de François Le Lionnais*. Paris : PUF.

[16]. Eugene, H. (1999). Introductio à la physique : Paris : De Boeck Université.p.785-791& 831-841

[17]. Froment, J-C. (2004). *Pathologies neurologiques thoraciques et cardio-vasculaires, osteco-articulaires,abdomino-pelvières.Cours intensif d'initiation à l'imagerie par résonnance magnétique*.Lyon : Hôpital-Neuro –cardiologique. p.37-40 & p.47-48& p. 92-84 &p.112-115.

[18]. Gérard;L,A;W-B.(1993). *Construire des concepts en physique.* Paris : Hachette.

[19].Giancolli , D. (1993) .*Electricité et Magnétisme*. Bruxelles : De Boeck Université

[20]. Guy Fontaine, J-P. (1989). Physique terminale C et E. Paris : Ed. Nathan.

[21]. G. Cardinael. (1971). *Physique Générale 5 Electricité 3. Magnétisme 2*.

[22].Habimana ; I.(2018).*Concept de gravitation et enseignement de la physique au burundi :Cas de la DCE Bugenyuzi*.MémoireInédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[23]. Habonimana, P. (2013). *Quelques facteurs d'échecs dans l'enseignement/ apprentissage du cours de la Physique au cycle supérieur des humanités générales ; étude menée dans quelques écoles secondaires de la D.P. E BUBANZA*. Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[24]. Javeau, G. (1972). *L'enquête par questionnaire*. Manuel à l'usage du praticien. Bruxelles : Institut de sociologie.

[25]. Kanyabitabo, A. (1979). *Optimisation de l'enseignement de la physique dans les écoles secondaires du Burundi*.Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[26]. Kastler, B. (2006). *Comprendre l'imagerie en résonnance magnétique*. Paris Masson : 6èédition.

[27]. Leboutet, L. (1973). *L'enseignement du physique*.paris : Presses universitaires de France

[28]. *Les classiques africains. (1993). Physiques premières C, D, E. Paris* : Hachette.

[29]. *Les classiques africains. (1993). Physiques secondes C et T*. Edition saint Paul Duala.

[30]. Les classiques africains. (1993). Physiques *terminales C -D -E*. Paris : Hatier.

[31]. Lumonge ; Z-D. (2010). *Le concept énergie en physique. Etudes des relations entre conceptions ; compétences et savoirs disciplinaires chez les élèves congolais et belges de 14 à 18 ans*. Thèse de doctorat. Université de Mons

[32]. Maarouf, A. &Benyamna, S. (1997). *La construction des sciences physiques par les représentations et les erreurs : cas des phénomènes magnétiques*. Didaskalia n°11, p.101-118.

[33]. Maniraha, G. (2017). *Le concept énergie et l'enseignement de la physique au Burundi*. Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.p.85

[34]. Marcelo, A et Edward J, F. (2001). *Physique générale (champs et ondes) cours et exercices corrigés.*

[35]. M-N Sanz.FVanden Brouck;B. Salamito ; D. Chardon. (2014). PHYSIQUE tout -en-un.

[36]. Minani, D. (2005). *Problème auxquels se heurte l'enseignement de la Physique au cycle inférieure du secondaire*. Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[37]. Muccheielli, R. (1973). *Le questionnaire dans l'enquête psychologique, application pratiques*. Paris : Edition E.S.F.

[38]. Muteriteka ; J-C. (2017). *Champ électrique et Enseignement de Physique au Burundi*. *Mémoire* Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[39]. Nahayo, F. (2012*). Etudes des facteurs d'échecs en physique au 2nd cycle des humanités générales ; point de vue des enseignants de la Direction provincial de Bururi*. Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[40]. Ndayikeza, G. (2005). *Impact de qualification des enseignants sur les résultats des élèves en physique*. Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[41]. Ndayisaba, G. (2016). *La formation des enseignants de physique de l'école secondaire au Burundi*.Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[42]. Nduwayo,E.(2018).*Dynamique et enseignement de la physique dans les écoles à sections scientifiques et normales au Burundi :Cas de la DPE Mwaro* .Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[43]. Nibigira, E. (2018). *Etat des lieux et Perspectives de l'Enseignement de la Physique dans la Province de KIRUNDO*.Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[44]. *Les machines simples et enseignement de la physique au Burundi en classe de 1ère post-Fondamentale ; sections sciences*. Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[45]. NIYIRAGIRA, J.-P. (2016). *Contribution à l'amélioration des pratiques d'enseignement de la physique au lycée MAKAMBA*.Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[46]. Niyongabo,A.(.2017).).*Etat des lieux de l'enseignement de la physique en province Rutana*. Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[47]. Nsabiyumva,P.(2018).*Electrostatique et enseignement de la physique au Burundi* .Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[48].Nshimirimana, P. (2016).*Usage de la démarche expérimentale dans l'enseignement de la physique à l'école secondaire de la Mairie de Bujumbura*. Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[49]. Ntagirabiri, R. (1997). Apport *d'imagerie en résonnance médicale dans le diagnostic positif ; topographique et étiologique des affections neurologiques rencontrés au Burundi : à propos de 47cas*. Thèse doctorat. Bujumbura : Faculté de Médicine.p2-13 et 30-63

[50]. Ntakirutimana, A. (2013). *Facteurs conditionnant des échecs en mathématiques dans les écoles privées cas de la classe de 9ème, cas du Lycée Saint André*. Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[51]. Ntibayindusha ; E. (2004). *Etude de quelques facteurs d'échecs en physique : Enquête menée dans les ecoles secondaires de la Mairie de Bujumbura*. Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[52]. Ntukamazina,F.(2017).*Etat des lieux de l'enseignement de la physique en province Bururi*. Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[53]. René Lafrance. (1968). Electricité et Magnétisme

54]. Serway. (1992). *Physique : Electricité et Magnétisme*. Edition Études vivantes : Québec. 235-260

[55]. Shemezimana , S. (2018). *Défis de l'enseignement de la physique en province de Kayanza*. Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[56]. Steffens, F. (1985). *Électrostatique, Électromagnétisme.* Kinshasa : Edition.

[57]. Tombet, D. (2010*). Guide pour enseigner les sciences au secondaire*. Paris : Edition E.S.F.

[58]. Tuyishemeze,D.(2018).*Niveau de connaissances en optique géométrique des élèves des écoles paramédicales à filière de laboratoire*. Mémoire Inédit. Bujumbura : Université du Burundi.

[59].T.Etienne.(2000). *Magnétisme : II Matériaux et Applications*. Grenobles Sciences : EDP Science.

[60]. Van Campenhoudt, L.& Quivy, R. (2011*). Manuel de recherche en sciences sociales*. Dunod :4è édition.p.164

[61]. Vande Vorst. (1997). *Introduction à la Physique Générale ; première cycle*. Paris& Bruxelles De Boeck &Larcier, 2ème édition. p 563-567.

[62]. Viennot ; L. (1996). *Enseigner la Physique ; pratiques pédagogiques*. Bruxelles : De Boeck.

[63]. Vilatte, J. C. (2007). *Méthodologie de l'enquête par questionnaire. Laboratoire Culture &Communication*. Université d'Avignon.

ANNEXES

ANNEXE I

QUESTIONNAIRE D'ENQUETE POUR LES ELEVES

NOM DE L'ECOLE……...……
SECTION……

I. Consignes

Cher élève, dans le but de collecter les données relatives à notre travail sur le magnétisme et l'enseignement de la physique au Burundi, nous aimerions vous demander votre soutien en répondant sincèrement et individuellement au présent questionnaire. Pour les questions à choix multiple, cochez devant la bonne réponse. Quant aux questions ouvertes, soyez précis et concis.

II. Questions

Q1 : Pouvez-vous définir le magnétisme ? Oui ☐ Non ☐ . Si oui définissez -le

……

……

……

Q2 : Connaissez-vous les concepts centraux du magnétisme ? Oui ☐ Non ☐ Je ne sais pas ☐

Si oui : lesquels ?

……..

Q3 : Quelle est la différence entre une grandeur vectorielle et une grandeur scalaire ?

……

……

……

Q4 : Répartissez les concepts suivants en grandeurs vectorielles et en grandeurs scalaires ?

Force, Champ magnétique, distance, masse, moment magnétique, vitesse, accélération, induction magnétique, pression, auto-induction, force de Lorentz, force de Laplace, intensité du courant, tension électrique, flux magnétique

Q5 : Que pensez -vous des concepts du magnétisme représentés en grandeurs vectorielles ? Très difficile ☐ Difficile ☐ Facile ☐ Très facile ☐

Q6: Faites-vous les expériences en magnétisme ? Oui ☐ Non ☐ . Si Oui ; lesquelles ?

……

……

……

……

Q7. Quels sont les problèmes rencontrés en apprenant le magnétisme ?

……

……

……

……

Q8.Que proposez-vous pour améliorer la situation ?

……

……

……

ANNEXE 2

GUIDE D'ENTRETIEN AVEC L'ENSEIGNANT DE PHYSIQUE EN SECONDE

Bonjour Madame, Monsieur le professeur de physique

Nous répondons au nom de Nininahazwe Phocas**,** un étudiant de l'institut de Pédagogie Appliquée (IPA), Département de Physique-Technologie à l'Université du Burundi. Nous sommes en train de réaliser un travail de mémoire qui a pour sujet : « Concept de Magnétisme et Enseignement de Physique au Burundi : Cas de la Mairie de Bujumbura **».**

Nous aimerions nous entretenir avec vous ; vos réponses et suggestions à cet entretien nous aideront à comprendre les voies de sortie pour l'amélioration de l'enseignement de la physique en général et du magnétisme en particulier.

Comptant sur votre franche collaboration, nous vous adressons nos remerciements les plus sincères.

NININAHAZWE Phocas

ENTRETIEN PROPREMENT DIT

❖ Présentation (ancienneté, diplôme obtenu)

❖ En observant les réponses données par les élèves, pourquoi certains d'entre eux n'ont pas pu donner correctement la définition du magnétisme ?

❖ D'après vous, le magnétisme est-il facile ou difficile à enseigner ?

❖ Quelles sont les méthodes utilisées pour l'enseigner ?

❖ Quels sont les problèmes rencontrés en enseignant le magnétisme ?

❖ Votre établissement possède-t-il un laboratoire de physique ? Si oui est-il bien équipé pour les expériences sur le magnétisme ?

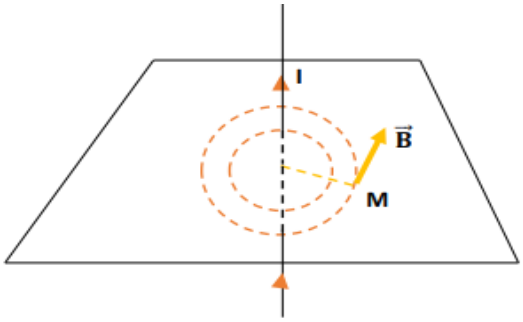
❖ Que proposez-vous pour améliorer l'enseignement du magnétisme ?

ANNEXE 3

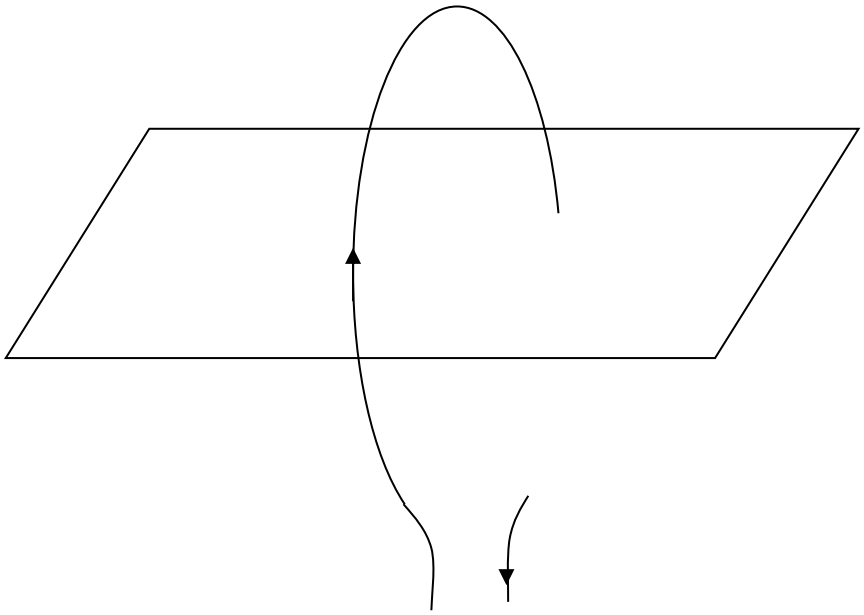
EXERCICES SUR L'ELECTROMAGNETISME

I.LE CHAMP MAGNETIQUE CREE PAR UN COURANT

1. Dans l'expérience de la figure I, l'intensité du courant est $I = 10$ A. Calculer l'intensité du champ magnétique $\overrightarrow{B}$ créé par un courant en un point M tel que $OM = 5$ cm.



2. Dans l'expérience de la figure II, l'intensité du courant est de 5 A est le diamètre de la spire est de 10 cm. Calculer l'intensité B_0 du champ magnétique par le courant au centre O de la spire.



3. Dans l'expérience de la figure VI, l'intensité du courant est de 10 A et la longueur du solénoïde est de 50 cm. Donner les caractéristiques du vecteur champ $\overrightarrow{B}$ au centre du solénoïde.

