

# Expériences avec un smartphone autour du magnétisme en relation avec la tectonique des plaques

PAR...

R. Mathevet<sup>1,2\*</sup>,  
L. Martin<sup>1</sup>, P.  
Ferrand, Ch. Fa-  
bre<sup>1</sup>, N. Lamra-  
ni<sup>1</sup>, J. P. Castro<sup>1</sup>  
et P. Marchou<sup>1</sup>

## Introduction

La compréhension du magnétisme est difficile et son étude, qui a pratiquement disparu des programmes de physique de collège et de lycée, ne commence qu'au niveau post bac. Le magnétisme peut toutefois être abordé de façon plus ou moins qualitative dans le secondaire et l'utilisation du smartphone est toute indiquée pour se familiariser avec.

Après quelques rappels théoriques sur le magnétisme et la tectonique des plaques nous décrivons deux activités expérimentales utilisant le smartphone. La première, relativement qualitative et probablement plus adaptée au niveau collège, permet de visualiser les lignes de champ magnétique. La seconde, multi/trans disciplinaire, se rapproche des méthodes utilisées dans l'étude du paléomagnétisme. Elle est bien adaptée à l'enseignement de spécialité SVT de première mais aussi aux niveaux post-bacs si l'on veut développer des aspects plus quantitatifs.

## I. Quelques éléments théoriques

### 1. Aspects physiques

Le but ici n'est pas de développer systématiquement la théorie du magnétisme qui est assez délicate. On a pu en effet démontrer dès le début

*Les smartphones intègrent aujourd'hui de nombreux capteurs permettant d'aborder sous une forme attractive de nombreux aspects des programmes scolaires. Nous proposons ici une approche du magnétisme en liaison avec le rôle majeur qu'il a joué dans l'établissement de la théorie de la tectonique des plaques.*

XX<sup>e</sup> siècle qu'il n'y a pas de modèle classique du magnétisme [1] : le magnétisme est un phénomène quantique par essence, il nous faut l'appréhender de façon pragmatique.

#### a) Aspects macroscopiques

Les interactions entre « pierres d'aimant » sont connues depuis l'Antiquité et ont été mises à profit dans la réalisation de boussoles en Chine, dès le moyen âge. De ces usages, on peut dégager deux caractéristiques du magnétisme.

Premièrement, les échantillons magnétiques présentent deux pôles (notés N et S pour Nord et Sud) que l'on ne peut séparer : si on brise un aimant en deux on obtient deux aimants présentant chacun un pôle N et un pôle S. En première approximation, un aimant est un dipôle (deux pôles) magnétique.

Les pôles de même nature se repoussent tandis que ceux de natures opposées s'attirent. Les aimants sont des sources de champ magnétique, noté  $\mathbf{B}$ , dont les lignes de champ sont fermées, ne se croisent jamais et sortent par le pôle nord pour rentrer par le pôle sud (voir Fig. 1).

<sup>1</sup> Groupe recherche-formation « Smartphone Instrument de Mesure », Institut de Recherche sur l'Enseignement des Sciences de Toulouse : <https://ires.univ-tlse3.fr/sim/>  
<sup>2</sup> Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses, LNCMI-CNRS, UGA, UPS, INSA, EMFL, 31400 Toulouse et 38042 Grenoble, France  
\* renaud.mathevet@cnrs.lncmi.com

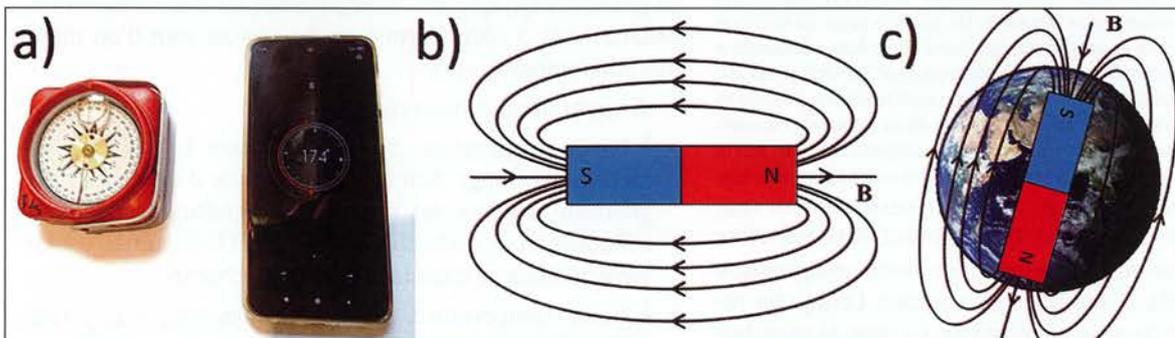


Figure 1 : a) Boussole traditionnelle de géologue et App de smartphone - b) Lignes du champ magnétique B généré par un aimant - c) Ligne de champ magnétique terrestre (On notera que le pôle Nord géographique est un pôle Sud magnétique.)

**Mots-clés :** tectonique des plaques, magnétisme, activité expérimentale...

4 Selon la convention typographique moderne, les lettres grasses désignent des vecteurs. Le symbole surmonté d'une flèche tend à disparaître. En toute rigueur,  $\mathbf{B}$  désigne le champ d'induction magnétique (voir par exemple la page wikipédia « champ magnétique »).

Deuxièmement, les dipôles magnétiques tendent à s'aligner sur le champ magnétique c'est-à-dire qu'ils subissent un couple de forces qui les met en rotation<sup>5</sup> (principe de la boussole).

Les aimants naturels sont restés les seules sources de champ magnétique jusqu'à la découverte d'Ørsted en 1820 : une boussole placée à proximité d'un fil parcouru par un courant électrique est déviée. Il y a donc un lien profond entre électricité et magnétisme qui sera totalement élucidé par Maxwell en 1865.

L'expérience est très facile à faire : on dispose en série un générateur (10V / 5A par exemple) qu'on limite à 5 A environ, un ampèremètre (pour vérifier que le courant circule) et on ferme le circuit par un fil tendu entre deux potences à 50 cm au-dessus de la paillasse afin de pouvoir mesurer le champ magnétique tout autour du fil. On constate la symétrie contre intuitive du champ magnétique (Fig. 2a et 2b) : le champ magnétique n'est pas parallèle au fil et au courant électrique, les lignes de champ s'enroulent autour des lignes de courant.

