

PHYSIQUE ÉTONNANTE

Ce livret est le fruit du travail de cinq physiciens de la préparation à l'agrégation de physique de l'Université Paul Sabatier de Toulouse : Michel Aubès, François Gheusi, Georges Massas, José-Philippe Pérez et Olivier Pujol. Élaboré dans le cadre de la manifestation internationale Physique 2005, il est un recueil d'expériences étonnantes dans les différents domaines de la physique : la mécanique, l'électromagnétisme, l'optique, l'électronique et la thermodynamique. Les expériences ont été choisies pour leur caractère spectaculaire et remarquable.

Sommaire

EXPÉRIENCES DE MÉCANIQUE

- M1 Qu'est-ce qui se conserve dans une rotation ?
- M2 Toupies, gyroscopes et paradoxes
- M3 Pendule de Foucault : le Panthéon ou une cathédrale sont-ils nécessaires ?
- M4 Surprenante mécanique des fluides

EXPÉRIENCE D'ÉLECTROMAGNÉTISME

- EM1 Lévitiation d'un anneau métallique

EXPÉRIENCES D'OPTIQUE

- O1 La lumière polarisée nous cache quelque chose
- O2 Rencontre étrange de la lumière polarisée et de la matière
- O3 Optique atmosphérique : le spectacle lumineux du ciel

EXPÉRIENCES D'ÉLECTRONIQUE

- EL1 Écouter la lumière et la température
- EL2 Transmission d'un signal sonore par de la lumière

EXPÉRIENCES DE THERMODYNAMIQUE

- T1 Diffusion thermique : chaleur et température, un couple infernal
- T2 Transitions de phases ou la matière dans tous ses états.

M1

Qu'est-ce qui se conserve dans une rotation ?

L'expérience courante nous montre que dans certains référentiels privilégiés, appelés *inertiels*, un point matériel de masse m , isolé ou soumis à des forces extérieures dont la résultante est nulle, a un mouvement *rectiligne uniforme* : il conserve sa vitesse initiale, $\mathbf{v} = \mathbf{cte} = \mathbf{v}_0$. Cette proposition, fondamentale en mécanique, a été expérimentée et énoncée pour la première fois par Galilée (1564-1642), puis formalisée par Newton (1643-1727) dans son célèbre ouvrage « Principe de la philosophie naturelle » dès les deux premières pages ! Aussi est-elle appelée « *première loi de Newton* » ou encore « *principe de l'inertie* ».

Réalisons une expérience dans laquelle deux billes, assimilées à des points matériels (centres de masse) de masses différentes, m_1 et m_2 , évoluent sans frottement selon un plan horizontal, se rapprochent et entrent en collision. Les billes ont un mouvement rectiligne uniforme, de vitesses \mathbf{v}_1 et \mathbf{v}_2 avant la collision ; après, le mouvement est de même nature, mais les billes s'éloignent avec des vitesses respectives \mathbf{v}_1' et \mathbf{v}_2' (Fig. 1).

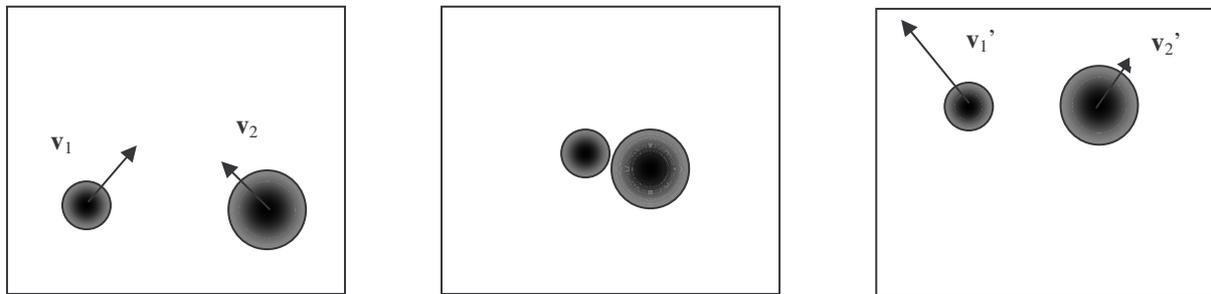


Fig. 1 - Expérience de collision de deux billes de masses différentes.

