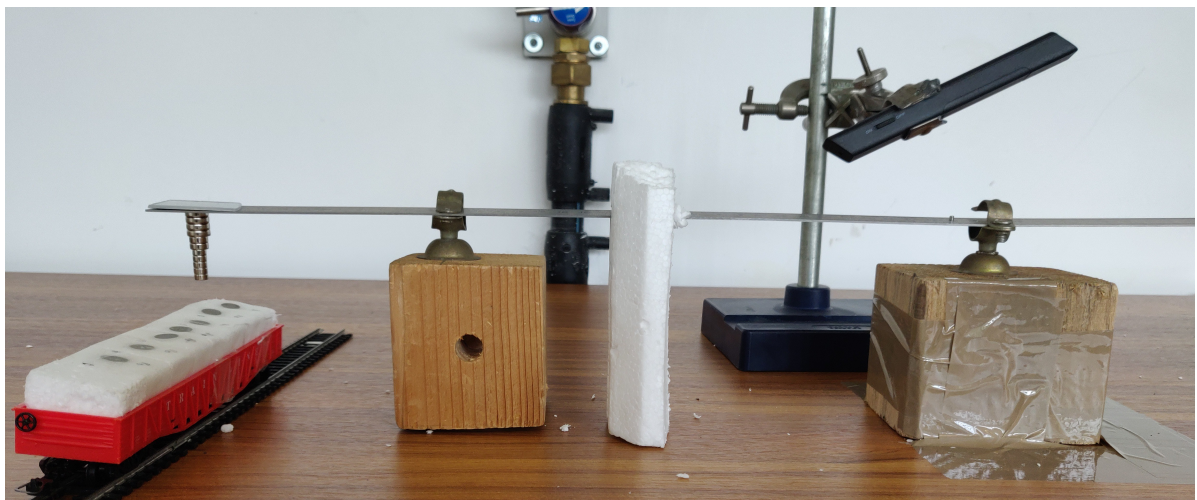


Projet de Physique P6
STPI/P6/2019 – 040

**LE MICROSCOPE A FORCE MAGNÉTIQUE
POUR L'ÉTUDE DES SURFACES**



Etudiants :

Guillaume BRODIN

David MBAYE

Florent SAVAGE

Enseignant-responsable du projet :

Rémi DEMOULIN

Date de remise du rapport : 17/06/2019

Référence du projet : STPI/P6/2019 – 040

Intitulé du projet : **Le Microscope à Force Magnétique pour l'étude des surfaces**

Type de projet : **théorique et expérimental**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

Le but du projet était de comprendre la topographie des surfaces à l'échelle microscopique et de façon théorique ; puis de réaliser une maquette fonctionnelle du Microscope à Force Magnétique pour « voir » ce qu'il se passe à l'échelle macroscopique et de façon expérimentale.

Mots-clefs du projet (4 maxi) :

- **Microscope**
 - **Aimant**
 - **Magnétisme**
 - **Topographie**
-

TABLE DES MATIÈRES

NOTATIONS / ACRONYMES.....	5
1. INTRODUCTION.....	6
2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL.....	6
3. TRAVAIL RÉALISÉ / RÉSULTATS.....	7
3.1. LE MICROSCOPE A FORCE ATOMIQUE.....	7
3.1.1. L'HISTOIRE.....	7
3.1.2. LE PRINCIPE.....	8
3.1.3. L'UTILISATION.....	9
3.2. LE MAGNÉTISME.....	10
3.2.1. L'ORIGINE DU MAGNÉTISME.....	10
3.2.2. LE CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE.....	11
3.2.3. LES MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES.....	11
3.2.3.1. LES MATÉRIAUX PARAMAGNÉTIQUES.....	11
3.2.3.2. LES MATÉRIAUX DIAMAGNÉTIQUES.....	12
3.2.3.3. L'EXPLOITATION DE CES RÉSULTATS.....	12
3.3. LA RÉALISATION DU PROJET.....	13
3.3.1. L'INTERACTION ENTRE DEUX AIMANTS.....	13
3.3.2. LE MICROSCOPE A FORCE MAGNÉTIQUE.....	14
3.3.3. LA MAQUETTE.....	14
3.3.3.1. LA CONCEPTION.....	14
3.3.3.2. LA DESCRIPTION.....	15
3.4. LES EXPÉRIENCES RÉALISÉES.....	16
3.4.1. L'INTERACTION POINTE-AIMANT SANS CONTACT.....	16
3.4.2. LES INTERACTIONS PAR DIFFÉRENTS TYPES D'AIMANTATION..	18
3.4.2.1 LA RÉPULSION.....	18
3.4.2.2. L'ATTRACTION-RÉPULSION.....	19
3.4.2.3. L'INTERACTION « DOUBLE-AIMANT ».....	19
4. CONCLUSION / PERSPECTIVES.....	23
5. BIBLIOGRAPHIE.....	24

NOTATIONS / ACRONYMES

- MFM → Microscope à Force Magnétique
 - AFM → Microscope à Force Atomique
 - STM → Microscope à effet Tunnel
 - G → Gauss
 - T → Tesla
 - USI → Unité du Système International
-

1. INTRODUCTION

Dans le cadre des Projets de Physique P6 du département STPI, nous avons eu la chance de pouvoir travailler en groupe, supervisé par un enseignant pendant un semestre, dans le but de répondre à un problème sur un sujet précis par création d'un poster, par rédaction d'un rapport écrit et par présentation d'une soutenance orale.

Pour répondre à notre problème, qui porte sur le Microscope à Force Magnétique pour l'étude des surfaces, nous avons commencé par une étude théorique à propos du magnétisme et de l'histoire de la microscopie. Puis nous avons construit une maquette fonctionnelle du Microscope à Force Magnétique. Enfin nous avons réalisé plusieurs expériences grâce à notre maquette dans le but de confirmer notre étude théorique et de répondre à notre problème.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Pour l'organisation du travail, nous nous sommes retrouvés toutes les semaines aux heures prévues pour mettre en commun le travail que chacun avait préparé à l'avance et pour se donner des objectifs réalisables d'une semaine à l'autre avec l'aide de notre enseignant.

De plus nous avons mis en place un drive pour pouvoir modifier à tout moment les documents partagés et ainsi pouvoir observer l'avancée du projet en temps réel.

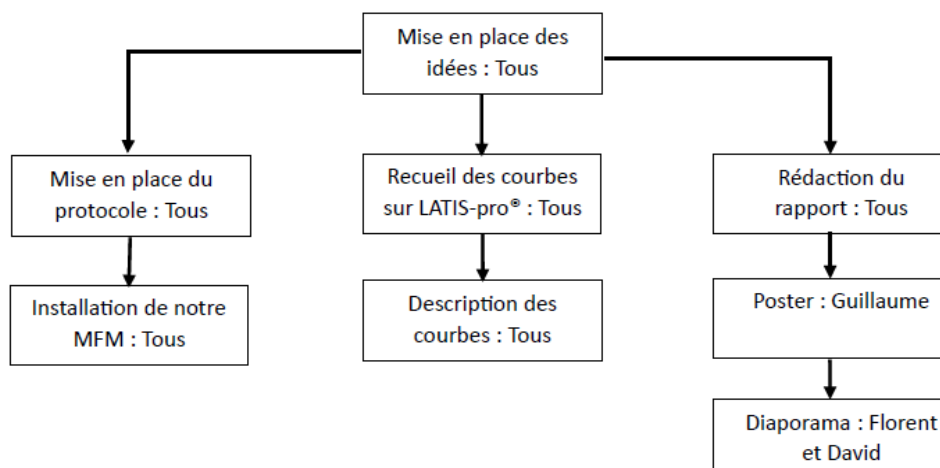


Figure 1: Organigramme de la répartition des tâches

3. TRAVAIL RÉALISÉ / RÉSULTATS

Les systèmes optiques que nous pouvons observer dans la nature, ne sont pas parfaits et vieillissent mal comme nos yeux par exemple. Le besoin de mieux voir a forcé les hommes à trouver des solutions que sont les lentilles de correction ; c'est le début des microscopes optiques.