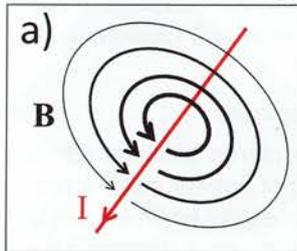


Figure 2 : a) Lignes du champ magnétique B généré par un courant I

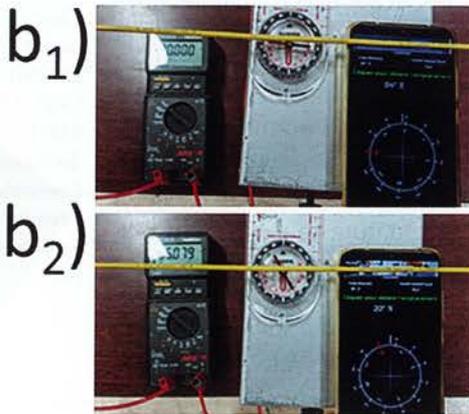


Figure 2 : b) Expérience d'Ørsted : un fil électrique (jaune) est aligné dans la direction du champ magnétique terrestre. On dispose juste au-dessus une boussole traditionnelle et un smartphone muni d'une App « boussole » (le capteur de champ magnétique est en haut à gauche). Le circuit est alimenté par un générateur de courant continu (non visible sur les photos) et contient un ampèremètre qui permet de s'assurer de la valeur du courant. b1) le courant dans le fil est nul, les boussoles sont alignées sur le fil. b2) le fil est parcouru par un courant d'intensité ~ 5A, les boussoles sont déviées.

Pour qu'un courant circule, il faut nécessairement que le circuit électrique soit fermé. Globalement, il se présente sous la forme d'une boucle fermée : un dipôle magnétique est donc assimilable à une spire de courant. Lorsqu'on regarde la spire de face, si le courant circule dans le sens horaire on est face à un pôle Sud et bien sûr, un pôle Nord si le

courant circule dans le sens inverse. Le champ magnétique engendré par un dipôle magnétique est caractérisé par son moment dipolaire noté  $\mu$ , orienté de S à N. Pour une spire de courant, sa norme est le produit de l'intensité du courant par la surface de la spire.

Pour augmenter le champ produit, on peut multiplier le nombre de spires pour former un solénoïde (Fig. 2c).

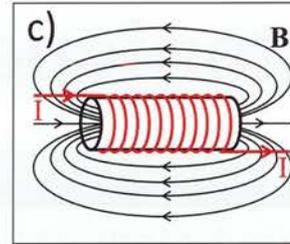


Figure 2 : c) Champ magnétique généré par un solénoïde

Au passage, cette configuration permet de mieux comprendre l'expérience de l'aimant brisé : si l'on partage un solénoïde en deux on obtient deux solénoïdes plus courts mais qui ont le même sens d'enroulement que le solénoïde initial. Soulignons enfin que la possibilité d'engendrer des champs magnétiques à l'aide de bobinages est à l'origine de toute l'industrie des moteurs électriques de la fin du XIX<sup>e</sup> jusqu'à nos jours.

### b) Aspects microscopiques

La spire de courant permet de comprendre l'origine microscopique du magnétisme. Dans un modèle classique de l'atome, les électrons, chargés négativement, se déplacent autour du noyau positif. Ils forment ainsi de minuscules boucles de courant qui se comportent comme de minuscules dipôles interagissant plus ou moins fortement les uns avec les autres.

Le ferromagnétisme<sup>6</sup> est ainsi un phénomène complexe dans lequel le couplage entre atomes tend à aligner les dipôles atomiques et accroître l'aimantation tandis que l'agitation thermique tend à les désorienter en tous sens et donc réduire l'aimantation. Dans les corps ferromagnétiques, ce couplage entre atomes voisins est dit *interaction d'échange*<sup>7</sup>. On notera  $E_{ech}$  l'énergie associée qui dépend fortement du matériau considéré. Par ailleurs, la température absolue, notée  $T$  et exprimée en Kelvin, est une mesure quantitative de l'agitation thermique. Plus exactement,  $E_{th} = k_B T$  est l'ordre de grandeur typique de l'énergie associée aux mouvements désordonnés à l'échelle microscopique au sein d'un matériau à la température  $T$ <sup>8</sup>.

Il apparait alors deux régimes.

- À basse température, plus précisément  $E_{th} < E_{ech}$ , l'interaction d'échange domine. En présence d'un champ magnétique externe, les moments magnétiques s'alignent collectivement sur le champ imposé et le matériau est fortement aimanté dans la direction du champ<sup>9</sup>.
- À haute température, plus précisément  $E_{th} > E_{ech}$ , l'agitation thermique domine et les moments magnétiques

<sup>5</sup> Contrairement aux charges électriques que l'on peut isoler et qui subissent des forces qui les mettent en translation.

<sup>6</sup> Nous écartons ici le diamagnétisme et le paramagnétisme qui sont des formes beaucoup plus faibles de magnétisme qui ne sont pas pertinentes dans le contexte de cet article.

<sup>7</sup> Cette interaction, d'origine purement quantique, est liée au principe d'exclusion de Pauli qui traduit le fait que les électrons sont des fermions, particules qui ne peuvent se trouver dans le même état.

<sup>8</sup>  $k_B$  est la constante de Boltzmann et vaut approximativement  $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K.

<sup>9</sup> C'est l'aimantation des aimants permanents, ce que l'on appelle l'aimantation rémanente i. e. celle qui reste après application du champ externe.