Une analyse fine de cette expérience montre que la *quantité de mouvement totale* \mathbf{P} (somme des produits de la masse de chaque bille par leur vitesse respective) se conserve durant le choc :

$$m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 = m_1 \mathbf{v}_1' + m_2 \mathbf{v}_2'$$

Comme $\mathbf{P} = (m_1 + m_2) \mathbf{v}_C$, où C est le centre de masse du système constitué des deux billes, il revient au même de dire que C a un mouvement rectiligne uniforme, ou une vitesse qui est une constante vectorielle.

Ainsi, l'expérience montre que la *quantité de mouvement totale* \mathbf{P} est la grandeur qui se conserve si le système est isolé ou soumis à des forces extérieures dont la résultante est nulle. \mathbf{P} est une grandeur fondamentale en mécanique ; elle fut définie par Newton dès la première page de son traité ! Cette expérience introductive permet de souligner l'intérêt particulier que le physicien accorde aux quantités qui se conservent : elles permettent en effet de prévoir simplement le comportement d'un système complexe. Ici, alors que la collision est un processus compliqué, la conservation de \mathbf{P} , lors du choc, permet de déterminer le mouvement de C , sans connaître le détail de l'interaction.

On se propose, dans cette présentation, d'étendre l'analyse précédente au cas des mouvements de rotation en répondant à la question posée en titre sur la nature de la grandeur mécanique qui peut se conserver. Précisément, nous décrivons trois expériences, simples et faciles à réaliser, qui illustrent la conservation d'une certaine grandeur mécanique. L'interprétation de ces expériences nous amènera à introduire quelques notions dont nous préciserons la signification physique.

I.- TABOURET D'INERTIE

Quiconque ayant assisté au spectacle donné par une danseuse, ou une patineuse artistique, a dû constater que celle-ci peut faire varier sa vitesse de rotation ω autour de l'axe Oz défini par son corps en modifiant la position de ses bras : une danseuse tourne plus vite si elle ramène les bras le long de son corps. Un

ordre de grandeur est calculable si l'on modélise la danseuse par un cylindre dont la section est un disque de diamètre D égal à la distance séparant les deux épaules de la danseuse. Typiquement, pour D égal à 30 cm, pour une masse de la danseuse de 55 kg, une masse et une longueur de bras (tendu) de 3,5 kg et de 50 cm respectivement, la danseuse peut tripler sa vitesse de rotation. Elle passe par exemple d'une valeur courante de 1 tour par seconde, bras tendus, à 3 tours par seconde lorsque les bras longent le corps !

I.1- Expérience 1

Une variante pédagogique de l'expérience précédente consiste à considérer une personne assise sur un tabouret en rotation et portant des masses au bout de chaque bras. On constate que sa vitesse de rotation augmente lorsqu'elle rapproche les bras de son corps (Fig.2) :

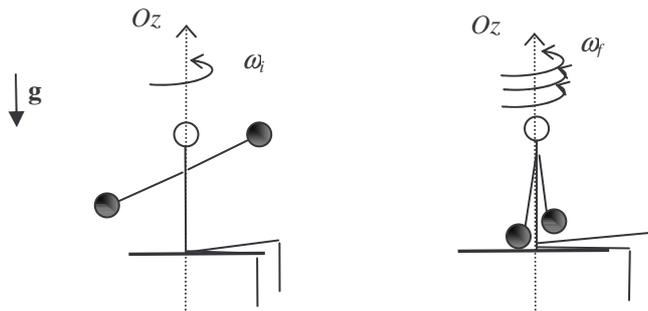


Fig. 2 - Tabouret d'inertie. En ramenant les bras le long du corps, la personne augmente sa vitesse de rotation ($\omega_f > \omega_i$) ; les masses portées à bout de bras ont pour rôle de les alourdir et de rendre l'effet plus visible.