4. On réalise une expérience avec le dispositif schématisé par la figure ci-dessous :
-G est un générateur de f.é.m. $E = 90$ V et de résistance interne $r = 1{,}5\ \Omega$;

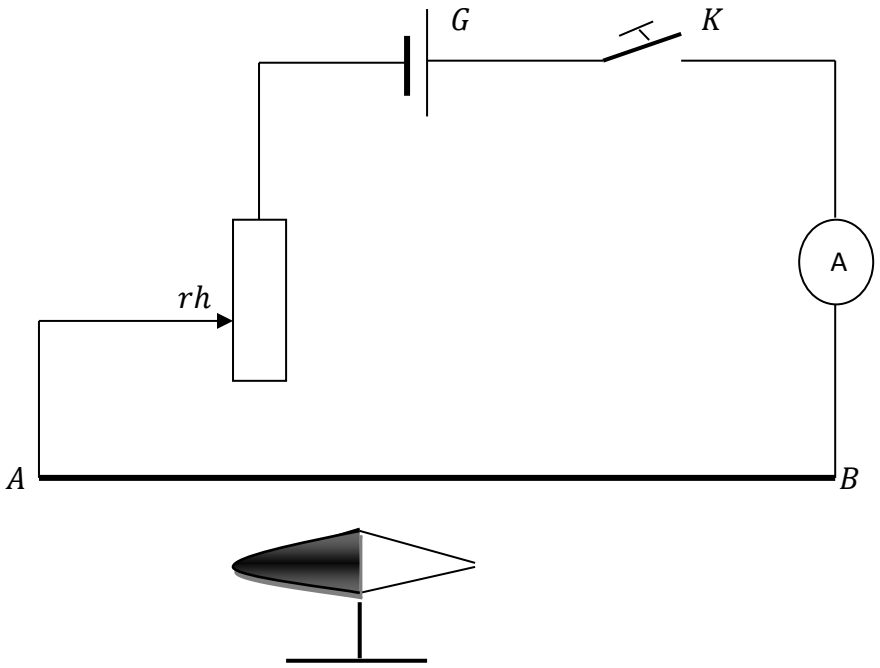
-Rh est un rhéostat dont la résistance est comprise entre 0 et 10 Ω ;

-AB est un fil de cuivre de résistance négligeable, placé parallèlement au méridien magnétique ;

-la petite aiguille alimentée est mobile autour d'un axe vertical.

-K est un interrupteur.

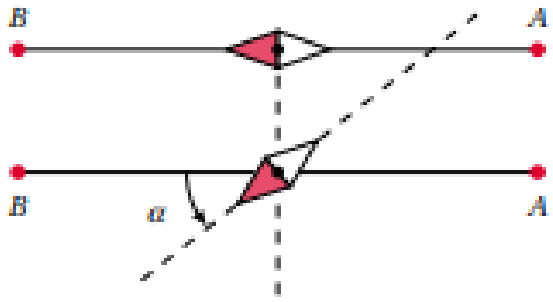
-A est un ampèremètre.



4.1. Pourquoi a-t-on utilisé un fil de cuivre au lieu d'un fil de fer, par exemple ?

4.2. Lorsque le circuit est couvert, comment s'oriente la petite aiguille aimantée ?

4.3 On ferme le circuit et on donne au rhéostat la valeur rh $= 8{,}5$ ohms. On constate que l'aiguille dévie d'un angle α. Expliquer pourquoi il y a déviation de l'aiguille aimantée. Les positions de l'aiguille aimantée (vue de dessus) avant et après le passage du courant sont représentées ci-après.



4.4. Calculer l'angle α sachant que la distance du fil de cuivre au centre de l'aiguille est $d = 5$ cm. On donne la composante horizontale du champ magnétique terrestre $B_O = 3{,}2 \cdot 10^{-5}$ T.

5. Une bobine plate a un rayon de 6 cm et comporte 80 spires. Elle est traversée par un courant de 2 A.

5.1. Préciser les caractéristiques du vecteur champ $\vec{B}$ créé par le courant au centre de la bobine.

5.2. Le plan de la bobine étant maintenu parallèle au méridien magnétique, calculer l'angle α de déviation d'une petite aiguille alimentée placée au centre de la bobine. Cet angle pourrait – il être supérieur à 90^0 ?

Justifier la réponse. On donne la composante horizontale du champ magnétique terrestre $B_O = 3 \cdot 10^{-5}$ T.

6. On démontre que l'intensité du champ magnétique au centre d'une bobine circulaire de rayon R, de longueur L et comportant N spires est donnée par la relation : $B = \frac{4\pi.N.I}{10^7\sqrt{L^2+4R^2}}$.

6.1. Montrer que pour une bobine longue (longueur très grande par rapport au diamètre de la spire). On trouve la formule :: $B = 4\pi.10^{-7}.n.I$ d'un solénoïde infiniment long.

6.2. Retrouver la formule d'une bobine plate à partir de la formule générale ci – dessus.

6.3. Etudier le cas d'une bobine où la longueur est égale au diamètre de la spire et donner l'expression de B en fonction du diamètre D.

7. Un solénoïde est enroulé à spires non jointives, à raison de 10 spires par centimètre. Le fil conducteur est en cuivre de 0,2 mm de diamètre et de résistivité $\rho = 1{,}6.10^{-8}$ Ωm. La longueur du solénoïde est $L = 40$ cm et le rayon d'une spire est $r = 5$ cm.

On réalise un circuit comprenant un générateur, de f.é.m. $E = 1{,}5$ V et de résistance interne $r = 0{,}5\Omega$ et la bobine. L'axe de la bobine est orienté perpendiculairement au plan du méridien magnétique. Une petite aiguille aimantée horizontale placée au centre de la bobine dévie d'un angle $\alpha_1 = 60°$ lorsqu'on ferme le circuit.

7.1. Quelle est la résistance R de la bobine ?

7.2. Quelle est la valeur de la composante horizontale du champ magnétique terrestre B_0 ?

7.3. Quelle est la résistance R_x du conducteur à mettre en série avec la bobine pour ramener la déviation de l'aiguille à $\alpha_2 = 45°$?

7.4. On comprime les spires de manière à obtenir une bobine plate. En supposant que l'aiguille aimantée est toujours au centre de la bobine, calculer sa nouvelle déviation α_3.

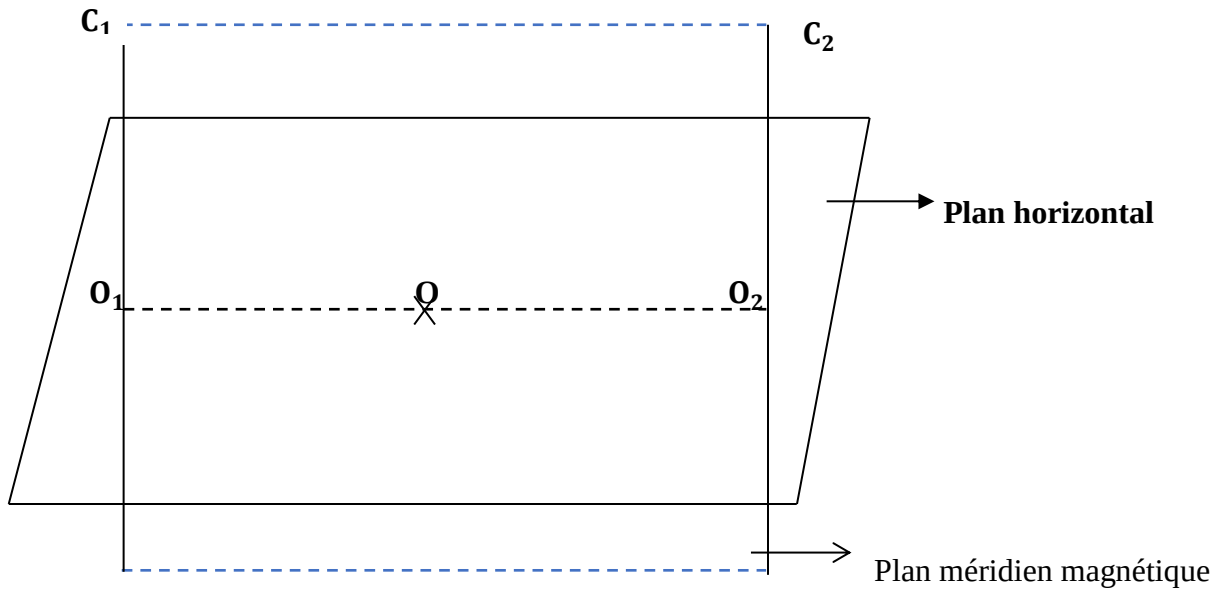
N.B : Ce circuit ne comporte que le générateur et la bobine.

8. On considère deux fils conducteurs,C_1 et C_2, verticaux et distants de 20 cm. Ils sont situés dans le plan méridien magnétique terrestre. En O, point situé dans ce plan méridien et équidistants de C_1 et C_2, on place une petite aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical.

8.1. Préciser sur un schéma la position de l'aiguille lorsqu'aucun courant ne passe dans C_1et C_2.

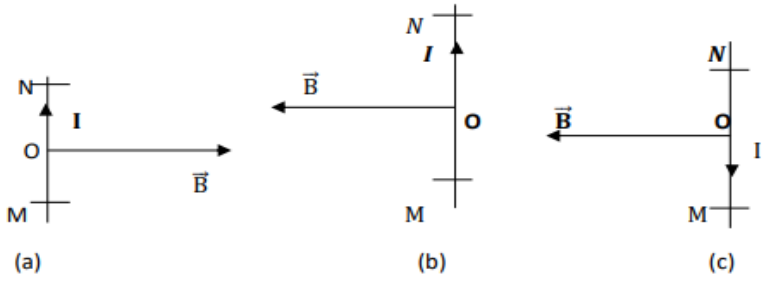
8.2. On fait passer dans C_1 un courant d'intensité $I = 10$ A. L'aiguille dévie de $45°$. Représenter, vues de dessus, les positions initiale et finale de l'aiguille et indiquer le sens du courant en O_1. Déterminer la norme de B_0 de la composante horizontale du vecteur champ magnétique terrestre.

8.3. On fait passer dans C_1 et C_2 deux courants d'intensités I_1 et I_2. Le courant I_1 est ascendant. On réalise alors deux expériences. On fait passer dans C_2 un courant : l'aiguille toujours placée en O dévie de $\alpha = 68{,}2°$. On change le sens du courant dans C_2, l'intensité restant la même : l'aiguille ne dévie plus que de $\alpha' = 26{,}6°$ dans le même sens que précédemment. Déterminer le sens du courant d'intensité I_2 dans chaque expérience, faire le schéma justificatif et calculer I_1 et I_2.

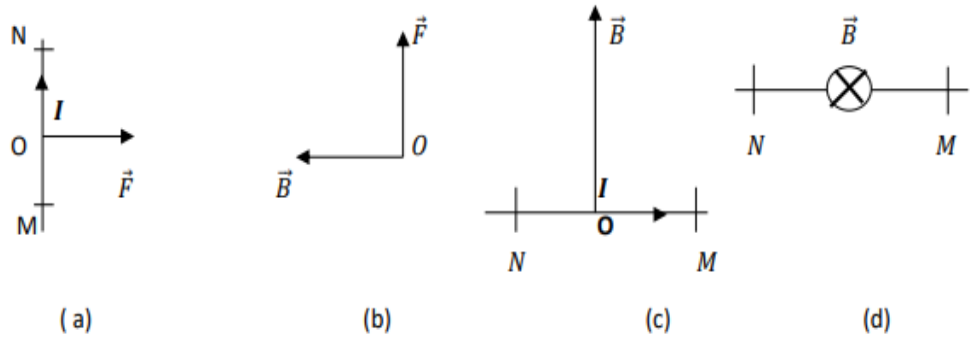


II.LOI DE LAPLACE

1. Sur les figures (a), (b) et (c) ci-dessous, le conducteur MN parcouru par un courant d'intensité I est placé dans un champ magnétique $\vec{B}$ uniforme. Représenter la force de Laplace $\vec{F}$ aux milieux de O de MN dans chaque cas de figure.



2. Même exercice, mais il s'agit de représenter le vecteur qui manque (figures (a), (b), (c) et (d) ci-dessous).



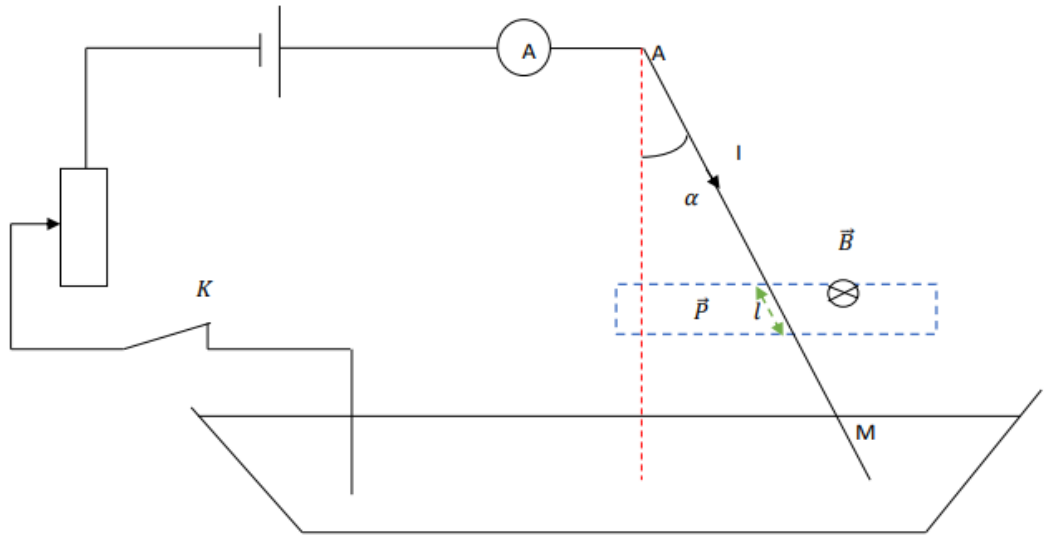
3. Dans l'expérience de la figure ci-dessous, le fil de cuivre homogène a 25 cm de longueur et une masse de 10 g. Quand le circuit est fermé, l'ampèremètre indique $I = 25$ A. Le champ magnétique uniforme est créé par un aimant en fer à cheval sur une longueur de 2 cm. Les lignes de champ sont horizontales et le vecteur champ $\vec{B}$ a pour module 0,05 T.AM est soumis à une force électromagnétique $\vec{F}$ dont le point d'application est situé à 5 cm de M.

3.1. Représenter le conducteur AM et les différentes forces appliquées à l'équilibre.

3.2. Calculer le module de la force électromagnétique $\vec{F}$.

3.4. Ecrire la relation traduisant l'équilibre de la tige AM.

3.5. Calculer l'angle α entre AM et la verticale passant par A. Prendreg = 10N/kg.

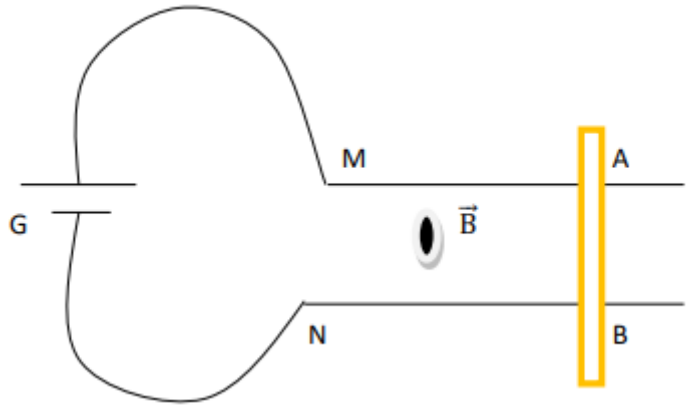


4. Un circuit électrique est représenté par le schéma ci – dessous. G est un générateur de f.é.m. E = 12 V est de résistance interner = 1 Ω. MA et NB sont deux conducteurs horizontaux parallèles de résistance négligeable. Le circuit est fermé par le conducteur AB, de résistance négligeable, pouvant se déplacer sur MA et NB. Les fils de connections ont une résistance de 3 ohms . L'ensemble est placé dans un champ magnétique uniforme perpendiculaire au plan de la figure. L'écartement entre MA et NB est de 5 cm et B = 0,5 T.