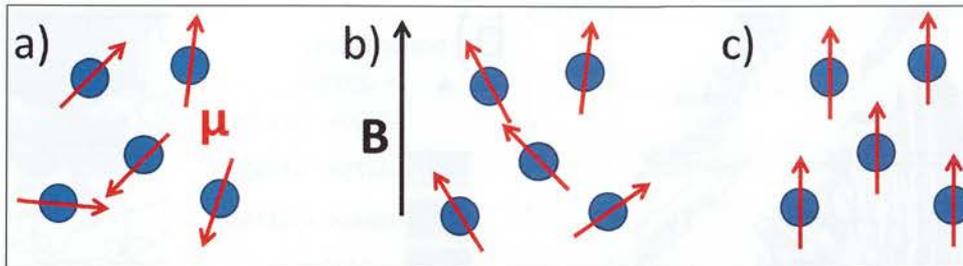


Figure 3 : Paramagnétisme : a) sans champ magnétique, les dipôles pointent dans toutes les directions. b) en présence de champ magnétique, les dipôles tendent à s'aligner légèrement sur le champ. Ferromagnétisme : c) en dessous de la température de Curie, l'échantillon est fortement aimanté même en l'absence de champ extérieur.

prennent des orientations aléatoires. Le matériau perd son aimantation permanente et devient très faiblement magnétique (paramagnétique), une légère aimantation subsistant dans la direction d'un champ magnétique extérieur.

La transition entre les deux régimes est brutale car l'effet présente une boucle de rétroaction : si les moments s'alignent le champ produit augmente le champ externe ce qui renforce la tendance à l'alignement etc.

En pratique, il est peu commode expérimentalement de raisonner sur les énergies. On introduit alors la température de Curie  $T_c$ , température à laquelle l'énergie d'agitation thermique est égale à l'énergie d'interaction :  $k_B T_c = E_{in}$ . Les deux régimes ferromagnétique ou paramagnétique correspondent ainsi à  $T < T_c$  et  $T > T_c$  (Fig. 3).

C'est cette transition de phase, dite souvent *ferro/para*, qui est mise à profit dans l'étude du paléomagnétisme qui nous intéressera par la suite. Les roches en fusion, émises par les dorsales océaniques, contiennent des impuretés ferromagnétiques. Au moment de l'émission, leur température est au-dessus des températures de Curie des différents minéraux qui les composent : les roches sont paramagnétiques. En refroidissant, ces différents matériaux passent en dessous de leur température de Curie et entrent tour à tour dans leur phase ferromagnétique. Leur aimantation s'aligne sur le champ magnétique ambiant et devient permanente<sup>10</sup>. On dit souvent qu'ils enregistrent le champ magnétique au lieu et à la date de leur émission. On pourra consulter [3] pour des compléments un peu plus quantitatifs.

## 2. Aspects géologiques

De nos jours, les données radar et satellitaires quantifient les mouvements horizontaux et verticaux de notre planète avec des vitesses relatives de l'ordre du millimètre à quelques centimètres par an. Ils sont imperceptibles à l'échelle humaine de sorte que la géographie physique (montagnes-océans) a été perçue jusqu'à une date relativement récente comme immuable.

Toutefois, les naturalistes et les géologues ont longuement accumulé de nombreux indices témoignant d'un âge de la Terre très au-delà des quelques milliers d'années du récit biblique : des fossiles manifestement marins retrouvés jusqu'au sommet des montagnes, la concordance étrange des côtes de l'Afrique et de l'Amérique du sud, les expérimentations de Buffon vers la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle sur le refroidissement de boulets. Tout indiquait que l'origine de la Terre

se chiffrait en millions voire milliards d'années. Dès lors, une vitesse aussi petite qu'un millimètre par an devient considérable puisque à l'échelle du milliard d'années, cela représente des milliers de kilomètres soit la taille d'un océan. Ainsi, si une théorie fixiste de la Terre a longtemps prévalu, au début du XX<sup>e</sup> siècle, Alfred Wegener proposa une première théorie dynamique de la Terre avec la dérive des continents.

Les idées ont continué à évoluer, notamment grâce à Arthur Holmes (théorie du « double tapis roulant ») repris par Harry Hammond Hess en 1960 avec l'hypothèse de l'expansion océanique. Même si la convection mantellique interne à la Terre était admise à cette époque comme moteur de l'expansion océanique, il est remarquable que l'origine du magnétisme terrestre reste encore aujourd'hui mal comprise. La théorie communément acceptée est celle de la dynamo terrestre et des indices expérimentaux récents s'accumulent en sa faveur [2]. Comme en témoignent les éruptions volcaniques et les données sismologiques, la radioactivité naturelle de la Terre entretient un manteau partiellement fluide siège de courants de convection. Dès lors, nous avons un milieu partiellement conducteur animé de mouvements à grande échelle qui se couplent au mouvement de rotation de la Terre sur elle-même et génèrent un champ magnétique qui lui-même rétroagit sur le fluide en mouvement. C'est un système fortement non-linéaire à la dynamique complexe : le pôle Sud de l'aimant terrestre se trouve actuellement au nord du Canada et se déplace vers la Sibérie à la vitesse de quelques kilomètres par an mais il a historiquement basculé erratiquement, sur des échelles de l'ordre du million d'années, d'un hémisphère à l'autre.

Au tournant des années 1960, au moment où les idées mobilistes vacillent, c'est l'étude du magnétisme des basaltes de part et d'autre des dorsales océaniques qui permettra de valider la théorie visionnaire de Wegener un demi-siècle plus tôt. Les océanographes Ronald G. Mason et Arthur D. Raff ont, les premiers, caractérisé des basaltes en bandes d'anomalies magnétiques parallèles et symétriques par rapport à l'axe des dorsales océaniques (Fig. 4a). Une anomalie magnétique est dite positive si le champ magnétique des roches est parallèle au champ magnétique terrestre actuel. Elle est dite négative dans le cas contraire.

L'interprétation de ces bandes a été proposée en 1963 par Frederick Vine et Drummond Matthews. Ils ont combiné extension des fonds marins et inversions du champ magnétique terrestre. En étudiant un secteur détaillé de part et d'autre de la dorsale de Carlsberg dans l'océan Indien, ils

<sup>10</sup> Le champ magnétique terrestre est relativement faible et ne peut modifier seul par la suite l'aimantation acquise. C'est seulement si le champ appliqué est suffisamment intense, plus exactement s'il dépasse le champ coercitif propre au matériau considéré, qu'on peut ré-aimanter le matériau dans une nouvelle direction, voir protocole expérimental.