Rappelons que « microscope » provient de deux mots : « micron » du grec « petit » et « skopein » du grec « observer ». Avant d'évoquer le Microscope à Force Magnétique, nous souhaitons introduire les anciens microscopes et principalement leurs limites pour savoir ce qui a poussé les chercheurs à développer de nouvelles technologies telles que l'AFM et le MFM.

3.1. LE MICROSCOPE À FORCE ATOMIQUE

3.1.1. L'HISTOIRE

Le Microscope à Force Atomique est inventé en 1985 par les physiciens G. Binnig, C. Quate et C. Gerber, ce type de microscope est aussi appelé microscope à sonde locale. Afin de bien comprendre le principe de fonctionnement du microscope à sonde locale, revenons sur le principe de fonctionnement du microscope dit « traditionnel ».

Les microscopes « optiques » ou « électroniques » émettent une onde, de longueur d'onde λ , afin « d'éclairer » l'objet à analyser. En bombardant l'objet de rayons lumineux, ceux-ci vont être diffractés et revenir sur le point image afin de donner une image agrandie (cf cours de P4.1 « optique géométrique » et *figure 2*).

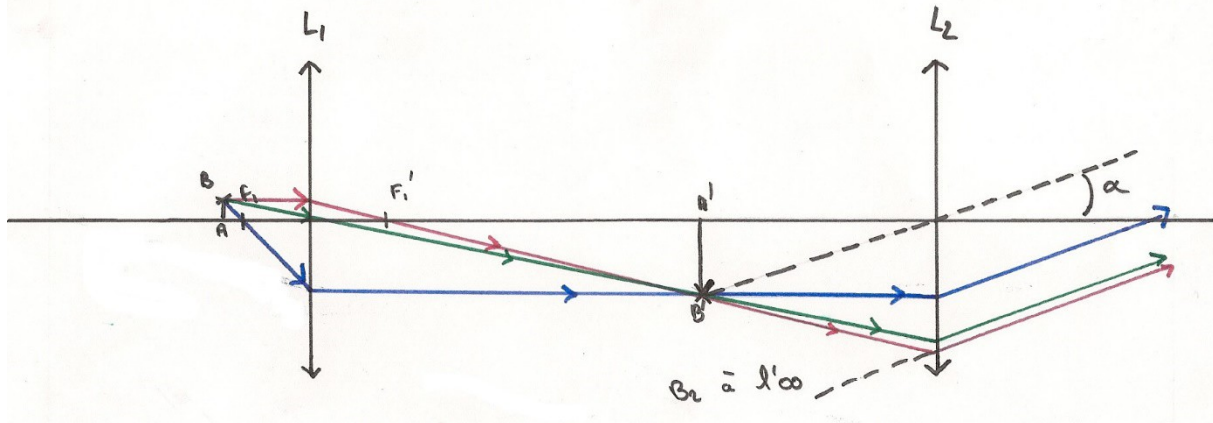


Figure 2: Principe de fonctionnement du microscope optique

Cependant, la plus petite distance pouvant être perçue par ce type de microscope (dans le plan image) équivaut à la longueur d'onde λ utilisée. Il est donc impossible, pour ce type de microscope, de renvoyer une image plus grande d'un objet plus petit que la longueur d'onde utilisée. C'est un problème optique lié à la diffraction. De plus, Un des gros problèmes de cette technique est le fait que les rayons lumineux ne sont pas déviés avec le même angle selon leur couleur. Une distorsion des images apparaît, que l'on appelle plus communément l'aberration chromatique (une image floue et des contours irisés).

Or, depuis quelques décennies, sur le plan technologique nous assistons à une course à la miniaturisation. En effet, l'homme cherche de plus en plus à réduire la taille des systèmes qu'il créé. Grâce à l'avancée sur les nanotechnologies, il est désormais possible d'avoir du

matériel microscopique voire nanoscopique ! Mais, tout ça n'aurait sûrement pas eu lieu sans de nouvelles techniques d'analyse mises en place pour observer des échantillons à l'échelle du nanomètre.

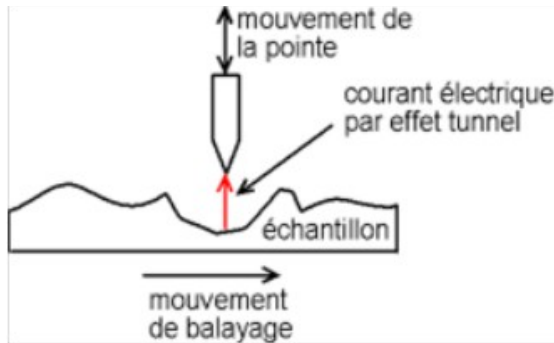


Figure 4: Schéma d'un balayage topographique

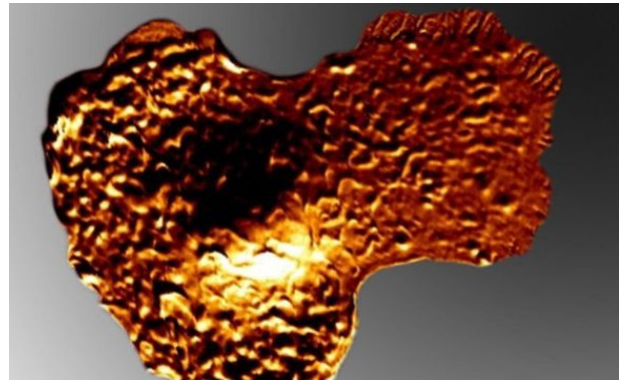


Figure 3: Représentation d'une surface analysée grâce à l'AFM

Une de ces avancées, citée précédemment, est le microscope à sonde locale, la particularité de ce type d'instrument est qu'il s'affranchit des problèmes de résolution dus à la diffraction en plaçant sa sonde à une infime distance de l'échantillon à analyser.

Le premier type de microscope à sonde locale mis en service est le Scanning Tunneling electron Microscope ou microscope à « effet tunnel » en 1982. Ce microscope à champ proche a pour but d'établir une carte topographique de l'échantillon, à l'échelle macroscopique, que nous analysons en utilisant le transfert de charges électriques à l'échelle microscopique.

Le principe est d'appliquer une différence de potentiel sur l'échantillon conducteur, par exemple un métal, que l'on approche très près d'une fine pointe métallique, conductrice également, sans que celle-ci ne touche la surface (cf figures 3 et 4). Un courant électrique va ainsi s'établir entre l'échantillon et la pointe puis on balaye finalement la surface pour avoir la topographie de l'échantillon. La pointe est environ 1000 fois plus petite qu'un cheveu (soit environ 100 nm).

Il était à l'époque (1930) très difficile de concevoir de telles pointes et construire un appareil qui puisse mesurer des courants de l'ordre du nanoampère n'était pas possible. De plus il fallait prêter attention aux vibrations acoustiques et aux changements de température, qui peuvent faire varier la distance entre la pointe et l'échantillon. Le domaine d'utilisation de cette technologie se limite à l'étude des matériaux conducteurs ainsi les matériaux isolants n'ont pu être étudiés. Les chercheurs ont donc essayé de trouver un moyen de dépasser cette barrière, et c'est ainsi qu'est né, trois années plus tard, le Microscope à Force Atomique.

3.1.2. LE PRINCIPE

L'AFM est en réalité un microscope d'analyse en champ proche, en effet, son but est de mesurer les interactions à très courte distance entre une sonde et la surface de l'échantillon. Pour se faire, l'apex à pointe de l'AFM est en réalité constitué d'un matériau mettant en jeu deux types de forces interatomiques :

- la force attractive de Van der Waals ;

- la force répulsive entre nuages électroniques ; (principe d'exclusion de Pauli) (cf cours de C1 : « 1^e EC de chimie »)

Ce système va donc faire interagir les atomes du sommet de la pointe avec les atomes surfaciques de l'échantillon, cette technique permet donc d'analyser un matériau à des échelles allant du micromètre jusqu'au nanomètre et elle permet aussi de mesurer des forces d'interaction de l'ordre du nanonewton.