4.1. Dans quel sens se déplace AB ?

4.2. Calculer l'intensité de la force électromagnétique qui s'exerce sur AB.

4.3. Imaginer et représenter un dispositif permettant d'immobiliser le conducteur AB. (Ce dispositif comprend une poulie et une masse marquée dont on précisera la valeur en un lieu où g = 10 u. S. I)



5. Une roue de Barlow est formée d'un disque de cuivre de rayon $r = 5$ cm pouvant tourner autour d'un axe horizontal. La partie inférieure du disque trempe dans le mercure. La roue est alimentée par un courant continu de 10 A qui arrive par le mercure et sort par l'axe du disque. Un électro – aimant produit un champ magnétique uniforme de 0,5 T perpendiculaire au plan du disque. Le disque soumis à la force électromagnétique tourne à vitesse constante à raison de 3 tours par seconde.

5.1. Faire un schéma montrant la force électromagnétique et le sens de rotation du disque. On considèrera les deux sens possibles de $\overrightarrow{B}$.

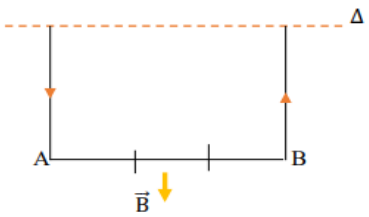
5.2. Calculer l'intensité de la force électromagnétique ainsi que son moment par rapport à l'axe de rotation. On supposera que la force est appliquée au point C, milieu du rayon du disque.

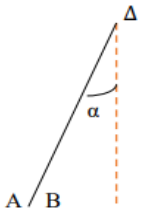
5.3. Le disque qui tourne constitue un moteur électrique. Calculer sa puissance.

6. Un conducteur rectiligne AB, de masse $m = 50$ g, est suspendu horizontalement par deux fils conducteurs souples, de masse négligeable et de longueur L. On alimente AB avec un courant d'intensité $I = 6{,}0$ A. Soumis à l'action d'un champ magnétique uniforme de direction verticale, d'intensité 0,2 T ; sur une longueur $l = 5{,}0$ cm, ce conducteur prend une position d'équilibre définie par l'angle α que font les fils conducteurs de suspension avec la verticale.

6.1. Représenter les différentes forces sur le conducteur AB et écrire l'expression de leurs moments par rapport à l'axe Δ.

6.2. Ecrire l'équation d'équilibre et calculer α en radians.



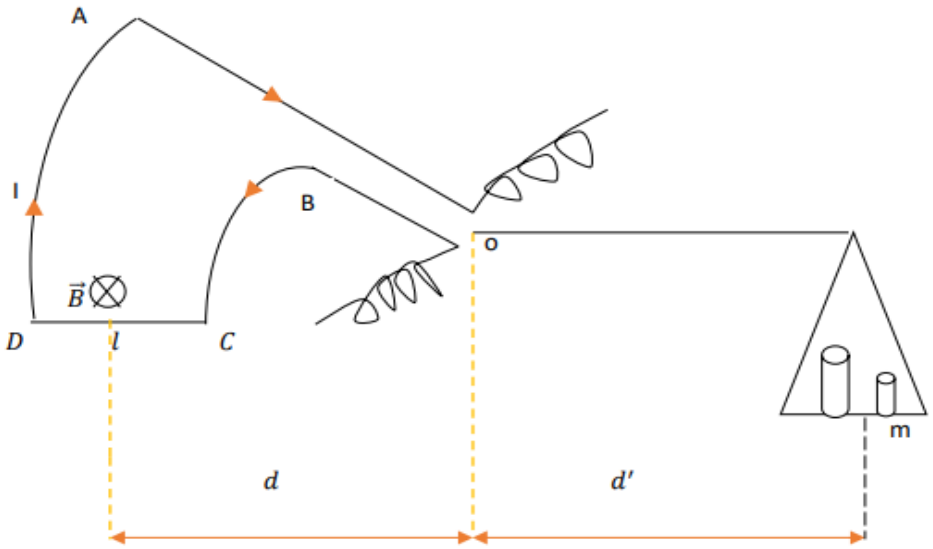


7. La balance de Cotton schématisé ci – dessous peut osciller autour d'un axe horizontal dont l'intersection avec le plan de la figure est le point O. La portion CD baigne dans champ magnétique uniforme $\overrightarrow{B}$.

7.1. Déterminer les caractéristiques de la force électromagnétique s'exerçant sur l'élément de circuit CD et écrire la condition d'équilibre de la balance (les forces s'exerçant sur AD et BC n'interviennent pas).

7.2. Montrer que ce dispositif permet la mesure des champs magnétiques. Démontrer pour cela la relation liant B avec m; g; I; l; d et d′ .

7.3. Connaissant un champ B_0, montrer que l'on peut en déduire un champ inconnu B par une simple mesure de masse.



8. Un cadre rectangulaire dont les côtés horizontaux et verticaux ont respectivement pour dimensions a et b, comporte N spires d'un fil conducteur parcouru par un courant d'intensité I. Ce cadre est soumis à l'action d'un champ magnétique uniforme, horizontal $\vec{B}$ dont les lignes de champ font un angle α avec le plan du cadre.

8.1. Représenter clairement les différentes forces de Laplace s'exerçant sur le cadre.

8.2. Calculer le moment résultant de ces forces.

8.3. Envisager le cas où $\vec{B}$ est orthogonale au plan du cadre.

9. Un galvanomètre est formé d'un cadre rectangulaire de 4 cm de longueur et 2 cm de largeur. Ce cadre est formé de 200 spires. Le champ produit par un aimant permanent est radial, de valeur $B = 0{,}05$ T. Calculer la constante de torsion du fil de suspension sachant que la rotation du cadre est de 1 degré pour un courant de 1 microampère.

10. La sensibilité d'un galvanomètre est de $0{,}5 \,.\, 10^3$ rd/A. Ce galvanomètre est formé d'un cadre carré de 5 cm de coté et comporte 200 spires. La constante de torsion de fil de suspension est $C = 4.\,10^{-4}\mathrm{N.\,m/rd}$. Déduire de ces données la valeur moyenne du champ magnétique dans l'entrefer de l'aimant ?

11. La sensibilité d'un galvanomètre est de $\sigma = 5.10^4$ rd/A. Quelle est la plus petite intensité décelable par cet appareil lorsqu'on mesure la déviation par le déplacement d'un spot sur une règle graduée en mm et placée à 1m du galvanomètre (méthode de Poggendorff) ?

12. On dispose d'un milliampèremètre à cadre mobile, graduée de 0 à 50 mA. Sa résistance interne est $a = 1\ \Omega$.

12.1. Quels résistors faut – il lui associer et comment faut – il les brancher pour le transformer en un voltmètre destiné à la mesure de différences de potentiel de 0 à 5 V ? En ampèremètre destiné à la mesure des intensités de 0 à 5 A ?

12.2. Le cadre de ce milliampèremètre est suspendu par un fil de torsion de constante de torsion K. Il est soumis à l'action d'un champ magnétique $B = 0{,}1\ T$ dont les lignes de champ sont horizontales et dirigées vers l'axe de rotation du cadre. Le cadre comporte $n = 150$ spires .

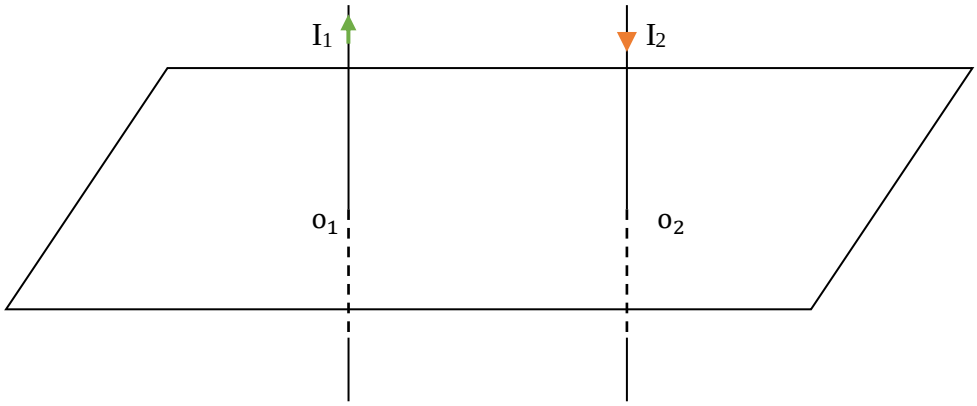
Chaque spire à une surface de $6\ cm^2$. Sachant que le cadre dévie de $60°$ lorsque l'intensité du courant vaut 50mA, déterminer K.

13. Deux fils conducteurs, de longueur infinie, verticaux, parallèles, distants de d sont parcourus par des courants de sens contraires d'intensités respectivesI_1 et I_2 (figure ci − dessous).

13.1. Donner les caractéristiques des vecteurs champs $\overrightarrow{B_1}$ et $\overrightarrow{B_2}$ créés par chacun des conducteurs aux points O_1 et O_2.

13.2. En déduire que chaque élément de chaque conducteur est soumis à une force électromagnétique dont on précisera les caractéristiques aux pointsO_1 et O_2.

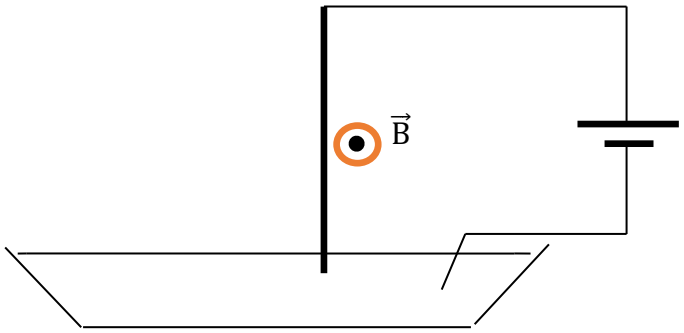
13.3. Montrer que les conducteurs se repoussent.



14. Un fil de cuivre, rigide, rectiligne, homogène, de longueur R est susceptible de se mouvoir dans un plan vertical, autour d'une de ses extrémités. L'autre extrémité plonge dans un bac de mercure qui permet de maintenir le contact électrique avec un générateur de tension continue. L'intensité du courant dans le circuit est I. Le dispositif peut être plongé dans un champ magnétique uniforme$\vec{B}$, horizontal, et orthogonal au plan de la figure (voir figure ci-dessous).

14.1. Que se passe-t- il lorsque :$I = 0;\ B \neq 0$? $I \neq 0;\ B = 0$? $I \neq 0;\ B \neq 0$?Modifie-t -on quelque chose quand on permute les bornes du générateur ?

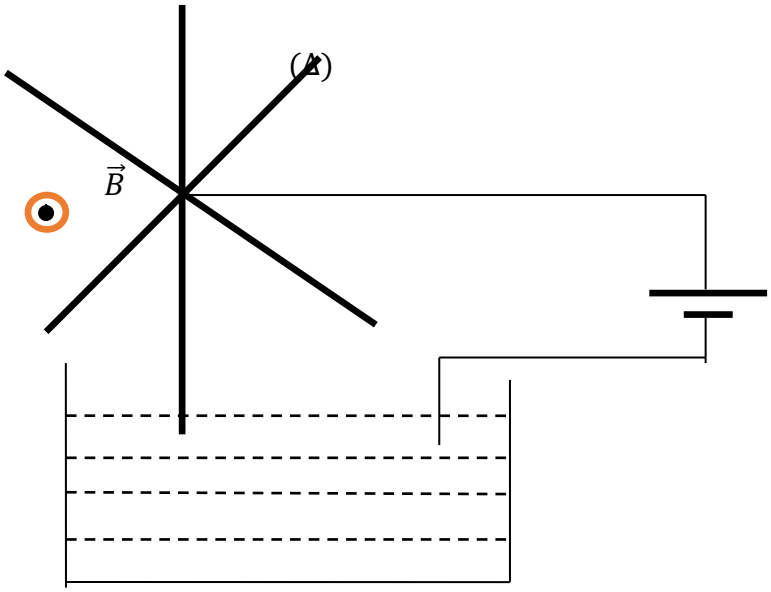
14.2. On néglige la longueur de la partie de la tige située dans le mercure et on admet que la ligne d'action de la force électromagnétique passe par le milieu de la tige. Calculer la déviation angulaire de la tige quand elle atteint sa position d'équilibre dans le cas où $I = 6$ A; $B = 2.10^{-2}$ T; $R = 10$ cm. Le poids de la tige est 8.10^{-2} N.



15. Soit le dispositif suivant : une roue mobile autour d'un axe horizontal (Δ) est constituée de rayons rigides en cuivre de longueur R régulièrement répartis. Le dispositif est plongé dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$.

15.1. Expliquer pourquoi on observe un mouvement de rotation. Préciser son sens.

15.2. La vitesse de rotation est 90tours/minute. Calculer la puissance développée par la force électromagnétique, supposée appliquée au milieu d'un rayon. On donne : $B = 2.10^{-2}$ T; $R = 10$ cm; $I = 6$ A.



III.LE FLUX MAGNETIQUE ET LE TRAVAIL DES FORCES ELECTROMAGNETIQUES

1. Une bobine plate comportant 20 spires circulaires de rayon $R = 6\,\text{cm}$ est maintenue dans un champ magnétique uniforme dont les lignes de champ sont parallèles à l'axe de la bobine. Le module du vecteur champ magnétique est $B = 0{,}2\,\text{T}$. L'intensité du courant dans la bobine est de $5\,\text{A}$. Dans tout le problème, on envisagera deux cas de figures suivant le sens du courant dans la bobine.

1.1. Quelles sont les caractéristiques du vecteur champ $\overrightarrow{B_0}$ créé au centre de la bobine par le passage du courant ? Comparer B_0 et B. Conclusion ?