## PÉDAGOGIE

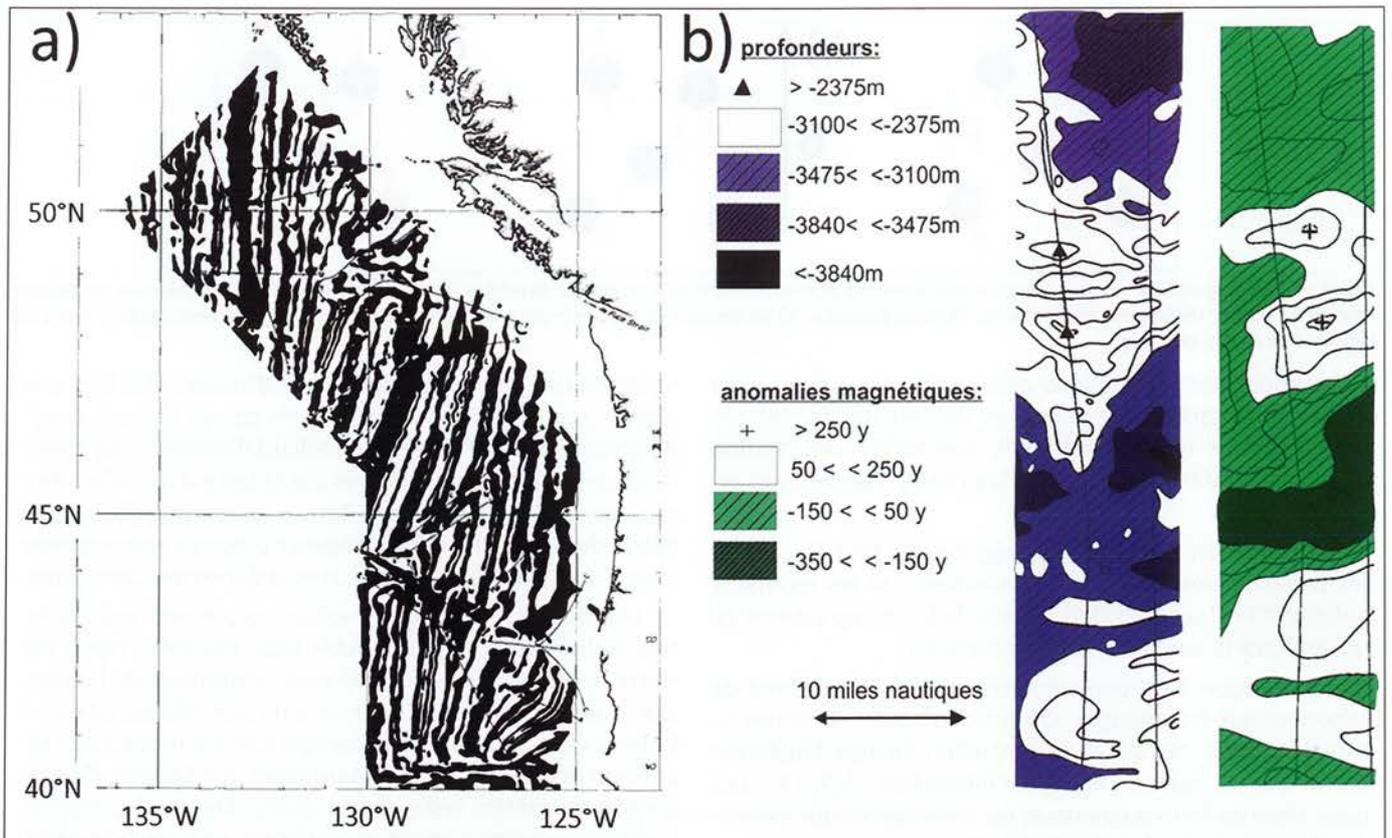


Figure 4 : a) carte des anomalies magnétiques au large de la côte Ouest américaine (d'après [5], modifié) - b) carte bathymétrique et des anomalies magnétiques dans le secteur de la dorsale de Carlsberg (d'après [6], modifié)

ont été frappés par la large anomalie magnétique négative, à l'axe du rift, flanquée par deux anomalies positives correspondant à des volcans sous-marins (Fig. 4b). Cette singulière corrélation entre topographie et anomalies magnétiques peut être vue comme l'élément déclencheur de ce qui est devenue l'hypothèse de 'Vine - Matthews - Morley'<sup>11</sup>, autrement dit la première validation scientifique du modèle de tectonique des plaques tel qu'on le connaît aujourd'hui.

Dans ce modèle, confirmé depuis par d'autres types de données, la lithosphère est découpée en plaques se déplaçant les unes par rapport aux autres. Le magma basaltique émis au niveau des dorsales contient des impuretés ferromagnétiques telles que la magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), l'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ou le rutile ( $\text{TiO}_2$ ) qui s'aimantent le long du champ magnétique local lors de leur refroidissement comme nous l'avons vu en conclusion de la partie précédente. On observe l'alternance de roches à anomalies magnétiques positive ou négative au fur et à mesure que l'on s'éloigne du rift central. Les roches ont en quelque sorte enregistré, telle une bande magnétique, les inversions du champ magnétique terrestre lors de leur expansion depuis le rift. Le modèle, bien établi à partir des années 1970, a depuis subi de nombreuses adaptations sans être fondamentalement remis en cause. On consultera [4] avec profit pour en donner un enseignement moderne.

Ainsi, on peut globalement modéliser les fonds océaniques comme deux bandes magnétiques qui progressent de part et d'autre du rift au rythme de quelques centimètres par an. Elles enregistrent, sur des échelles spatiales de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres, la dynamique du

champ magnétique terrestre qui bascule à l'échelle du million d'années.

## II. Partie expérimentale

L'objet des manipulations présentées ci-après est de réaliser des échantillons magnétiques, d'y « imprimer » des modulations spatiales du champ magnétique que l'on pourra mesurer avec un smartphone, à la manière, échelle réduite, d'un bateau qui traîne un magnétomètre au-dessus des fonds océaniques.

### 1. Spectres magnétiques dans des feuilles plastifiées

Au niveau collège ou en enseignement de spécialité SVT de 1ère, il peut être intéressant de concrétiser le champ magnétique puisque nous y sommes largement insensibles. On peut facilement matérialiser les lignes de champ par la poudre de magnétite vendue par exemple sur internet pour une dizaine d'euros le kg.