La pointe de l'AFM est placée à l'extrémité d'un bras de levier flexible pouvant se déplacer dans toutes les directions de l'espace(cf *figure 5*). Ainsi, la pointe balaye la surface d'un échantillon et, lorsque l'apex fait face à des atomes mettant en jeu les forces interatomiques, le bras de levier va osciller en fonction de la nature répulsive ou attractive des forces mises en jeu.

Afin de représenter la surface de l'échantillon, on place un laser au-dessus du bras de levier au bout de celui-ci se trouve un miroir. Le rayon laser va se réfléchir sur le miroir et le rayon réfracté va atteindre un « écran » ou va se dessiner la trajectoire du rayon laser. Ainsi, une représentation de l'échantillon peut être dessinée en étant agrandie.

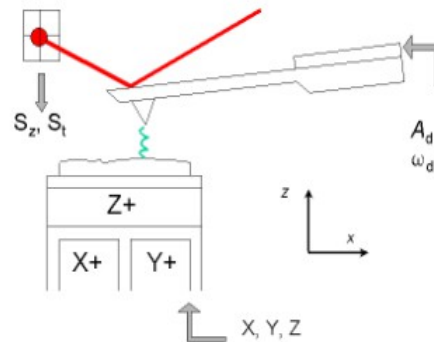


Figure 5: Principe de l'AFM

3.1.3. L'UTILISATION

L'AFM a été conçu non seulement pour remplacer le microscope à effet tunnel, mais aussi pour répondre aux besoins de la physique appliquée et des nanotechnologies en plein essor. Il est très utilisé de nos jours car il permet d'analyser la topographie de tous les types de surfaces. L'analyse des flexions du bras de levier permet de modéliser le parcours de la pointe, donc de donner une représentation graphique, agrandie, de la surface analysée (cf *figure 6*).

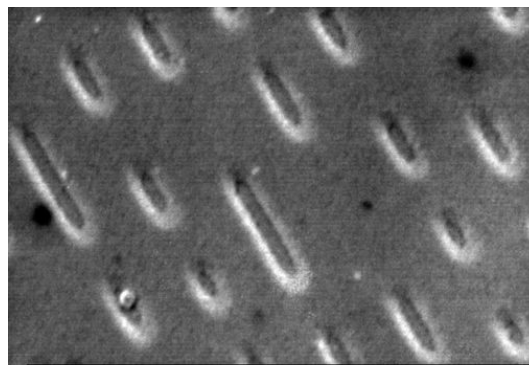


Figure 6: Bits de mémoire CD analysés par AFM

L'AFM dispose de trois modes de fonctionnement suivant la surface à analyser :

- Le mode « contact » n'utilise que des forces répulsives, la pointe s'appuie sur la surface et est repoussée grâce au principe de Pauli ;
- Le mode « tapping » ou mode de « contact intermittent » , le mode le plus utilisé, consiste à faire osciller sans arrêt le levier, à sa fréquence de résonance propre, afin de limiter les contacts entre la surface et l'apex, sans pour autant nuire à l'analyse de la surface.
- Le mode « sans contact » utilise les forces attractives selon le principe de Van Der Waals. C'est le mode le plus difficile à utiliser car il est essentiellement utilisé sous vide.

Un des énormes avantages que procure ce type de microscope à sonde locale est qu'il nous permet d'atteindre la résolution atomique dans certaines conditions expérimentales (expérimentation sous vide et à très basse température). Cette technologie a permis le développement d'autres méthodes s'appuyant sur le même principe comme le microscope à force magnétique.

3.2. LE MAGNÉTISME

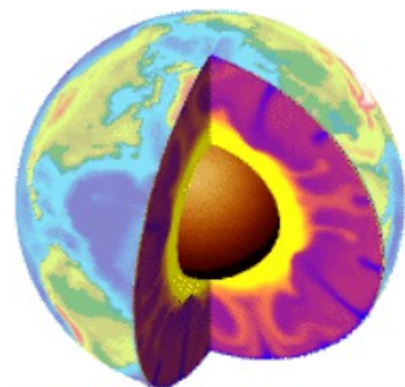
Comme dit précédemment, les chercheurs ont voulu exploiter un maximum les microscopes à sonde locale à partir de l'AFM et un des dérivés de ce microscope est donc le Microscope à Force Magnétique mais avant de décrire son fonctionnement, revenons aux bases du magnétisme.

3.2.1. L'ORIGINE DU MAGNÉTISME

Commençons par un peu de géologie et intéressons-nous au cœur de notre planète, la Terre est constituée de plusieurs couches : en effet, si l'on veut aller au noyau, il faut traverser la croûte océanique ou continentale, la lithosphère, l'asthénosphère, les manteaux supérieur et inférieur, le noyau externe, pour enfin arriver au noyau interne (cf programme Première-S-SVT et *figure 7*).

Le magnétisme terrestre proviendrait des mouvements d'un liquide très dense constitué de fer en fusion composant le noyau externe de la Terre. Le magnétisme serait, en réalité, un moyen pour notre planète de se débarrasser des flux de chaleur produits dans son noyau. Nous pouvons aussi y voir un parallèle avec le fait que notre météorologie est paramétrée par la circulation des flux d'air qui refroidissent la Grande Bleue.

Une des hypothèses de la provenance de ce magnétisme, serait que le fer en fusion du noyau externe, en rejoignant le noyau interne, créerait des flux de liquide en fusion. Le déplacement de ces flux au sein de champs magnétiques préexistants entraînerait la création d'un courant électrique créant à son tour un champ magnétique résultant.



Le noyau de la Terre

Figure 7: L'origine du magma

Mais qu'est-ce qu'un champ ? C'est une grandeur vectorielle ou scalaire définie en tout point d'un domaine de l'espace. Un champ est fonction des trois variables de coordonnées de l'espace (x, y, z) et de la coordonnée de temps (t). Un champ magnétique est donc une grandeur représentative du magnétisme. Les sources du champ magnétique sont les charges en mouvement donc les courants électriques et les aimants, ce qui est en total accord avec l'hypothèse de déplacement des flux de fer en fusion (cf cours P5).

3.2.2. LE CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE

La Terre, comme tout le monde sait, possède un pôle Nord et un pôle Sud. Elle possède aussi un pôle Nord et un pôle Sud magnétique. A la différence des pôles géographiques, les pôles magnétiques ont la capacité de s'inverser. La dernière inversion magnétique remonte à 780 000 ans. La période d'inversion dure de 1000 à 10 000 ans. Durant cette période, la Terre se trouve exposée aux vents solaires, pouvant menacer certains organismes vivants et, si l'inversion se produit aujourd'hui, certaines technologies utilisant le champ magnétique pourraient être affectées. Ce phénomène peut aussi avoir lieu avec les pôles magnétiques qui reprennent finalement leur position initiale, on parle d'excursion magnétique. Actuellement, le pôle Nord géographique se trouve au pôle Sud géographique.

La Terre est donc assimilable à un dipôle magnétique. La Terre possède des lignes de champ magnétique la traversant et émises du Pôle Nord vers le pôle Sud. Les lignes de champ sont donc des représentations arbitraires du vecteur « champ magnétique » (cf figure 8). Sur Terre, la valeur du champ magnétique varie de 0.2G à 0.4G avec $1 G = 10^{-4} T$.