1.2. Calculer le flux magnétique qui traverse la bobine.

1.3. Si la bobine était libre de se déplacer, expliquer le mouvement qu'effectuerait la bobine dans chaque cas de figure. Calculer le travail des forces électromagnétiques au cours de ce déplacement.

2. Un cadre rectangulaire formé de 40 spires de 4 cm*5 cm est placé dans l'entrefer d'un aimant en U où $B = 0{,}02\,\text{T}$. Le cadre mobile autour d'un axe vertical est parcouru par un courant de 4 A. Le cadre est placé de sorte que la normale à son plan fasse un angle de 60° avec $\overrightarrow{B}$.

2.1. Calculer le moment du couple des forces électromagnétiques auxquelles est soumis le cadre.

2.2. Le cadre reste- t- il dans cette position initiale ou se met – il en mouvement ? Justifier la réponse.

2.3. Dans le cas où le cadre tourne, calculer le travail des forces électromagnétiques.

3. Un solénoïde comportant une seule couche de spires jointives est fait de fil de cuivre de résistivité $\rho = 1{,}7.10^{-8}\,\Omega.\text{m}$ et de section $s = 0{,}2\,\text{mm}^2$. Le fil conducteur est enroulé autour d'un tube rigide de diamètre $D = 0{,}24\,\text{m}$.

3.1. Déterminer le nombre de spires de ce solénoïde si sa résistance est de $R = 48\,\Omega$.

3.2. On branche ce solénoïde aux bornes d'un générateur de f.é.m. $E = 50\,\text{V}$ et de résistance interne $r = 2\Omega$. Donner les caractéristiques du vecteur champ magnétique $\overrightarrow{B_S}$ au centre du solénoïde.

3.3. L'axe (Δ) du solénoïde est horizontal et le solénoïde peut tourner autour d'un axe vertical (Δ′) passant par son centre. Le solénoïde est placé brusquement dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ dont les lignes de champ sont parallèles à (Δ), mais de sens contraire à $\overrightarrow{B_S}$. Quelle sera la position

finale du solénoïde ? Calculer le travail effectué par les forces électromagnétiques au cours de la rotation, sachant que $B = 0{,}02$ T.

4. Un solénoïde comportant 400 spires de diamètre de 10 cm est parcouru par un courant d'intensité I=10 A, est placé dans un champ magnétique uniforme$\vec{B}$, d'intensité$B = 10^{-2}$ T, perpendiculaire à son axe.

4.1. Quelle est l'action de $\vec{B}$ sur le solénoïde libre de se déplacer ?

4.2. Calculer le travail des forces électromagnétique dans ce déplacement et en préciser le signe.

5. Un circuit est constitué d'un générateur, de la f.é.m. $E = 10$ Vet de résistance intérieure$r = 0{,}4\ \Omega$, et d'un solénoïde, de longueur $L = 50$ cm, comportant 500 spires de 5 cm de diamètre et de résistance $R = 1{,}6\ \Omega$.

5.1. Quelle est l'intensité du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde ? Faire un schéma indiquant le sens du courant et celui du champ magnétique.

5.2. A l'intérieur du solénoïde, on place une spire carrée de 1 cm de coté dont deux côtés sont parallèles à l'axe du solénoïde. La spire est suspendue par un fil vertical sans torsion.

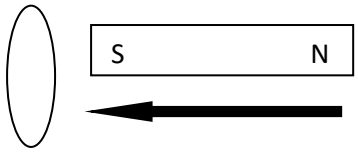
5.2.1. On établit dans la spire un courant d'intensité 1 A. Quelle position d'équilibre la spire prend – elle ?

5.2.2. Représenter sur un schéma le solénoïde et la spire, en précisant le sens des courants

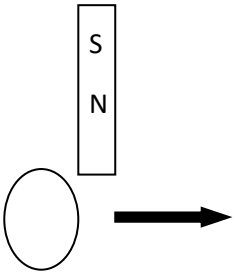
5.2.3. Quelle est le travail effectué par les forces électromagnétiques pour amener la spire à cette position d'équilibre ?

IV.L'INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE ET AUTO-INDUCTION

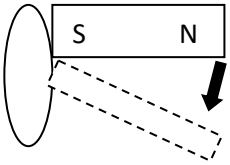
1. Trouver le sens du courant induit dans les cas suivants :



1.1 Déplacement de l'aimant

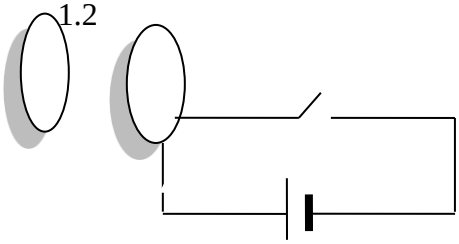


1.2 Déplacement de la bobine

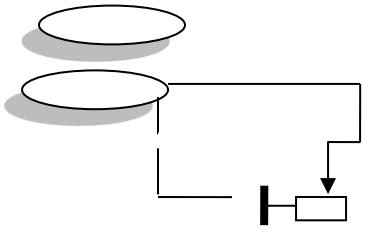


1.3 Rotation de l'aimant

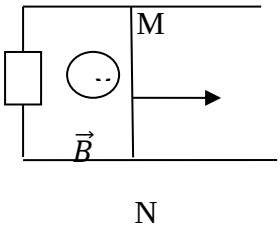
1.2



1.4 On ferme le circuit



1.5 On déplace le curseur du Rhéostat



1.6 On déplace la barre MN

2. Un solénoïde de 1 000 spires par mètre est alimenté sous une tension périodique telle que l'intensité i du courant qui le parcourt varie en fonction temps comme l'indique la figure 1.

Une petite bobine plate de 40 spires, de surface 4cm², est placée à l'intérieur du solénoïde, les deux axes étant confondus (fig. 2) ; la bobine est en circuit ouvert.

2.1 Donner les caractéristiques du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde. Préciser à l'aide d'un schéma sur lequel on indiquera le sens du courant i.

2.2 En utilisant les indications fournies par la figure 1, donner l'expression en fonction du temps de l'intensité i du courant qui parcourt le solénoïde dans l'intervalle [0, 10^{-2}s], puis [10^{-2}s , 2.10^{-2}s].

2.3 Que se passerait-il dans la bobine plate durant un intervalle de temps où l'intensité i est en train de croître ? de décroître ?

2.4 Après avoir précisé le sens positif choisi pour la bobine, donner la valeur algébrique de la force électromotrice e induite pendant chacun de ces deux intervalles. Représenter sur le même graphe les variations de i et de e en fonction du temps.

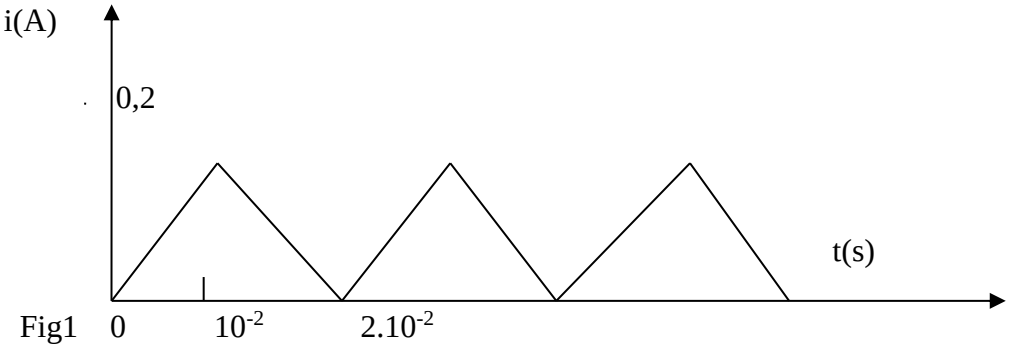
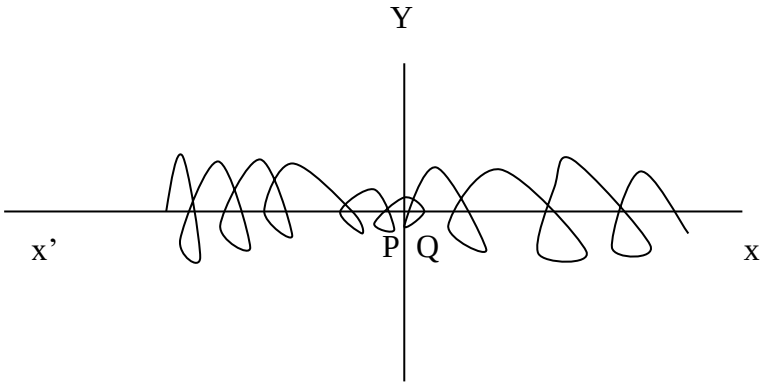
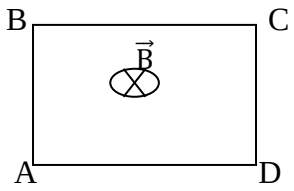


Fig1

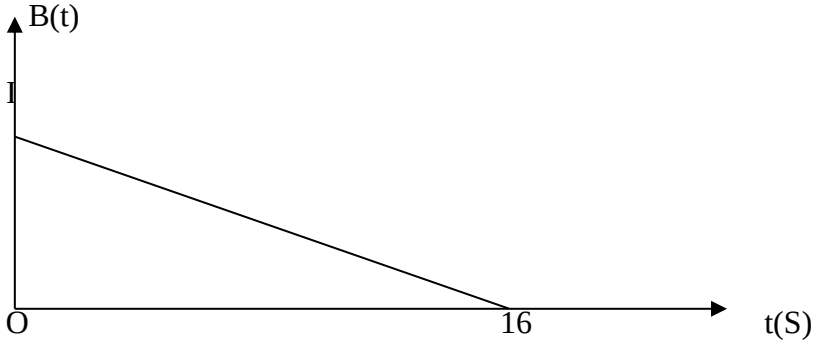


3. Un cadre carré est constitué par 200 spires de fil de cuivre isolé. Le côté du cadre mesure 4 cm. Ce cadre est placé perpendiculairement au champ magnétique uniforme d'intensité $B = 1\,T$ d'un électro-aimant. Les extrémités du fil sont reliées aux bornes d'un milliampèremètre de résistance $r = 2\,\Omega$.

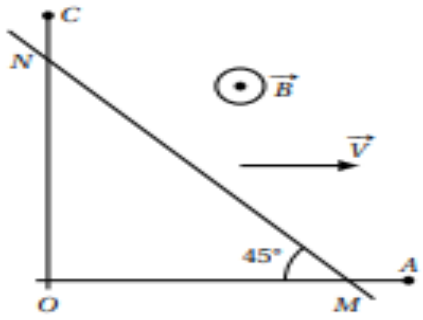


3.1 On donne le courant d'alimentation de l'électro-aimant de façon que B varie comme l'indique la courbe ci-contre. Calculer la f.é.m. induite dans le cadre.

3.2 Si la résistance du cadre est $R = 8\,\Omega$, calculer l'intensité du courant induit et indiquer sur le schéma le sens du courant induit dans le cadre.



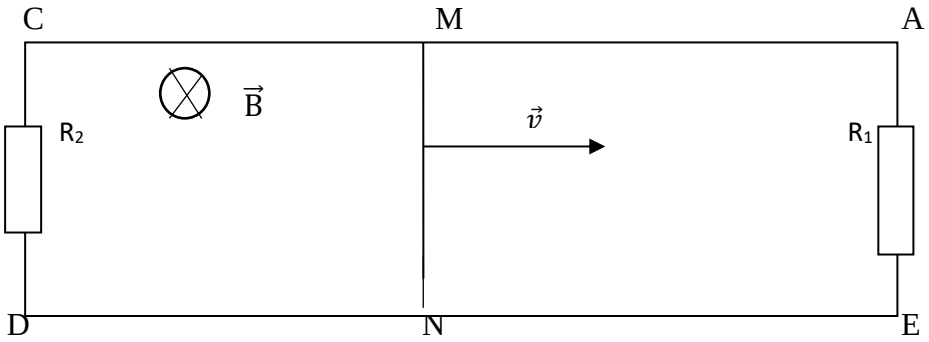
4. Deux conducteurs rectilignes OA et OB, de même longueurl = 1m, sont soudés en O, perpendiculairement l'un à l'autre. Un troisième conducteur, rectiligne, beaucoup plus long, et appuyé sur les deux premiers, est déplacé parallèlement à lui-même. Sa direction fait un angle de 45° avec les directions OA et OB. On appelle M et N les points de contact. Le point M se déplace de O vers A à la vitesse constante V = 25 cm/s. On pourra poser OM = x.



4.1 En supposant qu'à l'instant zéro, M et N coïncidaient avec O, établir l'expression de la surface du circuit OMN ainsi formé en fonction du temps.

4.2 L'ensemble est plongé dans un champ magnétique. $\vec{B}$ est normal au plan du circuit et son intensité est B = 0.1 T. Donner l'expression de la f.é.m. induite dans le circuit. Quelle est sa valeur maximale ? Donner, en justifiant, le sens du courant induit.

5. Une tige conductrice MN, de longueur l, se déplace sur les deux rails conducteurs parallèles AC et DE à vitesse constante v, en restant perpendiculaire aux deux rails. Le déplacement MN s'effectue dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ perpendiculaire au plan des rails. AE et CD sont reliés par des résistors de résistances R_1 et R_2.



5.1 Montrer que les résistors sont parcourus par des courants dont on indiquera le sens.

5.2 Exprimer les relations entre les intensités des courants dans les résistors et dans MN.

5.3 En négligeant la résistance des rails et de la tige et en supposant que les courants ne modifient pas sensiblement le champ magnétique initial, calculer les intensités des courants dans les résistors et dans MN.

A.N : $R_1 = 2.10^{-2}\Omega$; $R_2 = 4.10^{-2}\Omega$; $v = 2\ cm/s$; $B = 0.5\ T$; $MN = 4\ cm$.

5.4. Considérer le cas où la barre MN se déplace avec la même vitesse dans l'autre sens.

6. Un solénoïde, de longueur l très grande devant son rayon, comporte N spires enroulées sur un cylindre de section S.

6.1 Rappeler la définition de l'inductance propre L de ce solénoïde, puis établir son expression en fonction de N, l et S.

A.N: $N = 10\ 000$ spires, $l = 0.5\ m, S = 40\ cm^2$.

6.2 Ce solénoïde est parcouru par un courant dont l'intensité varie linéairement de 0 à 10 ampères en 5 secondes.

6.2.1 Etablir, en fonction du temps, l'expression du champ magnétique créé à l'intérieur du solénoïde.

6.2.2 On place à l'intérieur du solénoïde une bobine de 500 spires, ayant le même axe, de résistance égale à 20 ohms, constituée par un fil conducteur enroulé sur un cylindre de rayon 1 cm. Calculer l'intensité du courant induit dans la bobine intérieure.