**Matériel nécessaire** : Plastifieuse, feuille à plastifier, poudre de magnétite, spatule, aimant, support translucide (vitre en verre ou en polycarbonate, PMMA...), smartphone avec application Phyphox ou équivalent. Phyphox est une application gratuite, très facile à utiliser, qui permet de nombreuses mesures physiques avec les capteurs des smartphones dont les magnétomètres.

<sup>11</sup> Le géologue Lawrence Morley étant parvenu aux mêmes conclusions indépendamment la même année.

Protocole :

### 1 - PRÉPARATION des feuilles plastifiées

1. Positionner la feuille plastifiée sur la plaque transparente, elle-même posée sur aimant droit ou en U. Ouvrir largement un des deux côtés de la feuille vers le haut.

2. Déposer à l'aide de la spatule de très fines quantités de magnétite à l'intérieur de la feuille plastifiée.

NB : tapoter la main tenant la spatule avec l'autre main, ne pas hésiter à s'y reprendre à plusieurs reprises pour ne pas faire de grumeaux.

3. Refermer la feuille plastifiée et l'éloigner de l'aimant verticalement.

4. Se rendre à la plastifieuse en maintenant la feuille bien horizontale.

5. Plastifier la feuille.

6. Préparer une seconde feuille en retournant l'aimant (pôle N à S et pôle S à N).

### 2 - COMPARAISON des 2 feuilles plastifiées

1. Observer la disposition de la poudre de magnétite.

2. Ouvrir l'application Phyxox, lancer l'enregistrement du magnétomètre.

3. En approchant le téléphone de la feuille, mesurer le champ magnétique enregistré.

4. Exporter le fichier obtenu au format Excel pour l'exploiter sur l'ordinateur.

5. Recommencer avec l'autre feuille plastifiée.

Cette manipulation permet à la fois de visualiser le champ magnétique et de comprendre comment, des impuretés ferromagnétiques peuvent enregistrer le champ magnétique. C'est bien sûr une expérience heuristique qu'il s'agit d'introduire avec précautions car les processus en œuvre à l'échelle géologique font intervenir des mécanismes bien différents<sup>12</sup> mais, néanmoins, nous avons quelques-uns des déterminants fondamentaux à l'œuvre : des impuretés magnétiques figées dans une matrice, un champ magnétique externe que l'on peut inverser, une mesure quantitative du champ magnétique qui se superpose au champ ambiant et se manifeste comme une anomalie.

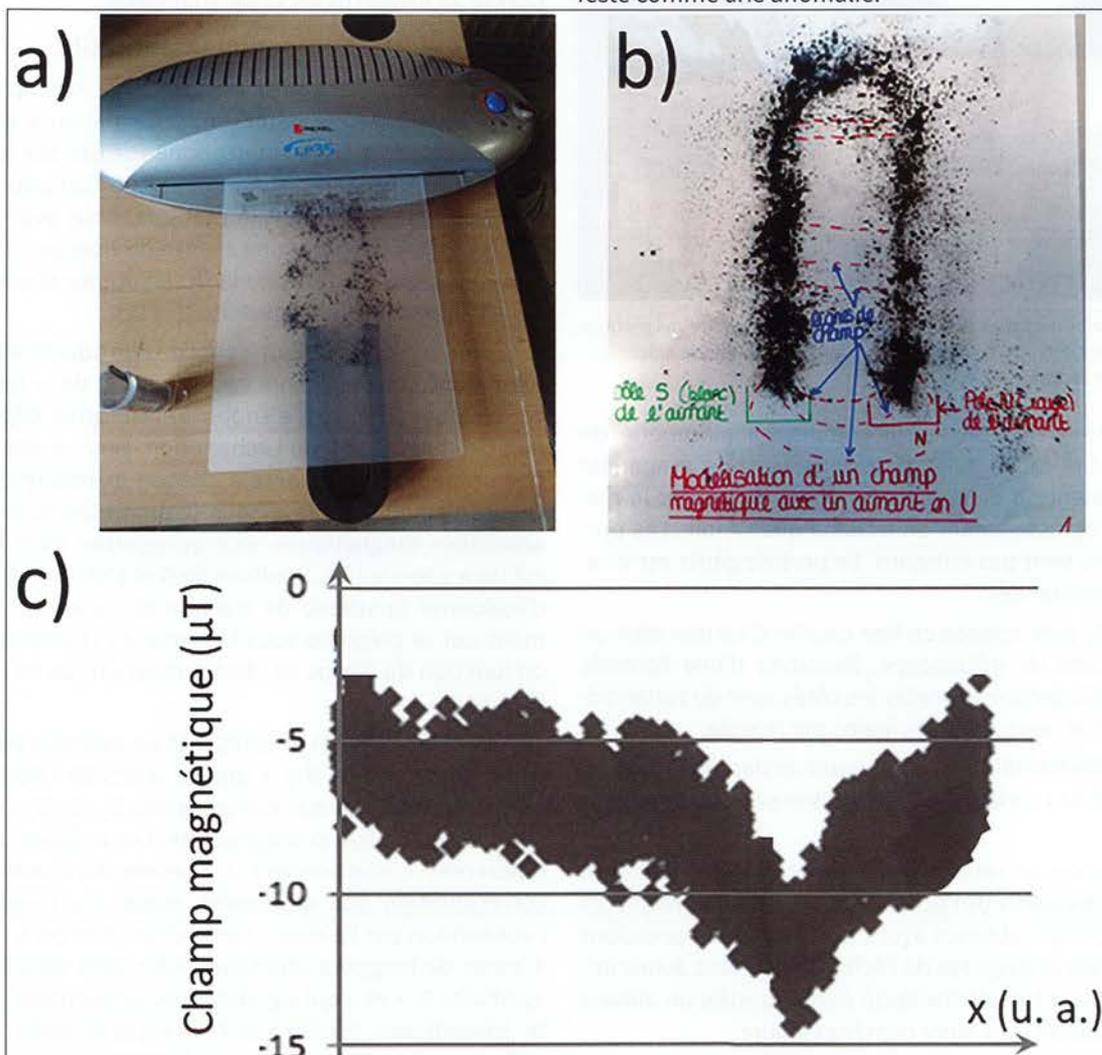


Figure 5 : a) échantillon avant plastification - b) échantillon après plastification - c) une composante du champ magnétique telle que mesurée par le magnétomètre du smartphone (u. a. unité arbitraire-  $\mu\text{T}$  microTesla. L'ordre de grandeur du champ magnétique terrestre est  $50 \mu\text{T}$ )

<sup>12</sup> La température de Curie de la magnétite est en effet de  $580^\circ\text{C}$  et ne peut être atteinte dans la plastifieuse. La magnétite reste ferromagnétique tout au long de l'expérience. Les grains s'orientent lors du dépôt sous l'action du champ magnétique généré par l'aimant.