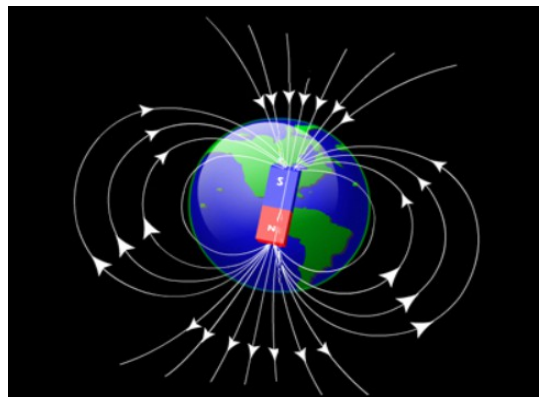


Figure 8: Représentation des lignes de champ magnétique terrestre

3.2.3. LES MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

3.2.3.1. LES MATÉRIAUX PARAMAGNÉTIQUES

Le magnétisme terrestre confère aux matériaux ferriques des propriétés ferromagnétiques. En effet, le magma, en se solidifiant, garde les propriétés magnétiques qu'il a acquis lors de ses mouvements dans le noyau. Cependant, lorsqu'il est en mouvement, les vecteurs d'aimantation du bloc (appelé domaine magnétique ou domaine de « Weiss ») se trouvent désorientés (cf figure 8). Le matériau est alors paramagnétique. En dessous d'une certaine température (la température de Curie), les matériaux paramagnétiques deviennent ferromagnétiques. Par exemple, le magma, en se solidifiant et sous l'action d'un champ magnétique extérieur \vec{B}_{ext} , s'aimante. Tous les vecteurs d'aimantation s'alignent dans le

même sens et la même direction (cf *figure 9 et 10*). Nous avons donc un aimant. Le moment magnétique résultant \vec{M}_{tot} définissant le sens et la direction de l'aimantation s'exprime sous la forme : $\vec{\Gamma}_L = \vec{M} \wedge \vec{B}$, $\vec{\Gamma}_L$ représentant le couple magnétique. Pour les matériaux paramagnétiques, $\vec{M}_{tot} \neq \vec{0}$.

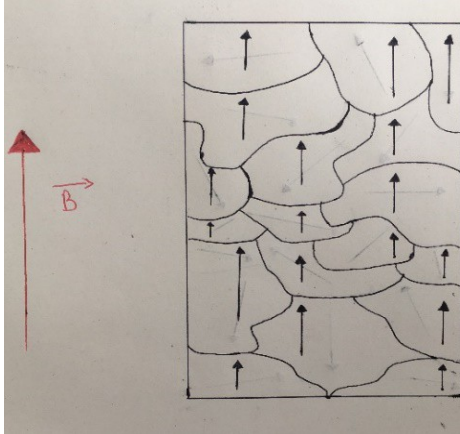


Figure 10: Champ des vecteurs orientés

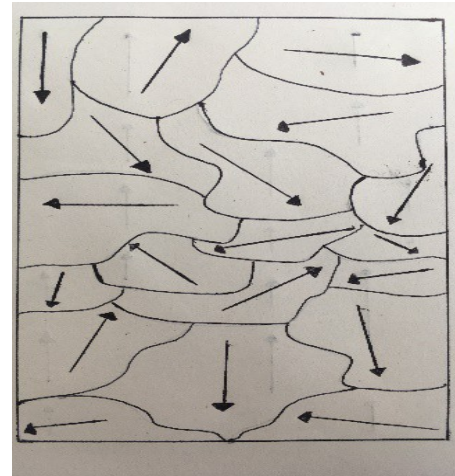


Figure 9: Champ des vecteurs désorientés

3.2.3.2. LES MATÉRIAUX DIAMAGNÉTIQUES

A l'inverse des matériaux paramagnétiques, les matériaux diamagnétiques ont un moment magnétique résultant nul ($\vec{M}_{tot} = \vec{0}$). Le diamagnétisme prend place à l'échelle microscopique. En effet, nous rencontrons cette propriété au niveau atomique et moléculaire. Nous pouvons le voir dans tous les gaz rares et dans la majorité des molécules, en particulier N_2 et H_2 .

Intéressons-nous alors aux électrons, ceux-ci ont tendance à vouloir se regrouper par paires. De plus, lorsqu'ils sont par paires, l'un a un moment magnétique et l'autre a l'opposé du moment magnétique du premier, d'où le moment magnétique résultant nul. Cependant, en présence d'un champ magnétique extérieur assez fort, le matériau va s'aimanter. Son moment magnétique se trouve donc opposé à la direction du champ extérieur ainsi le matériau se trouve donc repoussé et est donc diamagnétique.

3.2.3.3. L'EXPLOITATION DE CES RÉSULTATS

Dans la vie de tous les jours, les matériaux aimantés sont nombreux. Ceux-ci résultent de la solidification de roches magmatiques et sont majoritairement composés de fer. Ces aimants ont donc, comme dit précédemment, des champs de vecteurs orientés dans le sens du champ magnétique dominant, c'est-à-dire le champ magnétique terrestre. Cependant, si l'on approche de cet aimant un autre aimant suffisamment puissant, ceux-ci vont soit s'attirer soit se repousser. Pourquoi ? Parce que l'orientation des champs de vecteurs au sein d'une roche solidifiée n'est pas figée. Cette hypothèse peut être prouvée par une simple démonstration expérimentale.

Faisons l'expérience dite de la « limaille de fer ». Dans un premier temps disposons une poudre noire d'oxyde de fer sur une surface plane afin de former un cercle. Plaçons ensuite

un aimant traditionnel au centre de ce cercle. En patientant quelques secondes, nous allons voir la poudre bouger et s'orienter en fonction des lignes de champ \vec{B} créées par l'aimant (cf *figure 11*). Cette expérience montre d'une part que les champs des vecteurs au sein d'un élément ferromagnétique n'est pas figé et que, d'autre part, un aimant possède un pôle Nord

et un pôle Sud magnétiques. De plus, nous voyons bien sur notre figure la distinction des deux pôles et l'orientation de la poudre suivant les lignes de champ magnétique. En conclusion, les aimants se comportent magnétiquement comme la Terre. Ce sont des dipôles magnétiques. Notre expérience consistera donc en l'exploitation de ces propriétés magnétiques.

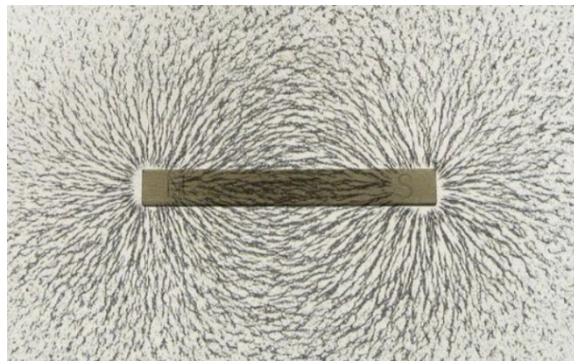


Figure 11: Expérience de la "limaille de fer"

3.3. LA RÉALISATION DU PROJET

3.3.1. L'INTERACTION ENTRE DEUX AIMANTS

On appelle l'interaction entre deux aimants interaction électromagnétique. Cette interaction va conférer une force aux aimants. Si les deux aimants ont le même pôle magnétique l'un en face de l'autre, ceux-ci vont se repousser. A l'inverse s'ils ont un pôle magnétique opposé, ils vont s'attirer. Ainsi, en mettant deux aimants l'un en face de l'autre et dont l'orientation est « Nord-Nord », les deux aimants vont se repousser. S'ils sont « Nord-Sud », ils vont s'attirer.

Nous pouvons considérer deux aimants comme deux particules chargées q_1 et q_2 . La force électromagnétique s'exerçant entre ces deux particules s'écrit donc :

$$\vec{F}_{1/2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{u}_{1/2}$$

avec :

ϵ_0 (permittivité dans le vide) = $8,854\ 187\ 82 \times 10^{-12}$ F m⁻¹

r_{12}^2 : Distance du centre de q_1 au centre de q_2 (m)

Cette formule est l'analogie de la formule de la gravitation universelle s'écrivant :

$$\vec{F}_{1/2} = -G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2} \vec{u}_{1/2}$$

G : Constante de gravitation universelle (USI)

r_{12}^2 : Distance du centre de m_1 au centre de m_2 (en m)

La force d'interaction électromagnétique peut donc être attractive ou répulsive alors que la force d'interaction gravitationnelle est toujours attractive. Notre projet consistera donc en la mise en évidence et l'utilisation des propriétés attractives et répulsives des aimants.