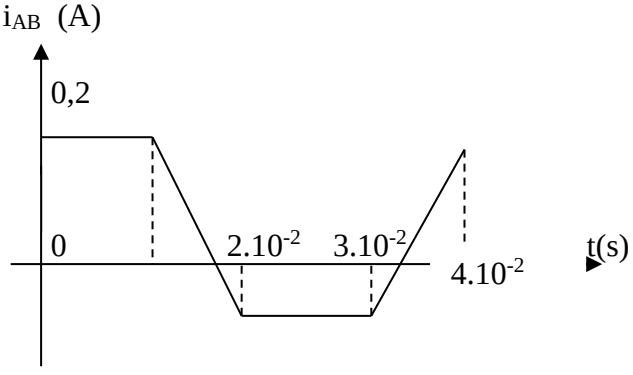
7. Soit une portion de circuit (AB) constituée d'une bobine sans noyau, d'inductance $L = 5.0\ mH$ et de résistance $r = 2.0\ \Omega$.

7.1 Donner la définition de l'inductance de la bobine. Calculer la valeur du flux propre à travers cette bobine quand elle est parcourue par un courant $i_{AB} = 0.20\ A$.

7.2 Cette bobine est parcourue par un courant dont l'intensité varie avec le temps comme l'indique la figure. Pour quels intervalles de temps y a-t-il variation du flux propre à travers la bobine en se limitant à des instants tels que $0 \leq t \leq 4.10^{-2} s$? Calculer cette variation dans chaque cas.

7.3 En déduire qu'il existe une force électromotrice d'auto-induction e dans la bobine dans certains intervalles de temps que l'on précisera. La calculer dans chaque cas.

7.4 Donner l'expression littérale de la tension U_{AB} aux bornes de la bobine. Représenter graphiquement cette tension U_{AB} en fonction du temps. (Préciser les échelles choisies).



CORRECTION DES EXERCICES SUR L'ELECTROMAGNETISME

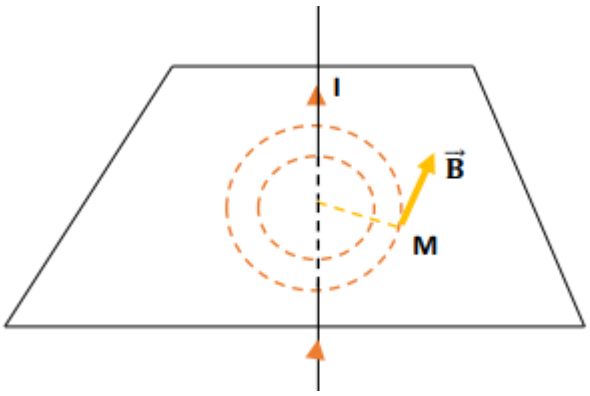
I.LE CHAMP MAGNETIQUE CREE PAR UN COURANT

1. Données **A chercher**

$I = 10A$ $B = ?$

$OM = d = 5.10^{-2}m$

Résolution



$B = 2.10^{-7}.\frac{I}{d} = 4.10^{-5}T$

2. Données **A chercher**

$I = 5\ A$ $B_0 = ?$

$D = 10.10^{-2}m = 10^{-1}m$

$R = \frac{D}{2} = 5.10^{-2}m$

Résolution

$B_0 = 2\pi.10^{-7}.\frac{I}{R} = 6{,}28.10^{-5}\ T$

3. Données **A chercher**

$I = 10\ A$ $B_0 = ?$

$L = 50\ cm = 50.10^{-2}m$

Résolution

Direction : $\overrightarrow{B_0}$ est dirigé suivant l'axe de la bobine

Sens : le sens de $\overrightarrow{B_0}$ est donné par la règle du tire – bouchon.

Intensité : $B_0 = 4\pi.10^{-7}.\frac{N.I}{L} = 2{,}512.10^{-5}.N$

4. Données

$B_0 = 3{,}2.10^{-5}\text{T}$

$d = 5\text{ cm} = 5.10^{-2}\text{m}$

$E = 90\text{ V}$

$r = 1{,}5\ \Omega$

$R_h = 8{,}5\ \Omega$

Résolution

4.1. On doit utiliser le fil de cuivre parce qu'il est un bon conducteur d'électricité et il n'est pas attiré par l'aimant.

Si c'était le fil de fer, l'aiguille aimantée aurait été attiré par le fil ce qui aux résultats inefficaces.

4.2. Lorsque le circuit est ouvert, l'aiguille aimantée s'oriente vers le nord magnétique.

4.3. Il y a déviation de l'aiguille aimantée parce qu'il n'y pas circulation du courant dans le circuit et il y a création du champ magnétique autour du conducteur AB qui interagit avec l'aiguille aimantée.

4.4. $I = \frac{E}{r+Rh} = 9\text{ A}$

$B = 2.10^{-7}.\frac{I}{d} = 3{,}6.10^{-5}\text{ T}$

$B = B_0 \tan\alpha$

$\tan\alpha = \frac{B}{B_0} = 1{,}125$

$\alpha = \tan^{-1}(1{,}125) = 48°$

5. Données

$B_0 = 3.10^{-5}\text{T}$

$R = 6\text{ cm} = 6.10^{-2}\text{m}$

$N = 80$

$I = 2\text{ A}$

A chercher

5.1. Caractéristiques de $\vec{B}$

5.2. $\alpha =$?

Résolution

5.1. Direction : $\vec{B}$est dirigé suivant l'axe de la bobine.

Sens : le sens de $\vec{B}$est donné par la règle du tire – bouchon**.**

Intensité de $\vec{B}$:$B = 2\pi.10^{-7}.\frac{N.I}{R} = 167{,}45.10^{-5}\text{ T} = 1{,}7.10^{-3}\text{T}$

5.2. $\tan\alpha = \frac{B}{B_0} = 55{,}82$

$\alpha = \tan^{-1}(55{,}82) = 88{,}97°$

α ne peut pas être supérieur à 90° car : $\vec{B}$est contenu dans le plan méridien magnétique.

6.Données **A chercher**

$B = \frac{4\pi NI}{10^7\sqrt{L^2+4R^2}}$

6.1. Expression de B pour un solénoïde

6.2. Expression de B pour une bobine plate

6.3. Expression de B pour une bobine où $L = D$

Résolution

6.1. Pour un solénoïde tel que $L \gg D$

on a : $B = \frac{4\pi NI}{10^7\sqrt{L^2(1+\frac{D^2}{L^2})}} = \frac{4\pi NI}{10^7\sqrt{L^2}} = 4\pi.10^{-7}.\frac{N}{L}I = 4\pi.10^{-7}.n.I$ (Car $\frac{L^2}{4R^2} = \frac{L^2}{D^2} \approx 0$)

6.2. Pour une bobine plate, on a $D \gg L$

$\Rightarrow B = \frac{4\pi NI}{10^7\sqrt{D^2(1+\frac{L^2}{D^2})}} = \frac{4\pi NI}{10^7\sqrt{D^2}} = 4\pi.10^{-7}.\frac{N}{D}I = 2\pi.10^{-7}.\frac{N.I}{R}$ (Car $\frac{4R^2}{L^2} = \frac{D^2}{L^2} \approx 0$)

6.3. Pour le cas d'une bobine où $L = D$, on a :

$$B = \frac{4\pi NI}{10^7\sqrt{D^2+D^2}} = \frac{4\pi NI}{10^7\sqrt{2}.D} = \frac{2.\sqrt{2}.\pi.10^{-7}NI}{D}$$

7. Données **A chercher**

$n = 10\frac{spires}{cm} = 10.10^2 spires/m$ 7.1.R =?

$D = 0{,}2\ mm = 0{,}2.10^{-3}m$ 7.2.B_0 =?

$\rho = 1{,}6.10^{-8}\Omega m$ 7.3. R_x =?

$L = 40\ cm = 40.10^{-2}m$ 7.4. α_3 =?

$r = 5\ cm = 5.10^{-2}m$

$E = 1{,}5\ V\ ; r_1 = 0{,}5\ \Omega$

$\alpha_1 = 60°$

$\alpha_2 = 45°$

Résolution

7.1. $n = \frac{N}{L}$

$R = \frac{\rho.l}{S}$ (1)

$l = 2\pi r.N = 2\pi r.n.L$ (2)

$S = \frac{D^2}{4}.\pi$ (3)

De (1), (2) et (3), on a : $R = \frac{2\pi r.n.L.\rho.}{\frac{D^2}{4}.\pi} = \frac{8\pi r.n.L.\rho}{\pi D^2} = 64\Omega$

7.2. $B = 4\pi.10^{-7}.\frac{N}{L}I = 4\pi.10^{-7}.n.I$

$$I = \frac{E}{r_1 + R}$$

$$B = 4\pi.10^{-7}.n.\frac{E_1}{r_1 + R} = 2{,}9.10^{-5}T$$

$$B = B_0 \tan\alpha$$

$$B_0 = \frac{B}{\tan\alpha_1} = 1{,}7.10^{-5}T$$

7.3.$B' = B_0 \tan\alpha_2$

$B' = 4\pi.10^{-7}.\frac{N}{L}I' = 4\pi.10^{-7}.n.I'$

$1{,}7.10^{-5} = 4\pi.10^{-7}.10^3.I'$

$I' = 0{,}0135\ A$

$$I' = \frac{E}{R + r_1 + R_x}$$

$$R_x = \frac{E}{I'} - (r_1 + R) = 46{,}61\Omega$$

7.4. Pour une bobine plate :$B'' = 2\pi.10^{-7}.\frac{N}{r}I = 11{,}55\ .10^{-5}T$

$$\tan\alpha_3 = \frac{B''}{B_0} = 6{,}79$$

$\alpha_3 = \tan^{-1}(6{,}79) = 81{,}6°$

8. <u>Données</u>

$d = 20\ cm = 20.10^{-2}m$

$\acute{d} = \frac{d}{2} = 10^{-1}m$

$I_{C1} = 10\ A$

$\alpha_1 = 45°B_0 = ?$

$\alpha' = 26{,}6°$

$\alpha = 68{,}2°$

<u>A chercher</u>

8.1. Position de l'aiguille lorsque aucun courant ne passe dans C_1 et C_2

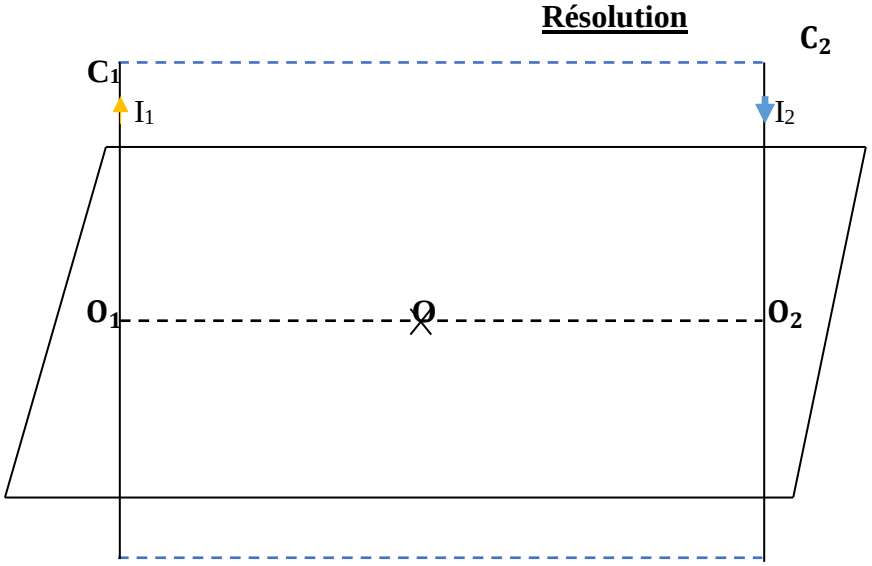
8.2. Sens du courant en O_1

8.3 Sens de I_2 dans chaque experience de I_1

I_2 =?

Résolution

8.1.



8.2. $B = 2.10^{-7}.\frac{I_{C1}}{d'} = 2.10^{-5}\ T$

$B = B_0 \tan\alpha$

$B_0 = \frac{B}{\tan\alpha_1} = 2.10^{-5}\ T$

8.3. L'aiguille placée en O dévie de 68,2° ; I_2 est descendant (sens contraire)

$B_1 = 2.10^{-7}.\frac{I_1}{d'}$ (1)

$B_2 = 2.10^{-7}.\frac{I_2}{d'}$ (2)

$B = B_1 + B_2 = 2.10^{-6}(I_1 + I_2)$

$\tan\alpha = \frac{B}{B_0} = \frac{2.10^{-6}(I_1 + I_2)}{2.10^{-5}} = \tan 68{,}2° = 2{,}50$

En changeant le sens de I dans C_2, on a I_1 et I_2 qui sont de même sens.