# PÉDAGOGIE

Cette manipulation est toutefois plus délicate qu'il n'y paraît. Le saupoudrage de la magnétite entre les deux feuilles plastiques conditionne la visualisation qualitative des lignes de champ mais aussi la valeur des mesures faites avec le smartphone. Et donc, même s'il est très important de présenter le plus tôt et le plus souvent possible des mesures quantitatives aux élèves, celles-ci seront peu reproductibles.

Nous avons donc recherché une méthode à la fois plus simple et plus reproductible de produire des échantillons faciles à aimanter et à analyser avec un smartphone.

## 2. Pâte magnétique

Voici le protocole auquel nous sommes parvenus.

**Matériel nécessaire** : spatule, assiette, poudre de magnétite, graisse de silicone, lamelles de microscope, smartphone.



Figure 6 : Matériel nécessaire pour la préparation de la pâte magnétique  
s : spatule, a : assiette, p : poudre de magnétite, g : graisse de silicone, l : lamelles de microscope

- Malaxer 13 g de graisse silicone (rayon plomberie du supermarché local) avec 25 g de poudre de magnétite jusqu'à obtention d'une pâte homogène : ajouter la magnétite progressivement en trois ou quatre fois. Les proportions ne sont pas critiques. Le port de gants est vivement recommandé.
- Etaler cette pâte épaisse en fine couche d'un mm environ sur une lame de microscope. Recouvrir d'une seconde lame de microscope et sceller les côtés avec du ruban adhésif pour ne pas se salir les mains par la suite.
- Aimanter l'échantillon en appliquant un des pôles d'un aimant droit à la surface de l'échantillon pendant quelques secondes.
- Recommencer en retournant l'aimant et en l'appliquant sur une autre partie de l'échantillon (Fig. 7a). Les meilleurs résultats ont été obtenus avec deux à quatre impressions alternées sur la longueur de l'échantillon. Nous avons utilisé un aimant NdFeB 50x30x10 mm3 [8] mais un aimant plus petit aurait tout aussi bien fait l'affaire.

**Attention, ne pas approcher ces aimants des smartphones, ordinateurs ou disques durs : risque d'effacement des mémoires.**

- Lancer l'application Phyxox et mesurer le champ magné-

tique en passant le smartphone sur l'échantillon aimanté.

## 3. Enregistrements manuels

En pratique nous avons adopté une procédure un peu plus complexe pour une meilleure reproductibilité. Deux baguettes de PVC sont scotchées sur la table pour former des rails qui guident le smartphone au-dessus de l'échantillon. Celui-ci est posé sur un nombre suffisant de lames de verres (2 ici) pour affleurer juste en dessous des rails sur lesquels le smartphone est posé (Figs 7b et c et Fig 8).

Pour positionner au mieux le smartphone il faut localiser le capteur de champ magnétique. Pour cela on peut aimanter un petit clou par exemple, le planter dans un carton et le passer sur le smartphone pour rechercher la zone où le champ magnétique lu est le plus intense. Sur les smartphones à notre disposition, le capteur était systématiquement tout en haut, légèrement à gauche.

Ce protocole donne d'excellents résultats et l'on retrouve bien les zones aimantées de l'échantillon. On modélise ainsi les fonds marins et le magnétomètre tracté par le bateau. Toutefois, le mouvement manuel du smartphone n'est pas régulier et difficile à étalonner. L'expérience, sans doute suffisante au niveau lycée, reste qualitative.

## 4. Enregistrements plus quantitatifs

Dans une perspective post-bac, par exemple un sujet de TIPE, nous avons voulu rendre l'expérience plus quantitative. Cette fois-ci, le smartphone est fixe sur les rails. On scotche une ficelle à l'échantillon que l'on peut ainsi tirer plus régulièrement. Dans la pratique, nous avons utilisé un moteur électrique pour une avance de 2 cm.sec<sup>-1</sup> environ. On peut par exemple enrouler la ficelle autour d'une tige prise dans le mandrin d'une visseuse (Fig 8c).

Enfin, toujours dans un souci de reproductibilité, l'échantillon était posé sur deux épaisseurs de deux lames côte à côte (Figure 8a et b). Le support ainsi formé dépasse de 38 mm de chaque côté de l'échantillon. Nous avons alors scotché un petit clou aimanté à chaque extrémité du support. Quand l'équipage passe sous le smartphone deux petites anomalies magnétiques sont enregistrées dont la distance est bien connue (Fig. 9 autour de 0 et 150 mm). Cela permet d'étalonner la vitesse de traction et convertir l'enregistrement qui se présente sous la forme du champ magnétique en fonction du temps en champ magnétique en fonction de la position.

Sur la figure 9, on a représenté un exemple typique d'expérience complète. Il y a quatre séries de courbes correspondant de a) à d) aux composantes  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  ainsi que  $|\mathbf{B}|$  le module du champ magnétique. Les courbes de couleurs différentes correspondent à 5 enregistrements successifs correspondant aux différentes étapes de l'impression de l'échantillon par l'aimant. Sur l'échantillon on a « imprimé » 4 zones de longueur identique. Elles sont repérées par des symboles 0, + et - qui signifient respectivement non aimanté, aimanté avec le pôle S de l'aimant et aimanté avec le pôle N de l'aimant. Ainsi, en noir, codé 0000 nous avons l'échantillon vierge puis en rouge l'échantillon 000- dont l'extrémité droite est aimantée etc.