3.3.2. LE MICROSCOPE À FORCE MAGNÉTIQUE

Ce microscope, comme dit dans l'introduction, est une extension de l'AFM. Il est inventé quelques années après celui-ci, en 1987 par Y. Martin, H.K. Wikramasinghe et J.J.Saenz. A la différence de l'AFM, le MFM a une pointe sensible aux forces électromagnétiques. Notre but est donc de modéliser ce principe à l'échelle macroscopique.

Le MFM est une technologie permettant l'obtention d'informations à propos du domaine magnétique. En effet, la pointe, constituée majoritairement d'un alliage de Cobalt et de Chrome, est sensible aux matériaux magnétiques. De plus, l'avancée technologique, notamment avec le développement de films minces, a permis d'augmenter la capacité de stockage tout en réduisant la taille des mémoires.

Cependant, pour lire les données stockées, il a fallu que les lecteurs soient capables de lire ces données. Le MFM s'est donc présenté comme l'un des moyens les plus simples pour le décryptage de données mémorisées. L'exemple typique de l'utilisation du MFM est le disque dur. A l'intérieur de celui-ci, la pointe magnétique oscille en passant au-dessus de la surface. Chaque variation de surface engendre un signal binaire représentant les données stockées. L'analyse par MFM permet aussi l'obtention d'images d'assez bonne précision avec une résolution latérale de 10 à 100 nm.

3.3.3. LA MAQUETTE

3.3.3.1. LA CONCEPTION

Après avoir étudié le fonctionnement de l'AFM et du MFM, nous nous sommes penchés sur la création de notre propre de Microscope à Force Magnétique. Nous avons cherché des constituants macroscopiques permettant de reproduire presque à l'identique le principe de ce microscope.

Pour réaliser notre expérience, nous allons faire passer une série d'aimants sous une pointe elle-même constituée d'aimants et formant une colonne. La pointe est fixée à un réglet pouvant osciller, lui-même relié à un support fixe. Au bout du réglet est fixé un petit miroir sur lequel est réfléchi un rayon laser. Celui-ci est envoyé sur une feuille de papier millimétré. Lorsque les aimants font face à la pointe, en fonction de leur orientation, le réglet va osciller faisant changer d'orientation le rayon laser réfléchi sur la feuille. Par exemple, si la pointe est attirée par l'aimant passant en dessous d'elle, le réglet va se courber vers le sol et le rayon laser va descendre sur la feuille. A l'inverse, si la pointe est repoussée par l'aimant, le réglet va se courber vers le ciel déviant le rayon laser vers le haut de la feuille. Il faut noter qu'entre le passage de chaque aimant, le réglet va tendre à reprendre sa position initiale étant donné qu'il ne sera plus soumis aux forces que les aimants exercent sur lui.

Pour modéliser notre pointe nous allons donc utiliser une série d'aimants « Néodyme ». Qu'est-ce qu'un aimant en néodyme ? Il s'agit en fait d'un alliage de néodyme, de la série des lanthanides et de numéro atomique $Z=60$, de fer et de bore. La formule générale de cet alliage est donc NdFeB et a une structure cristalline tétragonale. Ensuite, nous allons faire passer une série d'aimants orientés « SUD-NORD », « SUD-SUD » ou « NORD-NORD ».

Pour donner une petite touche de créativité à notre projet, nous allons installer des aimants sur des morceaux de polystyrènes eux-mêmes installés sur des wagons de train électrique. A chaque passage du train électrique, nous allons donc observer sur la feuille de papier millimétré des oscillations. A l'aide d'une caméra nous allons filmer ces oscillations et analyser les positions du laser grâce à LatisPro. Voici la maquette que nous avons mis au point (figure 12):

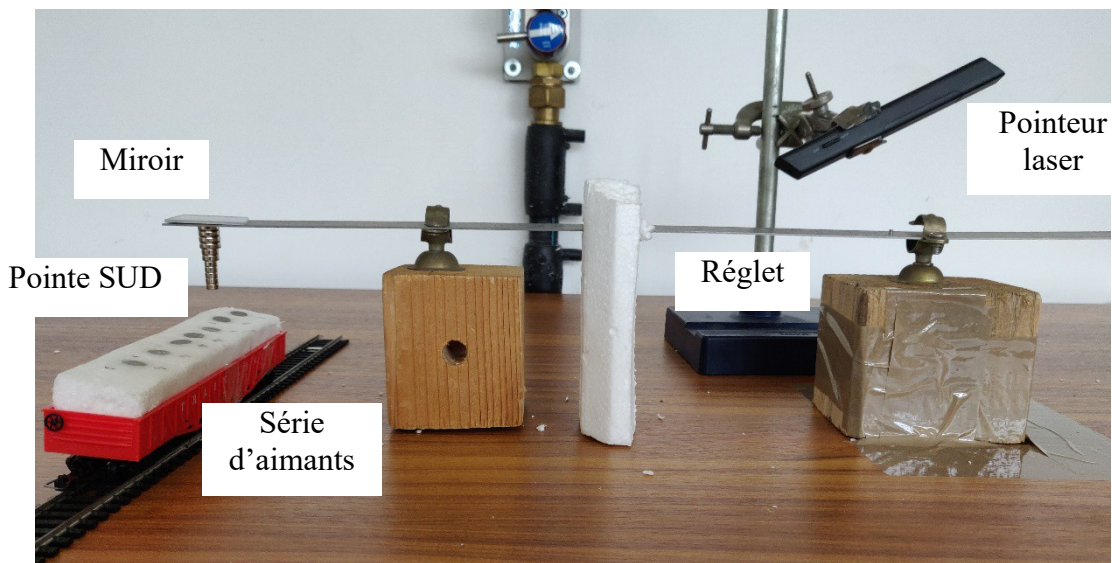


Figure 12: Notre MFM à l'échelle macroscopique

3.3.3.2. LA DESCRIPTION

Les forces : A l'échelle nanométrique, les forces de Van Der Waals permettent la cohésion des atomes, des molécules ou des cristaux. Dans notre cas, celles-ci sont fortement négligées. Les forces magnétiques sont prédominantes. Nous souhaitons donc les mettre en évidence avec notre maquette.

La pointe : Celle-ci doit être magnétique, afin d'interagir avec le profil magnétique de l'échantillon. Nous avons donc décidé de superposer plusieurs aimants de taille variable.

Le laser : Nous disposons d'un pointeur laser rouge fixé à une potence et positionné afin qu'il frappe le levier en son extrémité et auquel nous avons placé un petit miroir permettant la réflexion du laser.

Le réglet : Il doit être à la fois suffisamment sans pour autant avoir de fortes amplitudes d'oscillations afin de ne pas influencer nos mesures. Nous avons décidé de choisir un réglet métallique d'environ 30cm. Il est positionné sur deux poutres en bois et accroché par 2 attaches. Afin que la pointe oscille correctement sans pour autant entrer en contact avec l'échantillon, nous avons placé cette dernière à 11cm de la première poutre. Nous avons observé que les oscillations de la pointe étaient parfois trop élevées, dues aux fortes interactions avec les échantillons. Pour limiter ses oscillations, nous avons placé un morceau de polystyrène à proximité de l'attache numéro 1.

Le récepteur : Afin d'observer les variations d'amplitude de la pointe, il nous fallait un récepteur sur lequel nous pouvions les observer. Ne disposant pas de récepteur optique à proprement parlé, nous avons opté pour une feuille de papier millimétrée accrochée au mur et séparée d'une distance de 1m20 avec le pointeur laser.

Les aimants : Notre choix s'est porté sur des aimants en Néodyme Fer/Bore de plusieurs tailles. Leur taille varie de 4 mm de diamètre à 8 mm de diamètre. Dans le cadre de notre projet, il est intéressant d'utiliser différents échantillons afin d'obtenir de multiples résultats et ainsi de les comparer entre eux.