$B' = B_1 - B_2 = 2.10^{-6}(I_1 - I_2)$

$\tan\alpha' = \frac{B'}{B_0} = \frac{2.10^{-6}(I_1 - I_2)}{2.10^{-5}} = \tan 26{,}6° = 0{,}50$

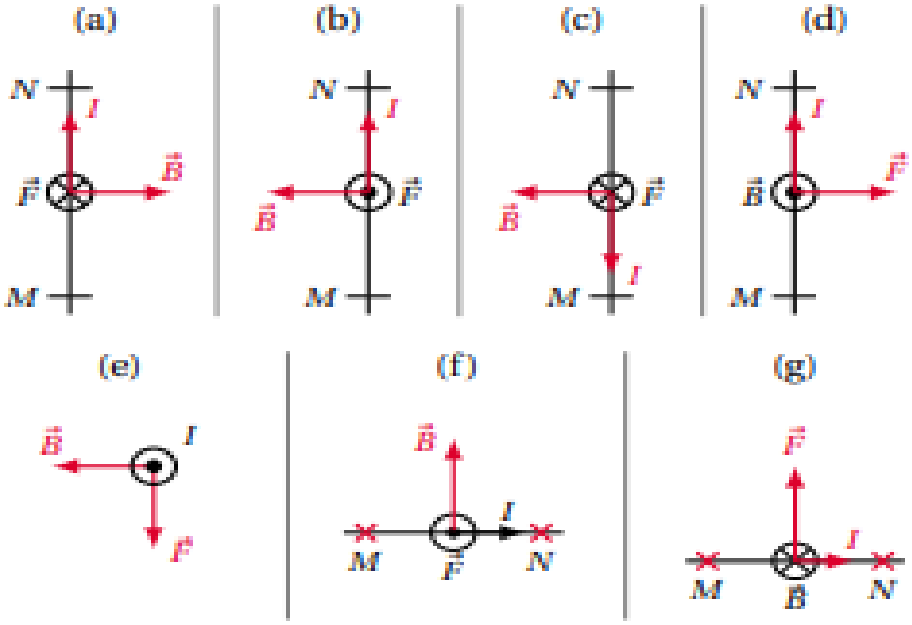
$$\begin{cases} \frac{I_1 + I_2}{10} = 2{,}50 \\ \frac{I_1 - I_2}{10} = 0{,}50 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = 25 \\ I_1 - I_2 = 5 \end{cases}$$

$I_1 = 15\ A$

$I_2 = 10\ A$

II.LOI DE LAPLACE



3. Données

AM = 25 cm = 25.10^{-2}m

m = 10 g = 10^{-2} kg

I = 5 A

l = 2 cm = 2.10^{-2}m

B = 0,05 T

A chercher

3.1. Schémas

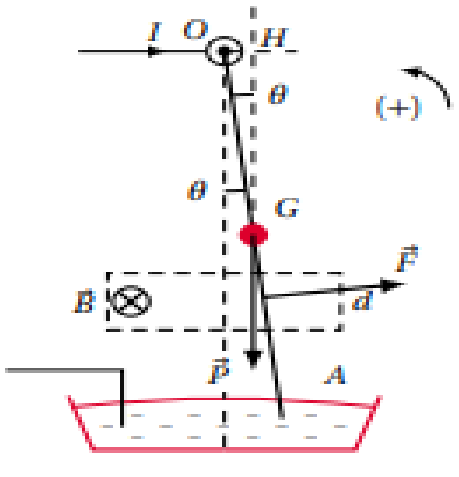
3.2. F =?

3.3. Équation d'équilibre

3.4.α =?

g = 10 N/kg

Résolution



3.2. $F = I.l.B\sin\alpha = 5.10^{-3}N$

3.3. $\sum \mathcal{M}(\overrightarrow{F_{ext}}) = 0$

$P.\frac{l}{2}.\sin\alpha - F.\frac{3}{4}.l = 0$

$P = m.g = 10^{-1}N$

3.4. $sin\alpha = \frac{3F}{2P} = 7{,}5.10^{-2} = 0.07492971$

$\alpha =$ Sin $\alpha^{-1}(0{,}07492971) = 4^{o}$

4. <u>Données</u>

$E = 10V$

$r = 1\ \Omega$

$R = 3\ \Omega$

$l = AB = 5\ cm = 5.10^{-2}m$

<u>A chercher</u>

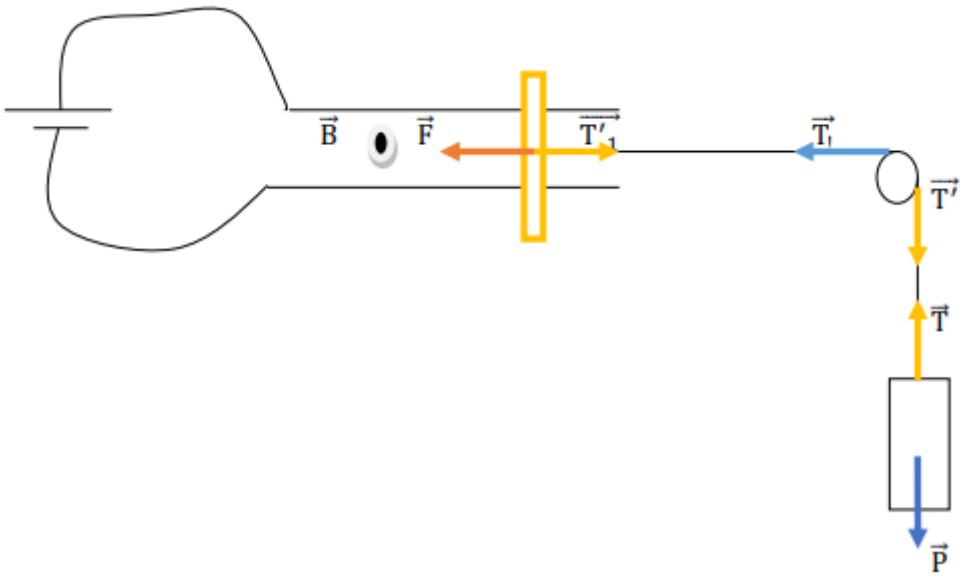
4.1. Sens de déplacement

4.2. $F =$?

4.3. $m =$?

$B = 0{,}5\ T$

<u>Résolution</u>



4.1. AB se déplace dans le sens de $\vec{F}$

4.2. $F = I.l.B\sin\theta$, or $I = \frac{E}{r+R}$

$F = \frac{E}{r+R}.l.B.\sin\theta = 6{,}25.10^{-2}\ N$

$P = T = T' = T_1 = T_1{}' = F$

4.3. $m = \frac{F}{g} = 6{,}25.10^{-3}$ kg

5. <u>Données</u> **<u>A chercher</u>**

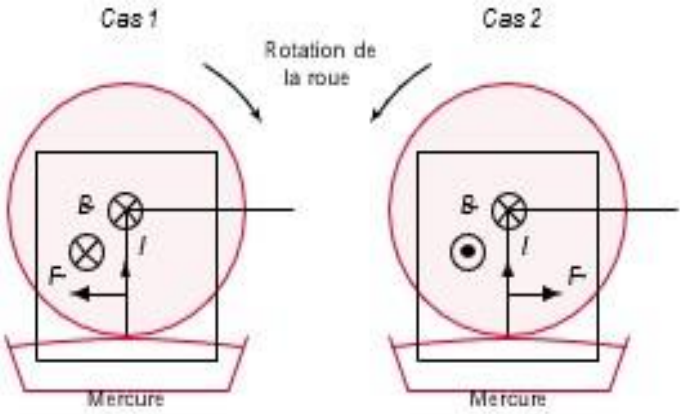
$N = 3\frac{tr}{s}$ 5.1. Schema

$I = 10$ A 5.2. F =?

$R = 5$ cm $= 5.10^{-2}$m $\mathcal{M}(\vec{F})$ =?

$B = 0{,}5$ T 5.3. $P(\vec{F})$ =?

5.1.



5.2. $F = I.R.B = 25.10^{-2}$N

$\mathcal{M}(\vec{F}) = F.\frac{R}{2} = 62{,}5\,.10^{-2}$ Nm

5.3. $P = \mathcal{M}(\vec{F}).\omega$ où $\omega = 3\,.2\pi$ rad/s . ω est la vitesse de rotation du disque.

$P = 62{,}5\,.10^{-2} \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3{,}14 = 1177{,}5\,.10^{-2}\ W$

6. <u>Données</u> **<u>A chercher</u>**

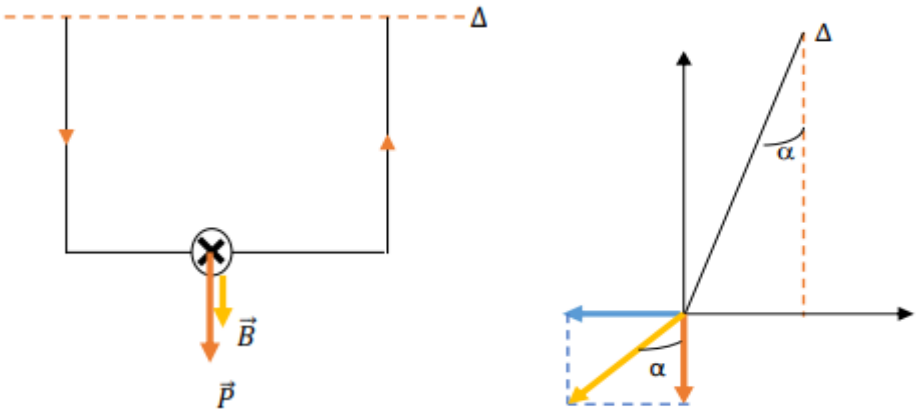
$m = 50$ g $= 5.10^{-2}$ kg 6.1. Schema

$I = 6{,}0$ A 6.2. Equation d'équilibre

$l = 5{,}0$ cm $= 5.10^{-2}$m 6.3. α =?

$B = 0{,}20$ T

Résolution



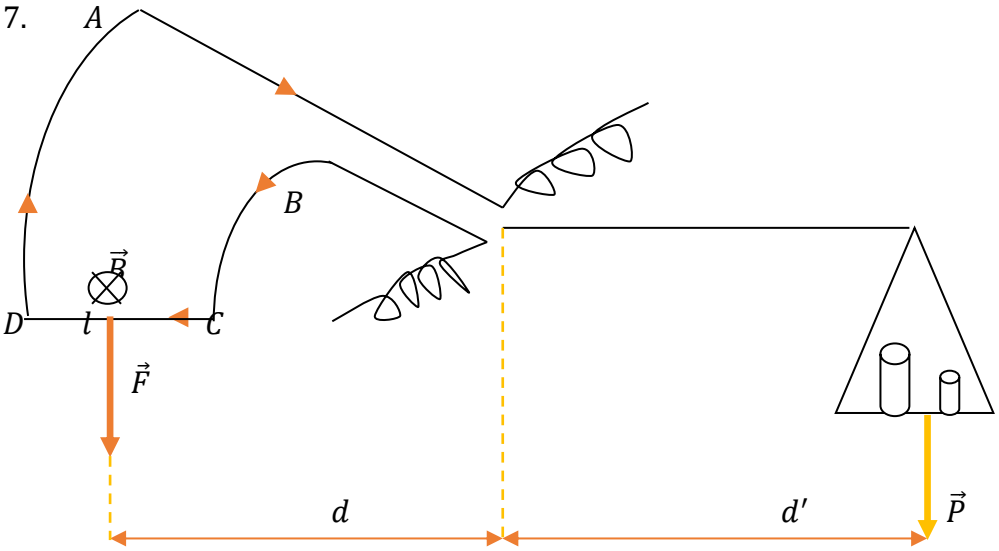
$\vec{T} + \vec{P} + \vec{F} = \vec{0}$ car $\vec{T}, \vec{P}$ et $\vec{F}$ sont dans un même plan et leurs droites d'actions sont concourantes.

6.3. $\begin{cases} T \sin \alpha = F & (1) \\ T \cos \alpha = P & (2) \end{cases}$

6.3. $\tan \alpha = \frac{F}{P} = \frac{I.l.B}{mg} = 0{,}12$

$\alpha = 6{,}84°$

7.



7.1. Direction de $\vec{F}$: verticale

Sens de $\vec{F}$: de haut en bas

Intensité de $\vec{F}$: $F = I.B.l$

7.2. Condition d'équilibre : $\sum \vec{\mathcal{M}}\,(\vec{F_{ext}}) = \vec{0}$

$\vec{\mathcal{M}}\,(\vec{F}) + \vec{\mathcal{M}}\,(\vec{P}) = 0$

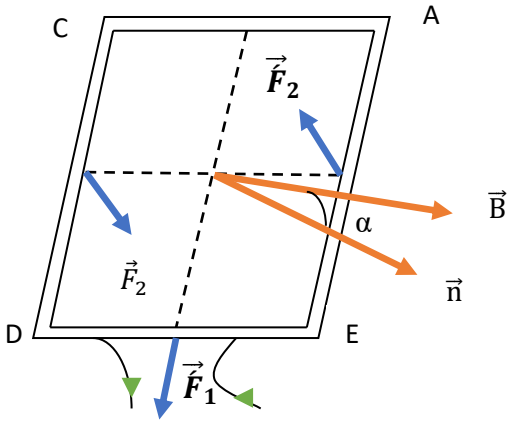
$I.B.l.d - m.g.d' = 0$

$B = \frac{m.g.d'}{I.l.d} = \frac{Pd'}{I.l.d}$ (1)

7.3. $B_0 = \frac{P_0 d'}{I.l.d}$ (2) (par identification)

$\frac{(1)}{(2)} \Rightarrow B = \frac{m}{m_0}.B_0$

8.1.



AC = a est soumis à une force verticale de module F_1

$F_1 = I.N.a.B.|\widehat{I.\vec{a}, \vec{B}}|$ avec $|\widehat{I.\vec{a}, \vec{B}}| = \frac{\pi}{2} + \alpha$

DE = a est soumis à une force verticale de module F_1

$\acute{F}_1 = I.N.a.B.|\widehat{I.\vec{a}, \vec{B}}|$ avec $|\widehat{I.\vec{a}, \vec{B}}| = \frac{\pi}{2} - \alpha$

$\vec{F}_1 + \vec{\acute{F}}_1 = 0$ car elles ont même droite d'action, même module mais opposés.

CD = a est soumis à une force horizontale de module F_2

$F_2 = I.N.b.\ B \sin\frac{\pi}{2} = I.N.b.B$

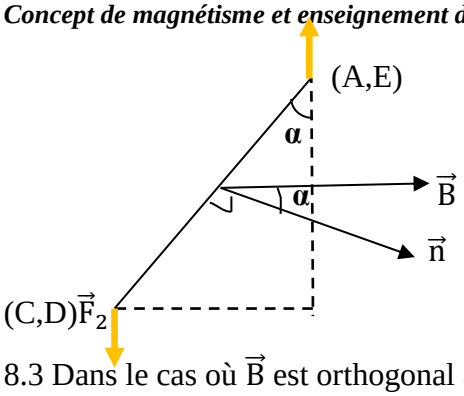
CD = a est soumis à une force horizontale de module $\acute{F}_2$

$\acute{F}_2 = I.N.b.\ B \sin\frac{\pi}{2} = I.N.b.B$

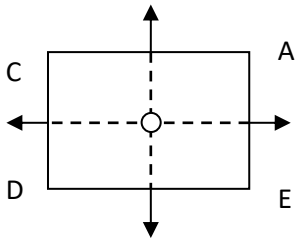
$\vec{F}_2$ et $\vec{\acute{F}}_2$ forment un couple qui a tendance à faire tourner le cadre car elles ont même module, sont parallèles et de sens opposés.