On interprète cette observation par la *conservation* d'une certaine grandeur mécanique appelée *moment cinétique*. Fondamentalement, il s'agit d'une grandeur de même nature que la quantité de mouvement totale \mathbf{P} d'un système. Par analogie avec cette dernière qui est, par définition, proportionnelle à la vitesse du centre de masse du système, le moment cinétique est proportionnel à la vitesse de rotation du solide étudié. Pour \mathbf{P} , la constante de proportionnalité est la masse, laquelle traduit la capacité de résistance à une mise en mouvement par une force \mathbf{F} ; pour le moment cinétique, la constante de proportionnalité exprime la capacité de résistance à un moment \mathbf{M}_O (produit d'une longueur OA par une force appliquée au point A) et elle est appelée le *moment d'inertie*, noté I . Ainsi, en l'occurrence, la projection L_{Oz} du moment cinétique suivant l'axe Oz s'écrit pour la personne étudiée :

$$L_{Oz} = I \omega$$

Dans le cas où, comme ici, les frottements sont négligés, le moment cinétique se conserve. Initialement, il est égal à $I_i \omega_i$ et finalement, il vaut $I_f \omega_f$. Comme le moment d'inertie augmente lorsque la personne allonge les bras, ω_f est supérieur à ω_i :

$$I_i \omega_i = I_f \omega_f \quad \text{et} \quad I_i > I_f \Rightarrow \omega_i < \omega_f$$

I.2- Expérience 2

On peut se poser la question de savoir ce qui se passe lorsque la personne en rotation avec le tabouret lâche les masses en gardant constamment les bras tendus. L'expérience montre que la vitesse de rotation de la personne ne varie pas ! Là aussi, c'est la conservation de la projection L_{Oz} du moment cinétique total du système {personne + masses} qui impose la constance de la vitesse de la rotation entre les instants avant et juste après le lâcher (Fig.3).

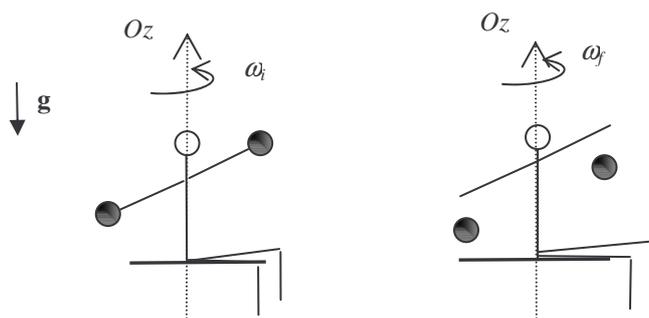


Fig. 3 - Tabouret d'inertie avec lâcher des masses, les bras restant tendus.

La conservation du moment cinétique impose $\omega_f = \omega_i$. Les masses partent, en effet, au moment du lâcher dans des directions opposées avec des vitesses horizontales égales par rapport au référentiel du laboratoire, ce qui assure que leur moment cinétique reste identique avant et après le lâcher, et donc aussi celui de la personne.

II.- TABOURET D'INERTIE ET ROUE EN ROTATION

II.1- Expérience 3

Reprenons l'expérience 1 précédente en imposant au tabouret d'être initialement au repos et en munissant la personne d'une roue en rotation rapide tenue à bout de bras devant elle. L'axe de la roue est aligné selon un axe horizontal. On demande à la personne de modifier l'axe de rotation de la roue et de le disposer selon la verticale. Cette manipulation apporte deux résultats : d'une part, la personne assise sur le tabouret doit fournir un effort pour modifier l'orientation de l'axe de la roue, d'autre part, les spectateurs voient clairement que la personne se met à tourner mais en sens *inverse* de celui de la roue ! La figure 4 schématise cette dernière observation.

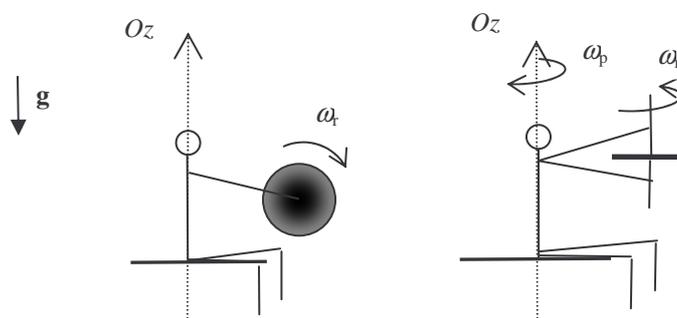


Fig. 4 - Tabouret d'inertie et roue en rotation. Une personne initialement immobile tient une roue en rotation selon un axe horizontal. L'orientation de l'axe de la roue selon la verticale demande un effort et provoque une rotation du tabouret en sens inverse de celui de la roue.