Nous avons placé ses échantillons dans un bloc de polystyrène (support non magnétique pour ne pas fausser les résultats), maintenus par du scotch, pour empêcher que la pointe n'attire nos échantillons. Les aimants sont placés tous les 1cm dans le polystyrène pour limiter les interactions inter-aimant.

3.4. LES EXPÉRIENCES RÉALISÉES

3.4.1. L'INTERACTION POINTE-ÉCHANTILLON SANS CONTACT

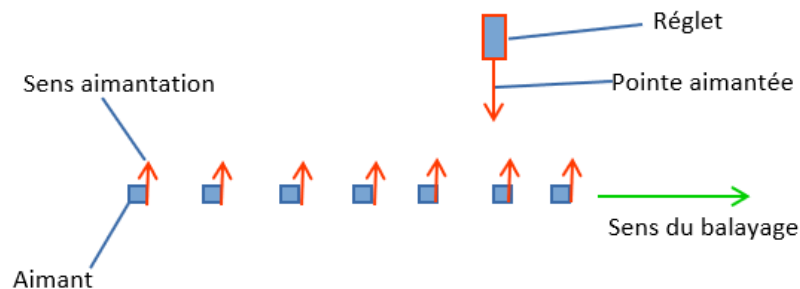


Figure 13: Schéma d'un train d'aimants « NORD »

Nous avons décidé d'orienter notre pointe dans le sens pôle « SUD » par rapport aux pôles des aimants. 5 expériences différentes ont été réalisées au total. Nous nous sommes attelés premièrement sur l'étude de l'interaction entre un pôle « SUD » (la pointe) et un pôle inconnu (les aimants), de sorte qu'il y ait attraction ou répulsion entre la pointe et nos échantillons. Nous avons disposé 7 aimants-échantillons le long de la plaque de polystyrène. Ils ont été placés à égale distance les uns des autres et la distance entre la pointe et les aimants échantillons est constante. Sur le schéma ci-dessus (figure 13), nous pouvons voir que la pointe est attirée par les aimants.

Ayant pris une pointe « SUD », nous pouvons en déduire que les aimants sont orientés « NORD ». Nous avons enregistré nos mesures à l'aide de téléphones portables. Les séquences vidéo ont ensuite été importé sur *LatisPro*®. Chaque position du laser a été relevé, image par image, pour obtenir le tracé du déplacement du pointeur laser dû aux interactions entre la pointe et les aimants. A partir de ce tracé, il est possible d'obtenir une courbe montrant l'évolution des interactions magnétiques qui ont lieu. Dans notre cas, voici le résultat obtenu (figure 14) :



Figure 14: Courbe obtenue au passage d'un train de wagons "NORD"

Le graphe obtenu est donc la déviation du faisceau laser se reflétant sur la feuille de papier millimétrée collée sur le mur. Nous pouvons remarquer à partir de ce graphique que le faisceau laser est bien dévié vers le bas, signe de l'attraction entre la pointe et les échantillons. Nous devrions observer une similitude entre l'interaction pointe-aimant pour chaque échantillon, mais ce n'est pas toujours le cas. Il y a une interaction plus importante avec certains aimants.

En effet, nous avons remarqué que certains aimants s'échappaient de leur support pour se joindre à l'aimant voisin, ce qui témoigne une différence de force d'interaction entre les aimants proposés sur le marché. De plus, nous avons dit que les aimants étaient tous disposés à égale distance les uns des autres et à égale distance de la pointe. Nous avons fait de notre mieux mais la disposition ne peut être parfaite manuellement.

Ces facteurs modifient donc l'interaction pointe-aimants, d'où le phénomène observé sur le graphique. Il est donc très important de maintenir cette distance **constante** afin d'obtenir des résultats précis que l'on pourra par la suite comparer entre eux. Il en va de même pour le véritable MFM ou AFM, la distance d'étude est maintenue constante par un système piézo-électrique. Les points les plus haut représentent le passage de la pointe entre deux aimants, lorsque le régllet tend à reprendre sa position initiale. Il faut néanmoins tenir compte des vibrations et du bruit qui nuisent à la propreté du graphique.

3.4.2. LES INTERACTIONS PAR DIFFÉRENTS TYPES D'AIMANTATION

Cette section visera à reprendre le même mode opératoire mais en changeant les pôles des aimants ou en mettant deux aimants de même pôle face à face par exemple.

3.4.2.1. LA RÉPULSION

Ayant une pointe orientée « SUD », nous avons donc dû prendre des aimants tous orientés « SUD ». Le schéma est donc le même que pour la figure 2 mise à part que les flèches au niveau de la pointe et les aimants se trouvent dans un sens opposé mais toujours dans la même direction (la variation de hauteur est portée par l'axe \vec{y}). Voici donc le graphique obtenu (figure 15) :



Figure 15: Courbe obtenu au passage d'un train d'aimants "SUD"

Nous pouvons remarquer que le faisceau laser est bien dévié vers le haut car le graphique montre deux pics au passage des aimants. La **répulsion** entre deux aimants de même pôle est donc mise en avant grâce à cette expérience. Les points les plus bas, ici, représentent le passage entre deux aimants, où le régle tend à reprendre sa position initiale.

3.4.2.2. L'ATTRACTION-RÉPULSION

Ici, nous avons dû alterner les aimants « NORD » et « SUD » pour pouvoir observer l'attraction et la répulsion. Voici le graphique obtenu (*figure 15*) :

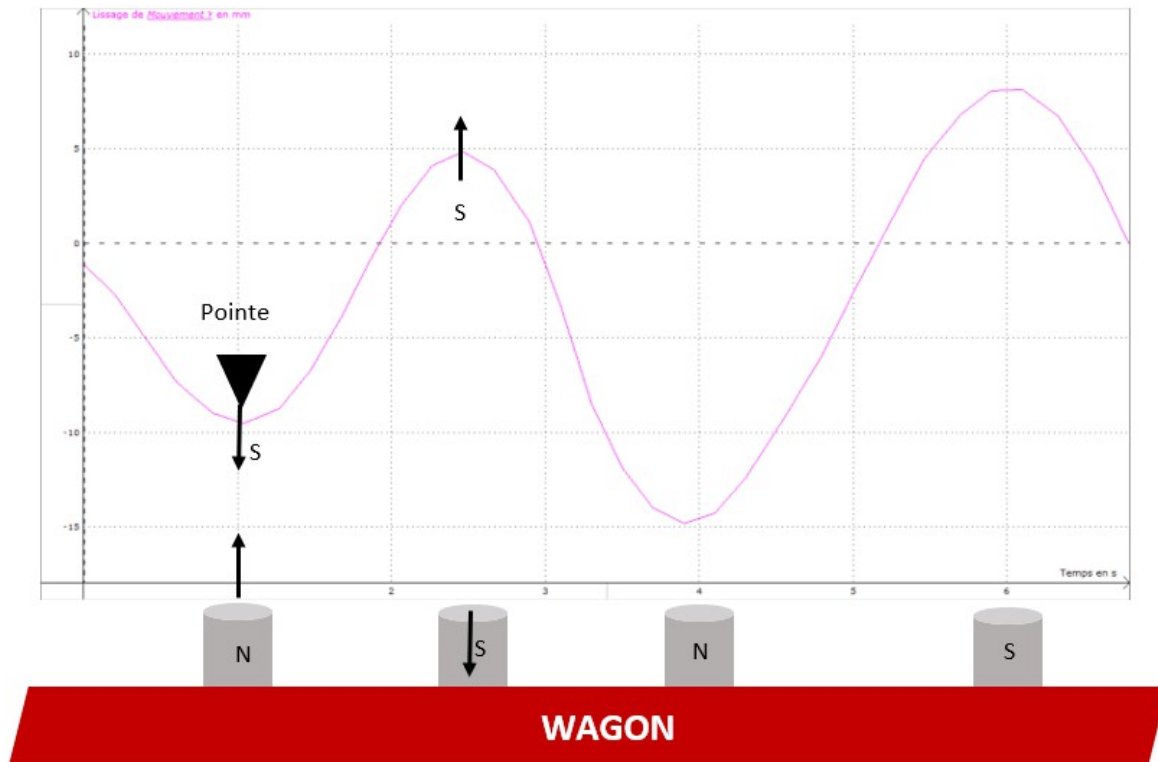


Figure 15: Graphique attraction-répulsion

Cette courbe a donc la même allure que les deux précédentes. Cependant, nous pouvons voir ici que l'amplitude de la courbe est plus élevée. De plus, ici, les points les plus bas ou les plus haut ne représentent plus le passage entre deux aimants mais le passage sur un aimant « NORD » ou « SUD ». Le passage entre deux aimants est symbolisé ici, par l'intersection de la courbe avec l'axe des abscisses.