On constate tout d'abord que les enregistrements sont

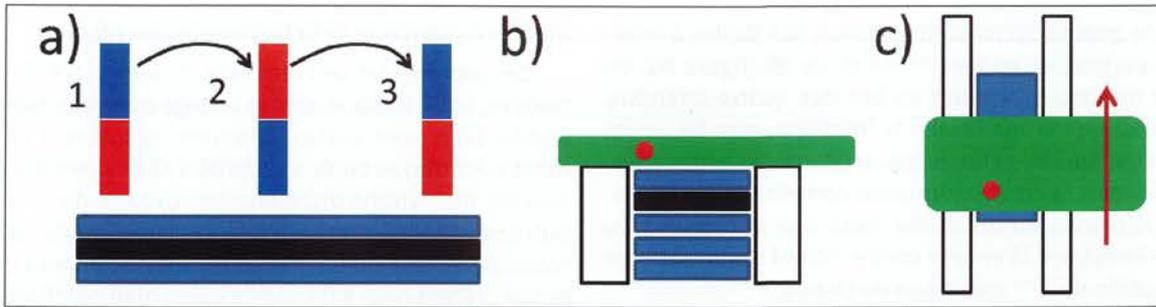


Figure 7 : a) pâte magnétique (noir) entre 2 lames de verre (bleu) - On aimante successivement 3 zones de polarités opposées avec un aimant. b) Vue de côté : l'échantillon aimanté est posé sur deux lames de verre supplémentaires entre des rails en PVC (rectangles blancs). Le smartphone (vert) est posé sur les rails. Le capteur de champ magnétique est figuré en rouge. c) même chose vue de dessus. La flèche rouge figure le mouvement manuel du smartphone que l'on fait glisser sur les rails en PVC.

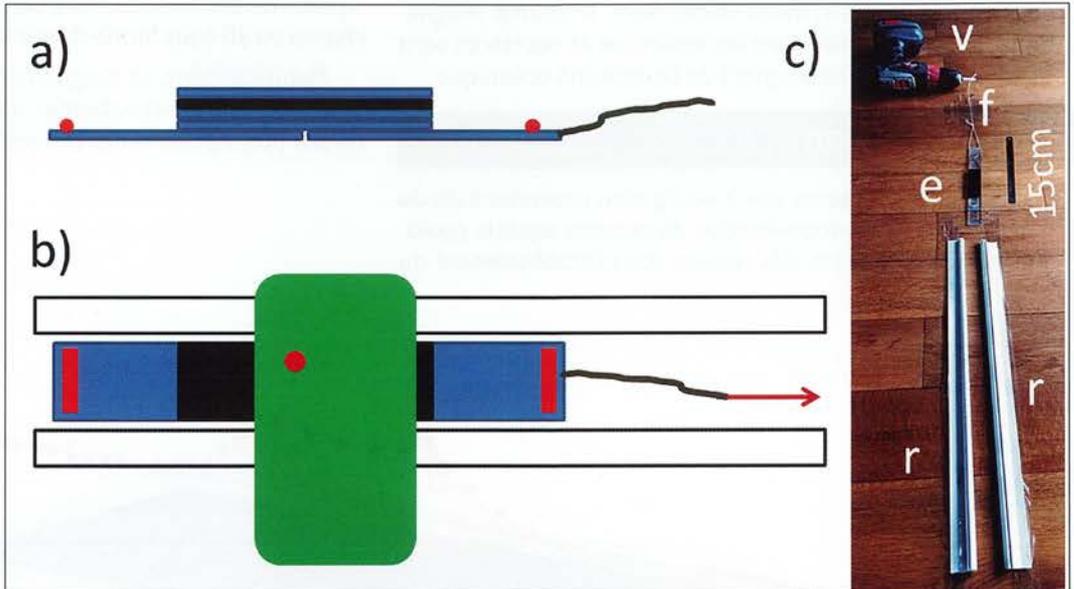


Figure 8 : a) Vue de côté : la base de l'échantillon est formée par deux lames de verre. On scotche en guise de repère deux petits clous aimantés aux extrémités (en rouge). L'ensemble est tracté par une ficelle. b) Vue de dessus c) Photo de l'ensemble. v : visseuse, f : ficelle, e : échantillon, r : rail