II.2- Interprétation du sens de rotation

Les frottements étant supposés négligeables, le système constitué du tabouret, de la personne liée au tabouret et de la roue conserve la projection L_{Oz} de son moment cinétique selon la verticale. Celui-ci présente deux contributions : celle de la roue $L_{Oz}^{(r)}$ et celle de la personne $L_{Oz}^{(p)}$. Initialement, aucune rotation ne se fait autour de l'axe vertical, donc $L_{Oz}^{(r)}$ et $L_{Oz}^{(p)}$ sont nuls :

$$L_{Oz} = L_{Oz}^{(r)} + L_{Oz}^{(p)} = 0$$

À l'état final, la somme précédente doit aussi être nulle par conservation de L_{Oz} , mais cette fois-ci, $L_{Oz}^{(r)}$ et $L_{Oz}^{(p)}$ ne sont plus nuls. La nullité de L_{Oz} implique donc

$$L_{Oz}^{(p)} = -L_{Oz}^{(r)}$$

ce qui indique, conformément à l'observation, que la personne tourne autour d'un axe vertical en sens *inverse* de la roue.

II.3- Origine de l'effort à fournir pour modifier l'orientation de l'axe de rotation de la roue

On constate ici un résultat général relatif au solide en rotation autour d'un axe : *toute modification de l'orientation d'un axe de rotation nécessite de fournir un effort mécanique* ; le solide en rotation résiste au changement d'orientation. Pour effectuer cette modification, la personne doit développer ce qui est appelé un *couple* de forces (ensemble de deux forces égales en intensité et de sens opposés, Fig. 5). Le moment cinétique étant porté par l'axe de rotation, il revient au même de dire que le couple change la direction du moment cinétique de la roue.

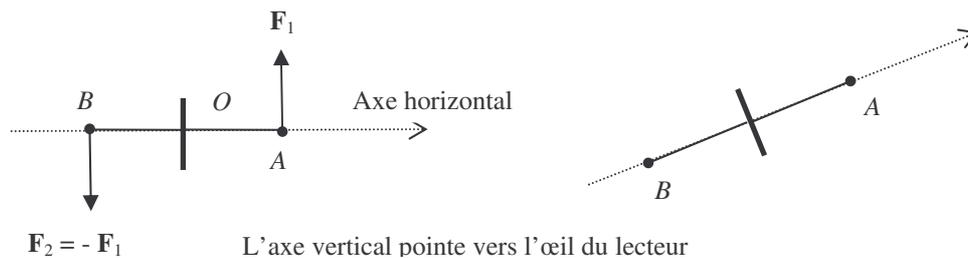


Fig. 5 - Illustration d'un couple : il s'agit de l'ensemble de deux forces \mathbf{F}_1 et \mathbf{F}_2 égales en intensité et de sens opposés $\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2 = \mathbf{F}$. Le couple est égal à $F \times OA + F \times BO = F \times BA$.

En vertu de l'opposition des actions réciproques, la roue agit sur la personne avec un couple *opposé* à celui développé par la personne pour faire tourner la roue. Dans ce contexte, le couple que subit la personne est le *couple gyroscopique*. C'est lui qui est à l'origine de la rotation du tabouret en sens *inverse* de celle de la roue. Il est important de noter que ces couples sont d'autant plus importants que la rotation est rapide. Ces considérations sur les rotations rapides seront analysées et précisées dans la thématique expérimentale suivante M2 intitulée « Toupies, gyroscopes et paradoxes. »

CONCLUSION

Il est important de retenir ces différentes expériences, simples et facilement réalisables, qui illustrent la conservation de la grandeur mécanique *moment cinétique*, lors des mouvements de rotation en l'absence de frottement. On peut garder à l'esprit le schéma récapitulatif suivant :