3.4.2.3. INTERACTION « DOUBLE-AIMANT »

Nous souhaitons mettre en avant l'importance des lignes de champ d'un aimant qui jouent un rôle déterminant dans le caractère magnétique de celui-ci.

Pour cette quatrième expérience, nous avons décidé de changer la configuration de nos aimants-échantillons. Nous avons pris des aimants de taille 5cm x 3cm x 2cm que nous avons placés face à face, de sorte qu'il y ait toujours une répulsion (« NORD » face « NORD », cf figure ...). Ils ont été séparés par une plaque de polystyrène. On balaye ensuite l'ensemble pour observer les interactions magnétiques. Le schéma ci-dessous vous aide à mieux comprendre la configuration choisie (*figure 16*) :

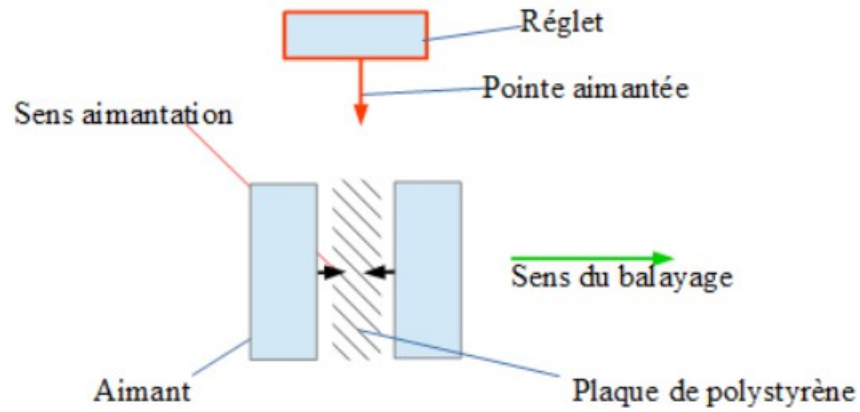


Figure 16: Schéma de la configuration "double-aimant"

Nous obtenons donc cette courbe (figure 17) :

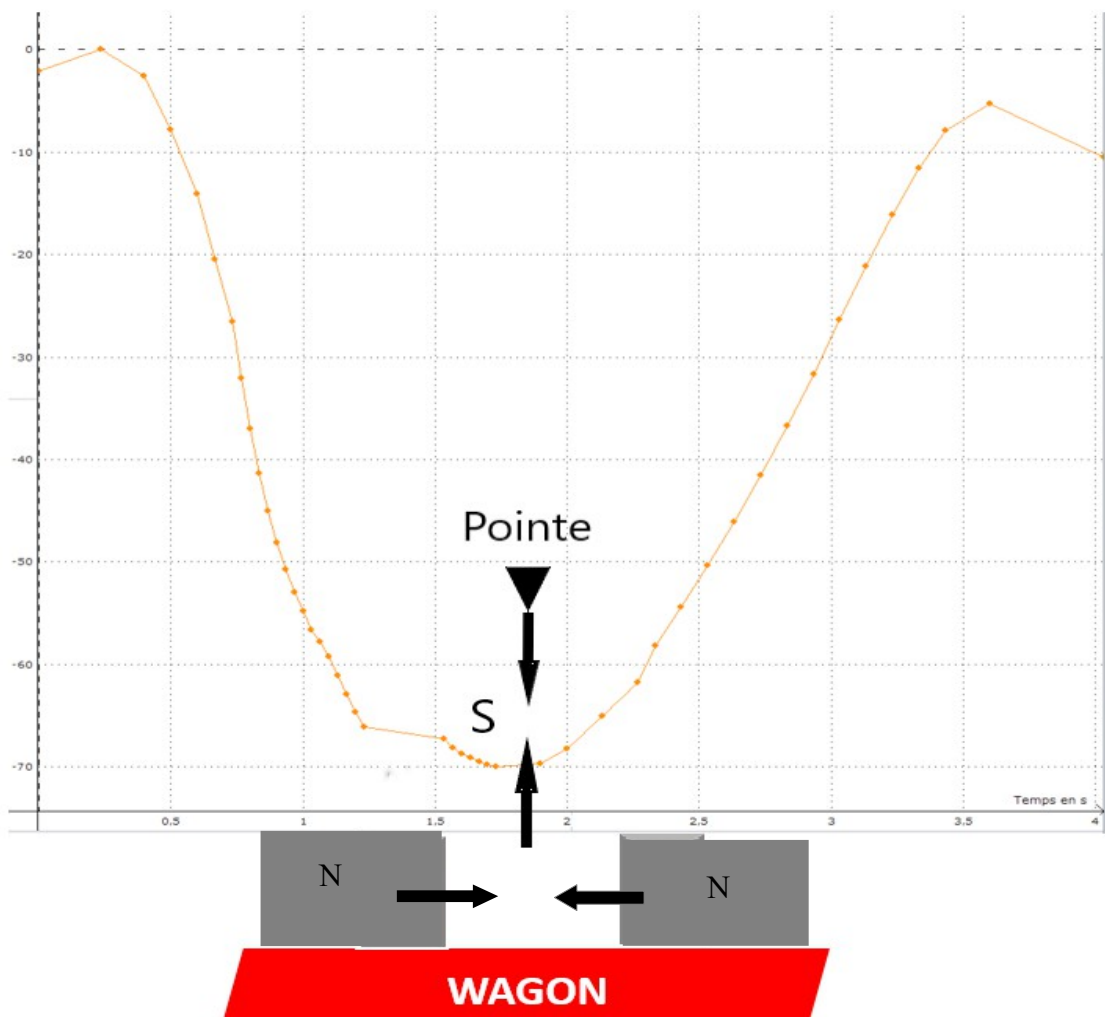


Figure 17: Courbe de l'interaction "double-aimant NORD"

Les aimants étant disposés en répulsion « NORD », nous observons donc un champ qui diverge depuis les deux aimants vers la pointe. Comme la pointe est orientée « SUD », les lignes de champ qui divergent des aimants sont dans le même sens que celles de la pointe. Concrètement la pointe va être attirée avec une forte intensité vers les aimants. Le schéma ci-dessous (*figure 18*) représente les lignes de champ émises par les deux aimants, le champ est répulsif entre eux. Cependant le champ entre la pointe et les aimants est à caractère attractif.

Observant une interaction beaucoup plus forte que sur les graphes entre la pointe et les échantillons, nous pouvons en déduire que le champ généré entre les aimants et notre pointe est beaucoup plus fort. Ceci s'explique grâce aux lignes de champ. Celles-ci s'entrecroisent (*cf figure 19*) et sont orientées dans le même sens, cela créer un champ attractif. La pointe va donc être attirée vers le bas, ce que nous observons bien avec le graphe. Le champ généré (ici positif) aura tendance à être particulièrement attractif avec les éléments magnétiques « SUD » (négatif), ce que nous voulions observer avec cette expérience. Au final, cette manipulation nous permet de compléter notre étude des lignes de champs produites par un aimant grâce à notre maquette de MFM.