8.2. $\Gamma = F_2.d = F_2.a \sin\alpha = I.N.b.a.B \sin\alpha$ or $b.a = S$: Surface du cadre

Donc, $\Gamma = I.N.S.\ B \sin\alpha$



8.3 Dans le cas où $\vec{B}$ est orthogonal au plan du cadre, le cadre sera en équilibre



9. Données **A chercher**

$N = 200$ spires $C = ?$

$l = 2\ cm = 2.10^{-2}m$

$L = 4\ cm = 4.10^{-2}m$

$B = 0{,}05\ T$

$I = 1\mu A = 10^{-6}A$

$\alpha = 1° = \frac{\pi}{180}\ rd$

Résolution

$$\frac{\alpha}{I} = \frac{N.B.S}{C}$$

$$C = \frac{N.B.S.I}{\alpha} = \frac{N.B.l.L.I}{\alpha} = 45{,}86.10^{-8}Nm.rd^{-1}$$

10. Données **A chercher**

$N = 200$ spires $B = ?$

$l = 5\ cm = 5.10^{-2}m$

$\sigma = 0{,}5.10^{3}rad/A$

$C = 4.10^{-4}Nm/rd$

Résolution

$$10.1.\ \sigma = \frac{N.B.S}{C} = \frac{N.B.l^2}{C}$$

$$B = \frac{C.\sigma}{N.l^2} = 0{,}4\ T$$

11. Données **A chercher**

$OB = 1\ mm = 10^{-3}m$ $10.1.\ \alpha = ?$

$\sigma = 5.\frac{10^4 rd}{A}$ $10.2\ .I = ?$

$D = 1m$

Résolution

$11.1.\tan 2\alpha \approx 2\alpha = \frac{OB}{D} = (10^{-3})$

$\alpha = \frac{\pi.10^{-3}}{2*180}.rad = 5{,}55.10^{-4} rd$

$11.2.\ I = \frac{\alpha}{\sigma} = 1{,}11.10^{-8}A \approx 10^{-8}A$

12. Données **A chercher**

$n = 150$ spires $12.1.1.\ R_1 = ?$

$S_1 = 6\ Cm^2 = 6.10^{-4}m^2$ $12.1.2.\ R_2 = ?$

$U_1 = 5\ V$ $12.2.\ k = ?$

$I' = 5\ A$

$I'' = 50\ mA = 0{,}05\ A$

$\alpha = 60° = 1{,}047\ rad$

$B = 0{,}1\ T$

calibre: $0 \rightarrow 50\ mA \Rightarrow I = 0{,}05A$

$a = 1\Omega$

Résolution

$12.1.1.\ R_1 + a = \frac{U_1}{I}$

$R_1 = \frac{U_1}{I} - a = 99\ \Omega$

Pour mesurer la d.d.p de 0 à 5 V, on doit lui associer en série une résistance de 99 Ω..

$12.1.2.\ U' = R'I = 0{,}05\ V$

$U' = R'I' = (\frac{R_2.a}{R_2 + a})I'$

$R' = \left(\frac{R_2.a}{R_2 + a}\right) = \frac{U'}{I'} = 0{,}01$

$\frac{R_2}{R_2 + 1} = 0{,}01$

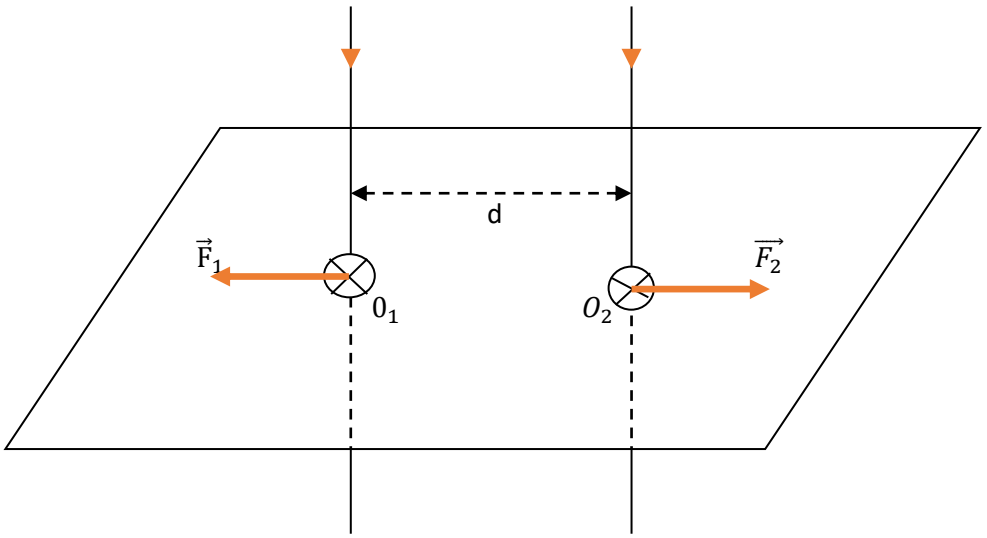
$R_2 = \frac{0,01}{1-0,01}\Omega = 0,01\Omega = 10^{-2}\Omega$

Pour le transformer en ampèremètre destiné à la mesure des intensités de 0 à 5 A, il faut lui associer en parallèle une résistance de $10^{-2}\Omega$

12.2. $\frac{\alpha}{I} = \frac{n.B.S}{k}$, or $S = nS_1$

$k = \frac{n.B.(nS_1).I}{\alpha} = 6,45\ Nm/rd$

13.1.



B_1 et B_2 entre dans le plan et est perpendiculaire à I_1 et I_2.

Intensité : $B_1 = 2.10^{-7}.\frac{I_1}{d}$

$B_2 = 2.10^{-7}.\frac{I_2}{d}$

13.2. Direction de $\vec{F}$: horizontale

Sens de : tel que le trièdre $(\vec{Il}, \vec{B}, \vec{F})$, soit direct $(\overrightarrow{F_1} >< \overrightarrow{F_2})$.

Intensité de : $F_1 = I_1.B_2.l = 2.10^{-7}.l.\frac{I_1.I_2}{d}$

$F_2 I_2.B_1.l = 2.10^{-7}.l.\frac{I_1.I_2}{d}$b

$13.3.\ \overrightarrow{F_1} >< \overrightarrow{F_2} \Rightarrow \overrightarrow{F_1} = -\overrightarrow{F_2}$ et $F_1 = F_2$

Donc ces deux conducteurs se repoussent

14.1. $I = 0, B \neq 0$; le fil de cuivre rigide ne bouge pas.

$I \neq 0, B = 0$; le fil de cuivre rigide ne bouge pas.

$I \neq 0, B \neq 0$; le fil de cuivre rigide dévie d'un angle α.

Quand on permute les bornes du générateur, on change le sens de déviation du fil de cuivre rigide.

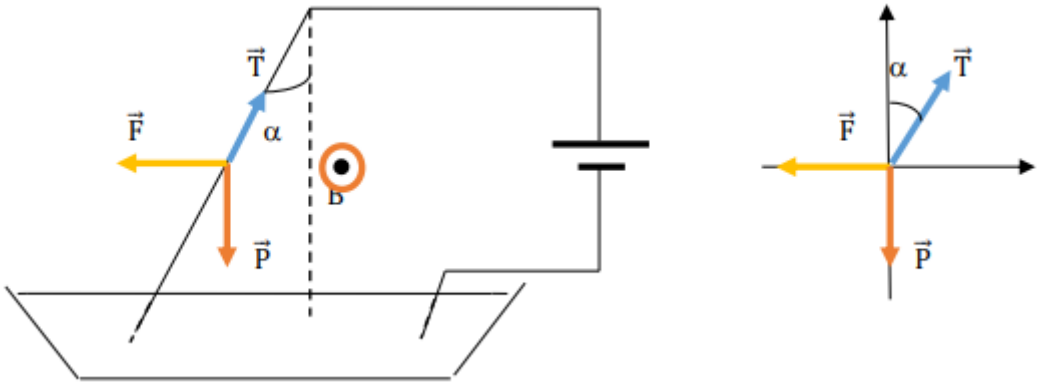
Quand on permute les bornes du générateur, on change le sens de déviation du fil de cuivre rigide.

14.2. $P = 8.10^{-2}N$

$I = 6\ A$

$B = 2.10^{-2}T$

$R = 10\ cm = 10^{-1}m$



Condition d'équilibre : $\sum \overrightarrow{F_{ext}} = \vec{0}$

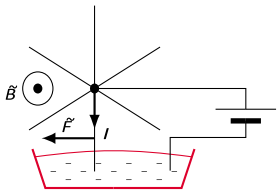
$\vec{T} + \vec{P} + \vec{F} = \vec{0}$

$$\begin{cases} T\sin\alpha = F & (1) \\ T\cos\alpha = P & (2) \end{cases}$$

$$\tan\alpha = \frac{F}{P} = \frac{I.R.B}{P} = 0{,}15$$

$\propto = tan^{-1} = 9^0$

15.1.1.



Sens de rotation (voir figure ci-dessus)

Il y a mouvement de rotation parce que les deux rayons rigides sont soumis à une force électromagnétique qui fait tourner chaque rayon autour de l'axe (Δ), lorsqu'il est parcouru par un courant électrique.

15.2. Données **A chercher**

$N = 90\,\frac{trs}{min} = \frac{1{,}5tr}{s}$ $P(\vec{F}) = ?$

$I = 6A$

$R = 10\ cm = 10.10^{-2}m$

$B = 2.10^{-2}\ T$

Résolution

$$P(\vec{F}) = \mathcal{M}(\vec{F}).\omega = 2\pi.N.\mathcal{M}(\vec{F}) = 2\pi.N.\left(I.B.\frac{R^2}{2}\right) = \pi.N.I.B.R^2 = 5{,}652.10^{-3}\ W$$

LE FLUX MAGNETIQUE

1. Données **A chercher**

$N = 20$ spires 1.1. B_0 =?

$R = 6\ cm = 6.10^{-2} m$ 1.2. Φ_1 =? , Φ_2 =?

$B = 0{,}2\ T$ 1.3. W_1 =? ,W_2= ?

$I = 5\ A$

Résolution

1.1. $B_0 = 2\pi.10^{-7}.\frac{N.I}{R} = 1{,}046.10^{-3}\ T$

$B_0 \ll B$, B_0 est négligeqble devant B.

1.2. $\Phi_1 = N.B.S\ \cos 0° = \pi R^2 N.B.\cos 0° = 4{,}52.10^{-4} Wb$

$\Phi_2 = N.B.S\ \cos 180° = \pi R^2 N.B.\cos 180° = -4{,}52.10^{-4} Wb$

1.3. $W_1 = \Phi_1 I = 2{,}26.10^{-1} J$

$W_2 = \Phi_2 I = -2{,}26.10^{-1} J$

2.Données A chercher

$N = 40$ spires 2.1 . Γ =?

$S = 4\ cm * 5cm = 20.10^{-4} m^2$ 2.2. conclusion

$B = 0{,}02\ T$ 2.3 . $W(\vec{F})$ =?

$I = 4\ A$

$\alpha = 60°$

Résolution

2.1. $\Gamma = I.N.B.S\ \sin 60° = 5{,}54.10^{-3} Nm$

2.2. Le cadre ne reste pas en position initiale, donc il se met en mouvement le moment du couple électromagnétique n'est pas nul.

2.3. $W(\vec{F}) = I(\Phi_2 - \Phi_1) = INBS(\cos 0° - \cos 60°) = 3{,}20.10^{-3} J$

3.Données **A chercher**

$D = 0{,}24\ m$ 3.1. N =?

$S' = 0{,}2\ mm^2 = 0{,}2.10^{-6} m^2$ 3.2. Caractéristiques de $\overrightarrow{B_S}$

$B = 0{,}02\ T = 2.10^{-2}\ T$ 3.3 . Position du solénoide

$E = 50\ V$ 4.4. $W(\vec{F})$ =?

$r = 2\Omega$

$R = 48\ \Omega$

$\rho = 1{,}7.10^{-8}\Omega m$

Résolution

3.1. $R = \rho.\frac{l}{S}$, avec $l = N.\pi.D$; avec l: longueur du fil

$\Rightarrow R = \rho.\frac{N.\pi.D.}{S}$

$\Leftrightarrow N = \frac{R.S}{\rho.\pi.D} = 749$ spires

3.2. $S' = \frac{\pi d^2}{4} \Leftrightarrow d = 2\sqrt{\frac{S'}{\pi}} = 5.10^{-4}m$

La longueur du solénoïde :$L = N.d = 0{,}375$ m

$I = \frac{E}{R+r}$

Direction de $\vec{B}$: horizontale

Sens de $\vec{B}$: donné par la règle de l'observateur d'Ampère.

$B_s = 4\pi.10^{-7}.\frac{NI}{L} = 4\pi.10^{-7}.\frac{NE}{L(R+r)} = 2{,}5.10^{-3}$ T

3.3. La position finale est telle que $\vec{B_S}$ et $\vec{B}$ ont même sens.

$W = I\Phi = INB'$, avec $B' = B - B_S$=17,5.10^{-3} T

4.Données

$N = 400$ spires

$D = 10$ Cm $= 10^{-1}m$

$B = 2.10^{-2}$ T

$I = 10$ A

A chercher

4.1. Action de $\vec{B}$ sur le solénoide

4.2. $W(\vec{F})$ =?

Résolution

4.1. L'action de $\vec{B}$ sur le solénoïde est de faire tourner ce solénoïde.

4.2. $W(\vec{F}) = I(\Phi_2 - \Phi_1) = I.N.B.S(\cos 0° - \cos 90°) = I.N.B.\left(\frac{\pi D^2}{4}\right).(\cos 0° - \cos 90°) =$

$31\ 400.10^{-5}$J

Signe positif

5. Données **A chercher**

$D = 0{,}24$ m B =? & Sens et direction

$L = 50$ cm $= 50.10^{-2}$m5.2.W$(\vec{F})$ =?

$E = 10$ V

$R = 1{,}6\ \Omega$

$N = 500$ spires

$I = 1$ A

Résolution

5.1. Direction de $\vec{B}$: horizontale

Sens de $\vec{B}$: donné par la règle de l'observateur d'Ampère.

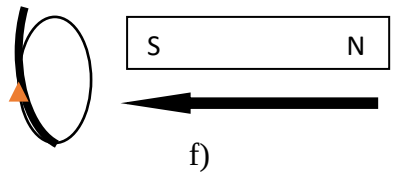
$B_s = 4\pi.10^{-7}.\frac{NI}{L} = 12{,}56.10^{-4}$ T

La position d'équilibre de la spire si ce flux est maximal c'est-à-dire que les lignes de champ magnétique sont perpendiculaires au plan de la spire.