<p>SYSTÈME AVEC $\mathbf{F} = \mathbf{0}$</p> <p>La quantité de mouvement totale \mathbf{P} se conserve (1^{ère} loi de Newton).</p> <p>Exemple : Collisions de billes</p>	<p>SYSTÈME AVEC $M_{Oz} = 0$</p> <p>Le moment cinétique autour de l'axe de rotation L_{Oz} se conserve.</p> <p>Exemple : Tabouret d'inertie et variantes.</p>
---	--

M2

Toupiés, gyroscopes et paradoxes

Les toupiés et les gyroscopes sont des objets surprenants : les premiers continuent d'amuser les enfants, les seconds fascinent même des physiciens avertis. Ce point commun doit être attribué au comportement paradoxal de ces solides de révolution, en rotation rapide autour de leur axe de symétrie.

On lit parfois que, dans une toupie ou un gyroscope, il y a toute la mécanique du solide ! C'est probablement vrai, mais il convient d'ajouter que leur rôle ne se réduit pas à l'amusement des enfants ou à la réflexion académique des adultes. Les gyroscopes sont aussi des instruments très utiles dans le domaine de la navigation maritime, aérienne et spatiale.

I.- TOUPIES

Bien qu'anodins, ces jouets présentent des comportements riches et variés selon leurs formes géométriques : il est possible de fabriquer des toupiés avec n'importe quel objet à symétrie de révolution, boulons, vis, bref avec une multitude d'objets insolites apparemment sans rapport avec une toupie traditionnelle, laquelle est un *solide homogène de révolution autour d'un axe passant par son centre de masse*.

Proposons d'abord d'observer le mouvement d'une toupie dont l'une des extrémités, la pointe, est fixe dans le référentiel terrestre du laboratoire, et de noter quelques propriétés toujours en liaison avec la recherche d'une grandeur qui se conserve (cf. série d'expériences précédente M1).

L'observation attentive nous montre qu'une toupie à point fixe a un mouvement qui est la somme de trois rotations :

- 1) une rotation autour de la verticale : la *précession* ψ ;
- 2) une inclinaison de son axe de révolution par rapport à la verticale, dont l'angle θ varie entre deux valeurs θ_1 et θ_2 : la *nutaton* ;
- 3) une rotation autour de cet axe de révolution : la *rotation propre* φ .

Ces trois angles, introduits par Euler (Leonhard Euler, Bâle 1707 – Saint Petersburg 1783), permettent de déterminer, à tout instant, la position de ce solide autour du point fixe O . On dit qu'il possède trois degrés de liberté de rotation (Fig.1). L'angle de *nutaton* θ est celui que fait l'axe de révolution Oz' avec l'axe vertical ascendant Oz , l'angle de *précession* ψ est celui que fait la ligne des *nœuds* Ou (axe horizontal intersection du plan horizontal Oxy avec le plan du solide $Ox'y'$ perpendiculaire à l'axe de révolution Oz') avec l'axe horizontal Ox et enfin, la rotation propre φ que fait Ox' avec la ligne des nœuds Ou .

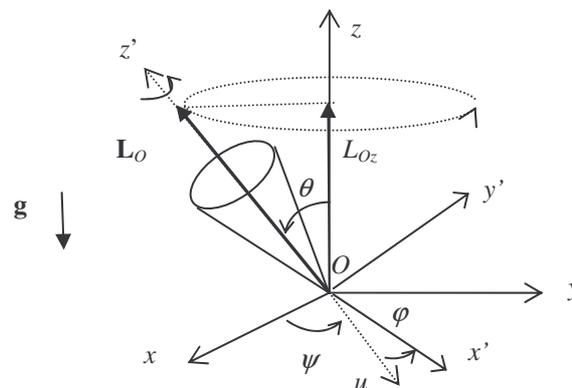


Fig. 1 - Toupie en mouvement autour du point fixe O . On observe la précession autour de l'axe vertical, la nutaton autour de Ou et la rotation propre autour de l'axe de révolution Oz' de la toupie.