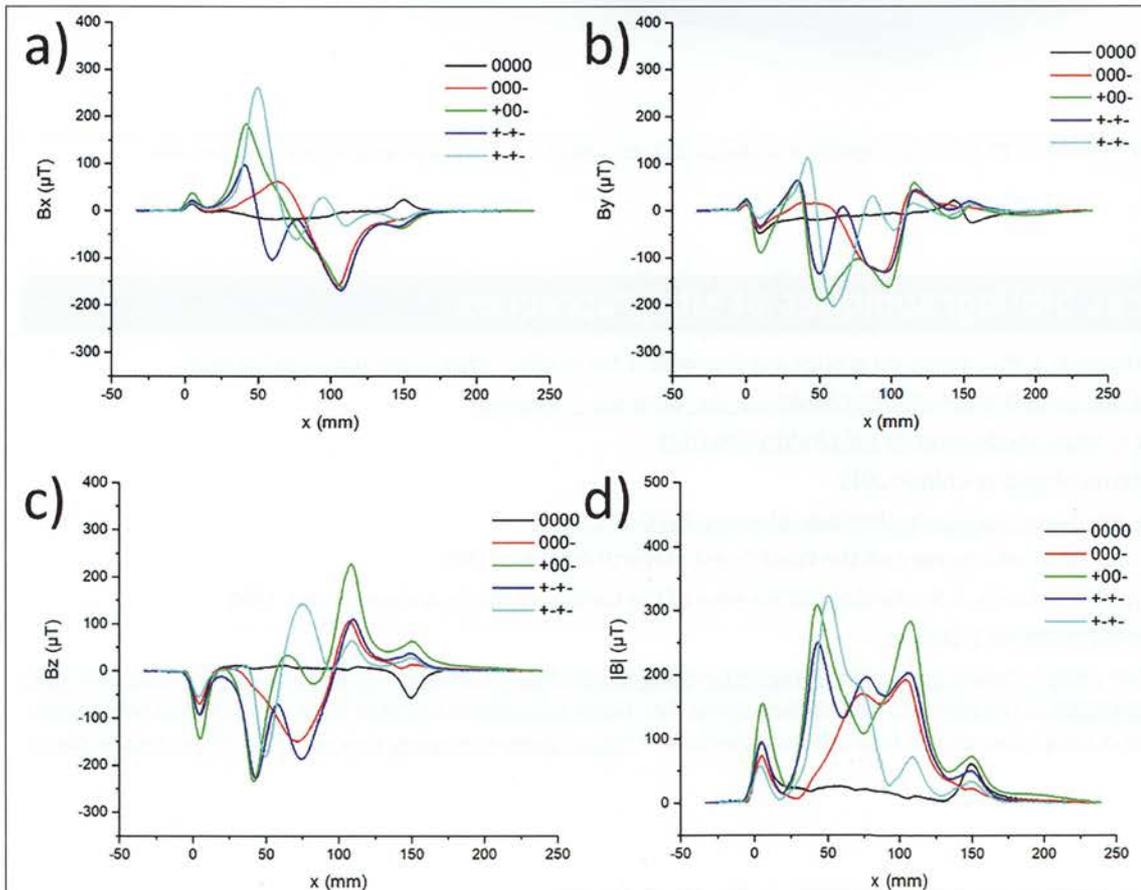


Figure 9 : de a) à d) enregistrements de  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  et  $|B|$  pour 5 aimantations successives des 4 zones de l'échantillon repérées par 0, + et - qui signifient respectivement non aimanté, aimanté avec le pôle S de l'aimant et aimanté avec le pôle N de l'aimant. Les anomalies magnétiques au niveau de  $x = 0\text{mm}$  et  $x = 150\text{mm}$  sont créées par de petits clous servant à étalonner la vitesse de déplacement de l'échantillon.

# PÉDAGOGIE

d'excellente qualité. Ils ne sont toutefois pas faciles à interpréter. En particulier, en bleu foncé et sur  $|B|$  (figure 9d) on observe 3 maxima du champ au lieu des quatre attendus. Le champ est en fait maximal à la frontière entre les zones d'aimantation opposée et non pas au centre des zones elles-mêmes. De plus, la courbe turquoise correspond à une tentative de réimpression du même motif que la courbe bleu foncé. Le résultat est là encore contre intuitif car on observe une diminution du 3<sup>ème</sup> maximum du champ.

Il y a donc là matière à discussion positive avec les élèves/étudiants : le terme « enregistrement » du champ est sans doute trop fort. Mais, indiscutablement, le champ magnétique laisse des traces dans les matériaux et ces traces sont significatives, elles témoignent de l'expansion océanique.

## III. Conclusion

Nous avons présenté une investigation expérimentale du magnétisme et une modélisation de certains aspects géologiques où il a joué un rôle majeur dans l'établissement du

modèle dynamique de la tectonique des plaques.

Ces expériences peuvent être mise en place de façon attractive, voire ludique, dès le collège pour des aspects qualitatifs. Elles sont particulièrement adaptées à l'enseignement scientifique ou de spécialité SVT de première par leurs aspects multi/trans disciplinaires. L'usage du smartphone, outre son côté attrayant auprès du jeune public, permet de recueillir facilement un grand nombre de données de qualité qui se prêtent bien à de nombreuses manipulations en relation avec les sciences du numérique : par exemple, l'étude statistique de l'épaisseur des échantillons réalisés par chaque groupe de TP, la reconstruction de module du champ à partir de ses composantes ou encore la représentation du champ en 3D sous forme de vecteur (Fig. 10).

Naturellement, le magnétisme étant conceptuellement difficile, on ne pourra aborder ses aspects quantitatifs qu'au niveau post bac dans des classes à dominante physique.

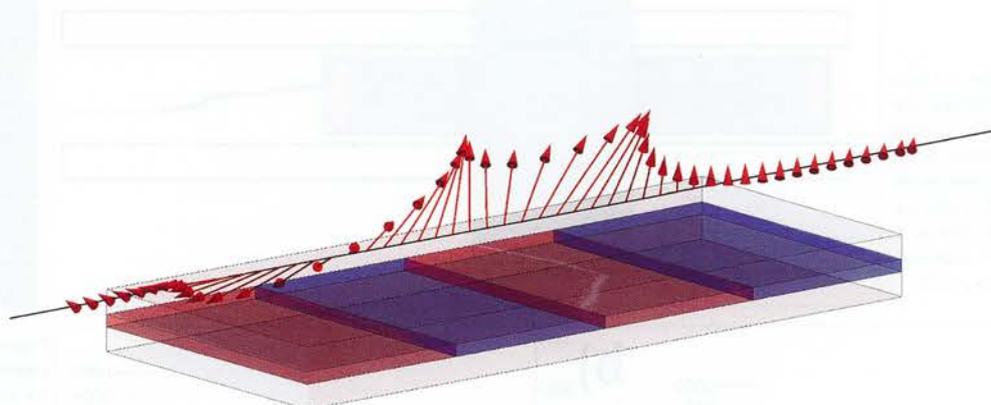


Figure 10 : représentation 3D du champ magnétique au-dessus d'un échantillon à 4 zones de polarité successives inversées

## IV. Références bibliographiques et sitographiques

- L'ensemble des activités et publications du groupe est disponible sur le site : <https://ires.univ-tlse3.fr/sim/>
- [1] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9or%C3%A8me\\_de\\_Bohr-van\\_Leeuwen](https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9or%C3%A8me_de_Bohr-van_Leeuwen)
- [2] « l'expérience VKS2 », <http://dx.doi.org/10.1051/refdp/2007039>
- [3] sujet agrégation interne physique-chimie 2012
- [4] <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/tectonique-plaques-1970-2011.xml>
- [5] Raff, A. D. ; Mason, R. G : Magnetic Survey off the West Coast of North America, 1961
- [6] Matthews, D. H.; Vine, F. J. ; Cann, J. R. : Geology of An Area of the Carlsberg Ridge, Indian Ocean, 1965
- [7] R. Feynman, électromagnétisme 1, Dunod.
- [8] Poudre de magnétite : <https://www.ebay.fr/itm/Magnetite-500g-Magnetique-Conductrice-Bobine-Coeur-Poudre-Fe3O4-Oxyde-Ferrique-/254294829369>. Les aimants NdFeB (Néodyme, Fer, Bore) possèdent une très forte aimantation rémanente. Ils s'achètent pour une dizaine d'euros sur internet, par exemple à <http://www.chenyang-ism.com/> ou <https://www.hkcm.de/desk.php/>.