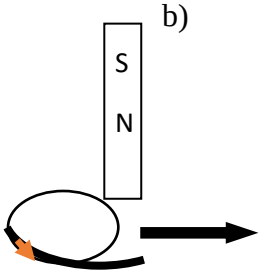
5.2.W$(\vec{F}) = I(\Phi_2 - \Phi_1) = I.N.B.S(\cos 0° - \cos 90°) = 28\ 395{,}648.10^{-6}$ J

III.L'INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

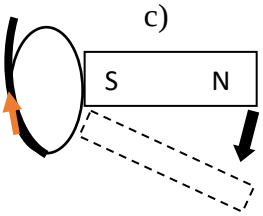
a)



b)



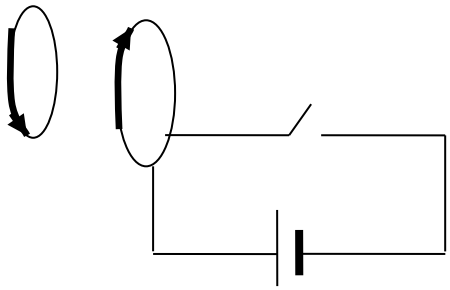
c)

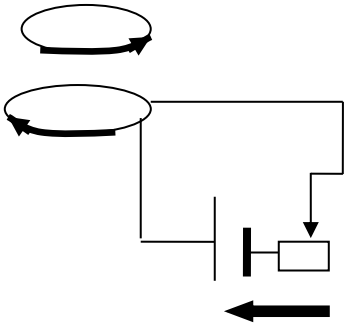


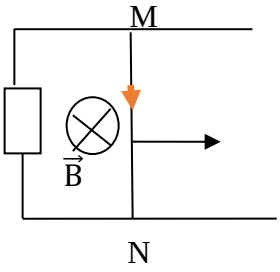
f)

e)

d)

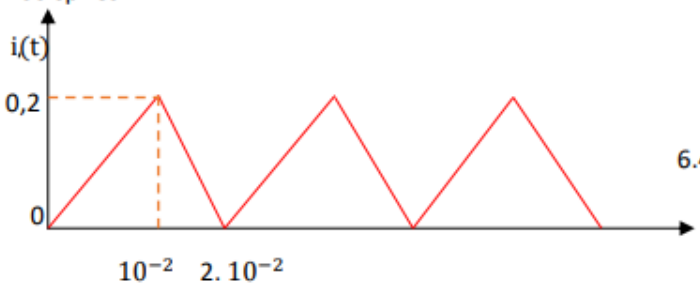






6) Données

N= 100 spires



A chercher

6.1.Caractéristiques de $\vec{B}$.

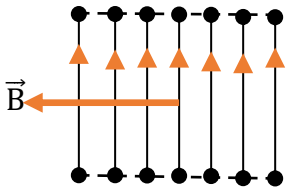
6.2.i(t) =? ; i'(t) =?

6.3. Ce qui se passe dans la bobine plate

6.4.i'(t) =?; e(t) =?; e =?

Résolution

6.1.



Direction de $\vec{B}$: perpendiculaire au plan de la bobine

Sens de $\vec{B}$: donné par la règle de l'observateur d'Ampère

Point d'application de $\vec{B}$: au centre du solénoïde

Intensité de $\vec{B}$: $B = 4\pi.10^{-7}.n.i = 12{,}56.10^{-4}i$

6.2.$i(t) = at + b$

si $t = 0, i = 0 \Rightarrow 0 + b = 0 \Leftrightarrow b = 0$

si $t = 10^{-2}, i = 0{,}2 \Rightarrow 10^{-2}a + b = 0{,}2$

si $t = 0, i = 0 \Rightarrow 0 + b = 0 \Leftrightarrow b = 0$

si $t = 10^{-2}, i = 0{,}2 \Rightarrow 10^{-2}a + b = 0{,}2$

$\Leftrightarrow 10^{-2}a + 0 = 0{,}2$

$a = 20$

$i(t) = 20t$

$i'(t) = a't + b'$

si $t = 10^{-2}$ s , $i' = 0{,}2$ A

$\Rightarrow 10^{-2}a' + b' = 0{,}2$

si $t = 2.10^{-2}, i' = 0$ A

$\Rightarrow 2.10^{-2}a' + b' = 0$

$$\begin{cases} 2.10^{-2}a' + b' = 0 \\ 10^{-2}a' + b' = 0{,}2 \end{cases}$$

$a' = -20$

$b' = 0{,}4$

$i'(t) = -20\,t + 0{,}4$

6.3. Dans les deux cas il y a création du courant induit dans la bobine plate à cause de la variation du flux dans celle – ci .

$$2.4.\ e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{NS(B_1 - B_0)}{t_1 - t_0} = \frac{12{,}56.10^{-4}NS(i_1 - i_0)}{t_1 - t_0} = -401{,}92.10^{-6}\ V$$

$$e' = -\frac{\Delta\Phi'}{\Delta t'} = -\frac{NS(B_2 - B_1)}{t_2 - t_1} = \frac{12{,}56.10^{-4}NS(i_2 - i_1)}{t_1 - t_0} = 401{,}92.10^{-6}\ V$$

3) **Données**

$N = 200$ spires

$r = 2\ \Omega$

$C = 4\ Cm = 4.10^{-2}m$

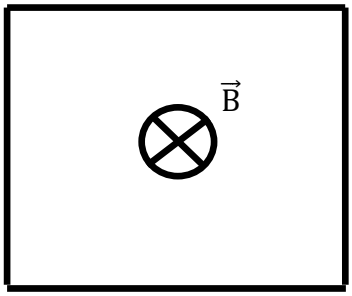
$B = 1\ T$

A chercher

3.1.e =?

3.2.i=?

Résolution



$4.1.B(t) = at + b$

$Si\ t = 0, B = 15, donc\ b = 1$

$Si\ t = 16\ , B = 0, donc\ \ 16a + b = 0$

$$\begin{cases} b = 1 \\ 16a + b = 0 \end{cases}$$

$$a = -\frac{1}{16}$$

$$B(t) = -\frac{1}{16}\,t + 1$$

$$\Phi(t) = B.S.N = -2.10^{-2}t + 32.10^{-2}$$

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = 2.10^{-2}\ V$$

$$4.2.i = \frac{|e|}{\sum r} = \frac{2.10^{-2}}{8+2} = 2.10^{-3}A$$

4) Données

$l = OA = OB = 1m$

$\alpha = 45°$

$$v = \frac{25Cm}{s} = 25.\frac{10^{-2}m}{s}$$ e_M =?

$OM = x\ , B = 0{,}1\ T$

A chercher

4.1.s(t) =?

4.2. e =?

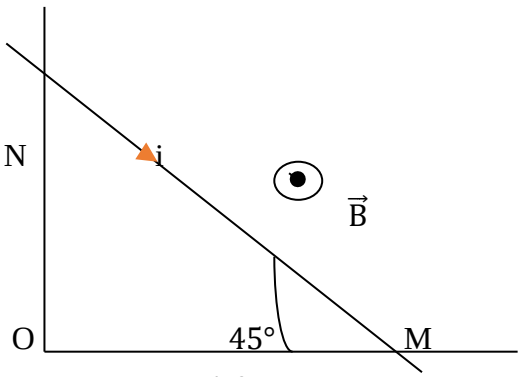
Sens du courant induit(i)

Résolution

$$4.1.s = \frac{(\overline{OM})\ (\overline{ON})}{2} = \frac{x^2}{2},\ or\ x = vt$$

$$\Rightarrow S(t) = \frac{(vt)^2}{2} = \frac{625.10^{-4}t}{2} = 312{,}5.10^{-4}t$$

4.2.



$\Phi = BS = 31{,}25.10^{-4}t^2$

$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -62{,}5.10^{-4}t$

$e(t) = -2\,v^2t = -2v.x$

e est maximale pour $x = l = 1m \Rightarrow e_M = -2v = -50.10^{-2}V = -0{,}5\ V$

5) Données

$MN = l = 4cm = 4.10^{-2}m$

$v = 2\ cm/s = 2.10^{-2}m/s$

$R_1 = 2.10^{-2}\Omega$

$B = 0{,}5\ T$

$R_2 = 4.10^{-2}\Omega$

A chercher

5.1.sens de: i_1, i_2 , et i

5.2. i_1 =?, en fonction de i_2 et i

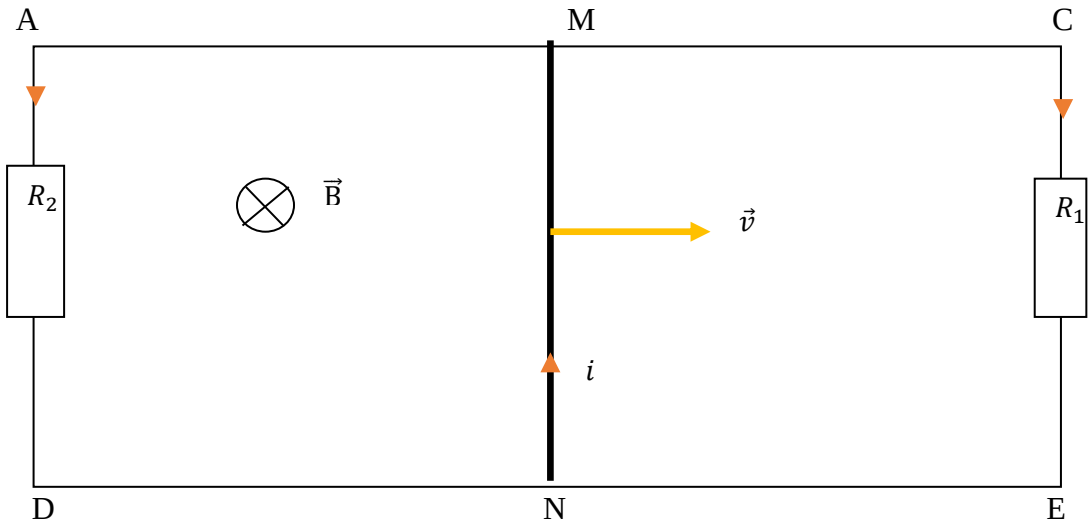
5.3. i_1 =?

i_2 =?

i =?

Résolution

5.1.



5.2. $i = i_1 + i_2$

5.3. $\Phi = BS = B(S_0 + l.v.t) = 0{,}5(S_0 + 4.10^{-2} * 2.10^{-2}t)$

$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -4.10^{-4}\ V$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{8}{6}.10^{-2}\Omega$$

$$|i| = \frac{|e|}{R} = 3.10^{-2}\ A$$

$$i = -3.10^{-2}\ A$$

$$i_1 = \frac{e}{R_1} = -2.10^{-2}\ A$$

$$i_2 = \frac{e}{R_2} = -1.10^{-2}\ A$$

5.4. Dans le cas où MN se déplace dans l'autre sens, on a :$\Phi = 0{,}5\ S_0 - 4.10^{-2}t$

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = 4.10^{-4}\ V$$

$$i = 3.10^{-2}\ A$$

$$i_1 = \frac{e}{R_1} = 2.10^{-2}\ A$$

$$i_2 = \frac{e}{R_2} = 1.10^{-2}\ A$$

6.<u>Données</u> **<u>A chercher</u>**

$S = 40\ cm^2 = 40.10^{-4}m^2$ 6.1. Φ_p =?

$r' = 1cm = 10^{-2}m$ 6.2.1. B(t) =?

$R = 20\ \Omega$ 6..2.2. i =?

$N' = 500$ spires

$t = 10\ s$

$N = 10\ 000$ spires

$I = 10\ A$

$l = 0{,}5\ m$

<u>Résolution</u>

6.1. Φ_p est proportionnel à B et donc à i

$\Phi_p = L.i$ (1)

$\Phi_p = NBS = 4\pi.10^{-7}.\frac{N}{l}.S.i = 1004{,}8.10^{-7}\ i$ (2)

De (1) et (2), on a : $L = 1004{,}8.10^{-7}\ H = 10^{-4}\ H$

6.2. $i = at + b$

Si $t = 0, i = 0 \Rightarrow 0 = 0.a + b \Leftrightarrow b = 0$

Si $t = 5s, i = 10\ A \Rightarrow 10 = 5a + b$

$\Leftrightarrow 10 = 5a + 0 \Leftrightarrow a = 2$

$i(t) = 2t$

$B = 4\pi.10^{-7}.\frac{N}{l}.i = 25{,}12.10^{-3}\, i = 50{,}24.10^{-3}\, t$

$\Phi = BSN = \pi r^2.B.N = 78876{,}8.10^{-7}t$

$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -78876{,}8.10^{-7}\ V$

$i = \frac{e}{R} = -3943{,}84.10^{-7}A$

7.Données

$L = 5{,}0\ mH = 5.10^{-3}H$

$r = 2{,}0\ \Omega$

$i = 0{,}20\ A$

A chercher

7.1. Φ_p =?

7.2. Intervalles de temps où il y a variation du Φ_p

$\Delta\Phi_1$ =?

$\Delta\Phi_2$ =?

7.3 . e_1 =?

e_2 =?

7.4. u_{AB} =?

Résolution

7.1. $\Phi_p = L.i = 10^{-3}$ Wb

$[10^{-2}; 2.10^{-2}]$ et $[3.10^{-2}; 4.10^{-2}]$

Dans l'intervalle $[10^{-2}; 2.10^{-2}]$,l'intensitéi_1 varie en fonction du temps :$i_1(t) = at + b$

Si $i = 0$, $t = 10^{-2}s \Rightarrow 0{,}2 = 10^{-2}a + b$

Si $i = -0{,}2\ A$, $t = 2.10^{-2}s \Rightarrow -0{,}2 = 2.10^{-2}a + b$

$$\begin{cases} 10^{-2}a + b = 0{,}2 \\ 2.10^{-2}a + b = -0{,}2 \end{cases}$$

$a = -40$

$7.2. = 0{,}6$

$\Rightarrow i_1 = -40t + 0{,}6$

$\Delta\Phi_1 = L[i_1(t_2) - i_1(t_1)] = 5.10^{-3}(-0{,}2 - 0{,}2)Wb = -2.10^{-3}$ Wb

$\Delta\Phi_2 = L[i_1(t'_2) - i_1(t'_1)] = 5.10^{-3}(0{,}2 + 0{,}2)Wb = 2.10^{-3}$ Wb

$7.3. e_1 = -\frac{\Delta\Phi}{t_2 - t_1} = 0{,}2\ V$

$e_1 = -\frac{\Delta\Phi}{t'_2 - t'_1} = -0{,}2\ V$

$7.4. U_{AB} = ri + L.\frac{di}{dt} = -80t + 0$