Si la vitesse de rotation propre est suffisamment grande, l'axe de rotation de la toupie décrit un cône, c'est-à-dire que la longueur du vecteur rotation autour de cet axe est pratiquement constante, ainsi que sa projection sur l'axe vertical. Autrement dit, l'angle de nutation est pratiquement constant ; ce mouvement est la précession.

Notons son comportement spectaculaire sous l'action de la pesanteur : cette dernière déplace le centre de masse, non pas selon la verticale descendante comme pour un solide sans rotation propre, mais selon un plan horizontal ! On souligne cet aspect en exerçant sur l'axe de la toupie, à l'aide d'une tige, une force verticale vers le bas. Si, au contraire, on exerce une force horizontale sur l'axe, la toupie se redresse ! Là, le moment cinétique de la toupie n'est pas constant.

Lorsque l'axe de révolution demeure vertical, cas d'une toupie « dormante », le moment cinétique se conserve.

Certaines toupies sont constituées d'une demi-boule surmontée d'une tige cylindrique. En les faisant tourner à grande vitesse, autour de l'un des points de contact, elles peuvent se redresser, grâce aux forces de contact, et poursuivre leur rotation autour de leur axe renversé ! C'est fascinant, d'autant plus que l'analyse reste laborieuse.

II.- GYROSCOPES

C'est Léon Foucault qui construisit en 1852 le premier gyroscope, afin de mettre en évidence la rotation de la Terre, sans référence au ciel étoilé, d'une façon plus commode et plus précise qu'avec un pendule simple (cf. pendule de Foucault, thème M3).

II.1- Propriété fondamentale du gyroscope

Le gyroscope est une « toupie » qui tourne à grande vitesse et qui, en outre, est suspendue de façon parfaite en son centre de masse C . Il en résulte que le poids ainsi que les liaisons qui le soutiennent n'ont aucune influence. Dans ces conditions, une grandeur vectorielle se conserve : c'est le moment cinétique en son centre de masse C . Comme cette conservation n'est relative qu'à une catégorie de référentiels dits galiléens, dont le référentiel de Copernic \mathcal{R}_0 , lié aux étoiles, est une bonne approximation, et que la Terre est en mouvement par rapport à \mathcal{R}_0 , le gyroscope met en évidence le mouvement de la Terre par rapport aux étoiles : en quelques heures, l'orientation de la salle d'observation par rapport à l'axe du gyroscope a changé.

Il est facile de mettre en évidence le phénomène en plaçant le support d'un gyroscope sur un tabouret tournant (Fig. 2). Ce dernier simule la Terre alors que le laboratoire représente le référentiel lié aux étoiles. On constate aisément que l'axe de rotation du gyroscope reste invariable lorsqu'on fait tourner le tabouret.

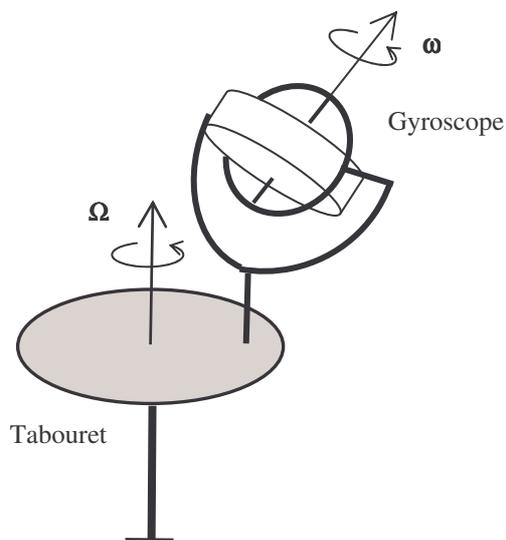


Fig. 2 - Gyroscope sur un tabouret tournant.

Si l'on exerce sur l'axe du gyroscope une force verticale, par exemple en accrochant une masselotte, il adopte un mouvement de précession autour de la verticale du lieu. Si, au contraire, on exerce sur cet axe une force horizontale, il réagit en redressant ou en abaissant son axe.