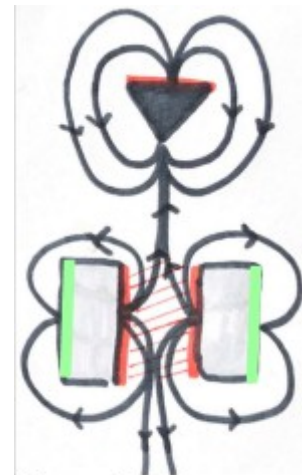


Figure 18: Lignes de champ avec "double aimant NORD"

Nous avons réalisé une dernière expérience dans le même type que la précédente sauf que les aimants sont placés en répulsion « SUD ». Leur pôle Nord est donc la face qui n'est pas collée à la plaque de polystyrène. La configuration était donc la même que la configuration précédente mais avec des aimants retournés. Nous obtenons donc la courbe suivante (*figure 19*) :

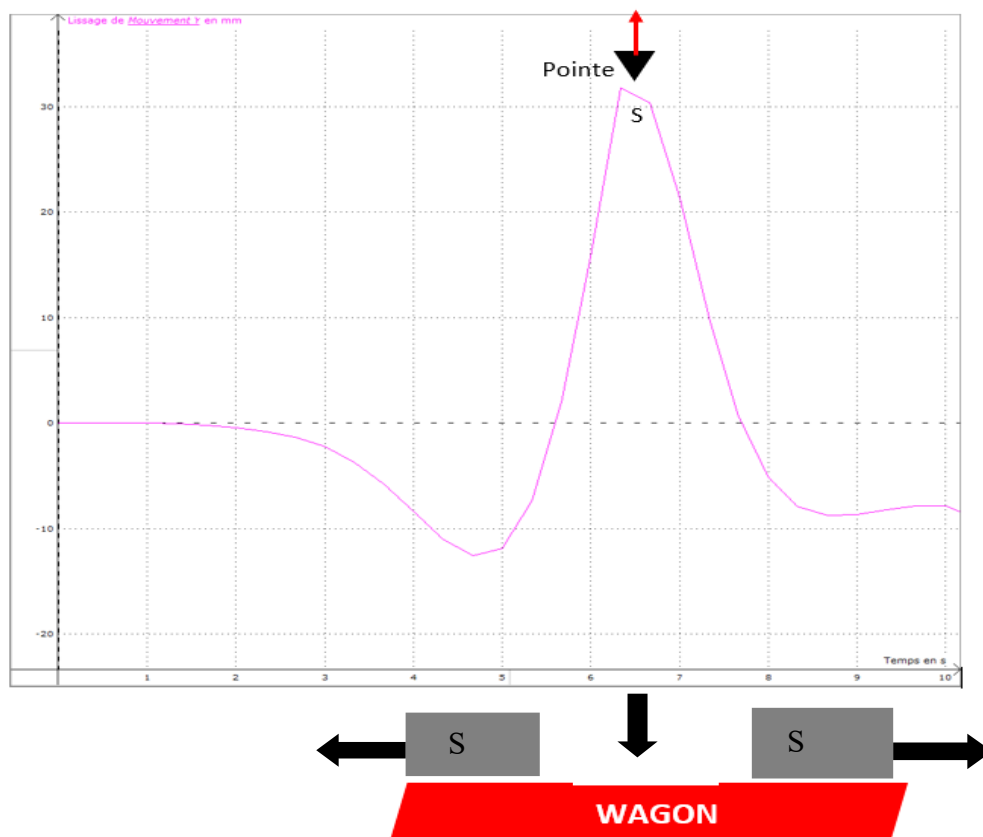


Figure 19: Courbe d'interactions "double-aimant SUD"

Le pic symbolisant la déviation du pointeur laser vers le haut démontre qu'il y a une interaction répulsive entre les deux aimants et la pointe. La pointe est donc repoussée vers le haut, synonyme d'un champ électromagnétique résultant répulsif avec une grande intensité.

On observe également qu'aux abords de notre échantillon, une légère attirance avec la pointe se crée. En effet, en s'aidant du schéma des lignes de champ (cf figure 20), on constate que les lignes qui quittent le pôle Nord de notre échantillon se retrouvent être dans le même sens que celles générées par la pointe, d'où l'effet d'attraction.

Finalement, après avoir effectué cette série d'expériences, nous nous sommes aperçus que la disposition des aimants-échantillons joue un rôle déterminant dans l'interaction avec la pointe. Le champ magnétique résultant est beaucoup plus élevé avec des aimants placés face à face. Il est également important de conserver la distance pointe-échantillon constante pour constater qu'avec des échantillons similaires, l'interaction est égale. Augmenter ou diminuer cette distance représente une variation de l'intensité électromagnétique ce qui est à la base du MFM. Plus la déviation du pointeur laser est importante, plus l'interaction est forte, ce qui après traitement, permettra d'obtenir une topographie magnétique exacte de l'échantillon. L'étude magnétique des champ créés par les aimants nous a permis de mieux comprendre les phénomènes qui se produisent.

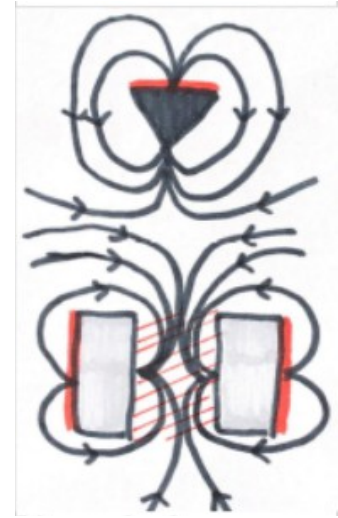


Figure 20: Lignes de champ avec "double-aimant SUD"

Il aurait été intéressant d'étudier d'autres échantillons que des aimants, comme par exemple du bois, un aimant de réfrigérateur, un métal non magnétique à priori mais qui peut le devenir si nous approchons un aimant à proximité. Cela nous aurait permis de déterminer si un échantillon a des propriétés magnétiques ou non, et d'en dessiner sa topographie, ce que fait concrètement un Microscope à Force Magnétique.

4. CONCLUSIONS / PERSPECTIVES

En conclusion, ce projet, grâce à son aspect théorique nous a permis de revoir les notions acquises en électromagnétisme comme les lignes du champ magnétiques, les dipôles magnétiques que sont les aimants ainsi que les interactions entre plusieurs d'entre eux. Grâce à son aspect pratique, ce projet nous a aussi permis d'avoir une vision macroscopique à propos de phénomènes microscopiques en réalisant notre propre Microscope à Force Magnétique et en réalisant plusieurs expériences afin de mettre en évidence les lignes du champ électromagnétique.

De plus, ce projet nous a permis d'avoir une vision un peu plus claire sur le métier d'ingénieur. En effet, le travail en équipe avec des étudiants que nous ne connaissions pas réellement, la prise d'initiatives et de risques ainsi que le respect des délais étaient nécessaires afin de mener à terme notre projet.

Pour aller plus loin, nous aurions pu étendre notre étude aux autres modes de fonctionnement du Microscope à Force Magnétique comme le mode « tapping » et le mode « contact » mais ces modes étaient plus difficiles à mettre en place avec le matériel utilisé et le temps disponible.

5. BIBLIOGRAPHIE

Figure 2 : https://trigenotoul.com/ressources/electronique_super_resolue/afm/

Figure 3 : https://fr.wikipedia.org/wiki/Microscope_%C3%A0_force_atomique

Figure 4 : https://fr.wikipedia.org/wiki/Microscope_%C3%A0_force_atomique

Figure 5 : <http://d0d1.blog.lemonde.fr/2012/04/16/notions-de-stockage-informatique/>

Figure 6 : http://www.phy6.org/earthmag/dynamos2_fr.html

Figure 7 : <http://www.astrosurf.com/luxorion/terre-champ-magnetique.htm>

Figure 10 : <http://magmagnetismetpe2017.e-monsite.com/pages/le-magnetisme-comment-ca-marche.html>

Nous avons utilisé les mêmes sources que les sources des images pour la rédaction des différentes parties du projet.

Les figures non citées ici ne nécessitent pas de référence bibliographique puisqu'elles sont le fruit de notre propre coup de crayon.