II.2 Exemples et applications

a) *Précession des équinoxes*

Lorsqu'on suppose que la Terre est une boule, son mouvement autour de son centre de masse C est celui du gyroscope précédent. En réalité, elle est renflée à l'équateur et aplatie aux pôles, ce qui provoque, sous l'action des autres astres (Lune, Soleil, etc.), un mouvement de précession autour d'un axe perpendiculaire au plan de l'écliptique ; c'est la *précession des équinoxes* : l'instant du printemps, défini par le passage du Soleil dans le plan équatorial terrestre, dans le sens ascendant, varie très lentement au cours du temps ; l'axe sud - nord effectue un tour complet en environ 259 siècles. C'est la raison pour laquelle notre signe zodiacal ne coïncide pas avec la constellation dans laquelle se trouvait le Soleil le jour de notre naissance !

b) *Navigation maritime, aérienne ou spatiale*

Si un navire, un avion ou une fusée est détourné de sa trajectoire prévue à la suite d'une perturbation, l'axe du gyroscope transporté étant invariable, il sert de référence pour toute correction de trajectoire. Le gyroscope exerce en effet un couple gyroscopique sur le support sur lequel il repose, lequel est proportionnel à la vitesse de rotation de son axe.

c) *Gyrocompas*

C'est un instrument constitué d'un gyroscope dont l'axe s'aligne sur la direction du vecteur rotation de la Terre autour de son axe de révolution, en raison des contraintes mécaniques imposées.

CONCLUSION

On voit que l'importance des toupies et des gyroscopes ne réduit pas uniquement au jeu et à la mise en évidence de paradoxes. La RMN (Résonance Magnétique Nucléaire) constitue un exemple d'application important du mouvement gyroscopique non plus des solides mais des atomes et des molécules, lorsqu'on les plonge dans des champs magnétiques : la nature de leur précession autour du champ donne une information sur leur environnement, d'où la possibilité d'obtenir de l'imagerie par RMN.

M3

Pendule de Foucault : le Panthéon ou une cathédrale sont-ils nécessaires ?

L'expérience du pendule de Foucault est l'une des plus célèbres du XIX^e siècle en raison de sa portée scientifique majeure. En effet, elle est la première preuve expérimentale de la rotation de la Terre sur elle-même sans référence à des phénomènes célestes particuliers, uniquement avec des moyens terrestres simples. Tout commence en janvier 1851 où Léon Foucault (Paris 1819 – Paris 1868), installé dans sa cave de la rue d'Assas à Paris, expérimente sur un pendule modeste dont le fil a une longueur de 2 m et supporte une masse de 5 kg. Il constate un léger mouvement du plan d'oscillation du pendule. Il continuera ses expérimentations avec des pendules de dimensions plus importantes, comme à l'observatoire de Paris, et en public : « Vous êtes invités à voir tourner la Terre, dans la salle méridienne de l'observatoire de Paris, demain, de 2 heures à 3 heures. ». Finalement, Louis Napoléon Bonaparte, informé de ses travaux, lui demandera de réaliser l'expérience du pendule au Panthéon. À contexte prestigieux et grandiose, pendule exceptionnel : le fil mesurait 67 m de long et la masse en oscillation égalait 28 kg ! L'expérience, qui fut un succès, eut lieu le 31 mars 1851. Depuis, elle fut refaite dans le monde entier de nombreuses fois, et Toulouse l'accueillit le 4 mai 2004 à la cathédrale Saint Etienne avec une longueur de fil de 28 m et une masse de 21 kg. Elle est aussi observable, en permanence, au Panthéon depuis quelques années.

On se propose dans cette troisième thématique des expériences de mécanique de simuler expérimentalement l'expérience de Foucault. Nous utilisons un pendule ainsi qu'un tabouret capable de tourner sans frottement autour de son axe. L'intérêt de cette manipulation est de montrer comment le pendule de Foucault peut mettre en évidence la rotation de la Terre, sans référence au ciel et, d'autre part, de montrer que le référentiel terrestre n'est galiléen qu'avec une certaine approximation.

I.- SIMULATION DE L'EXPÉRIENCE DE FOUCAULT

Le matériel expérimental est un tabouret capable de tourner sans frottement autour de son axe et un pendule. Le pendule lié au tabouret effectuera des oscillations dans un plan vertical et le tabouret tournant simulera la Terre en rotation sur elle-même (Fig. 1) :

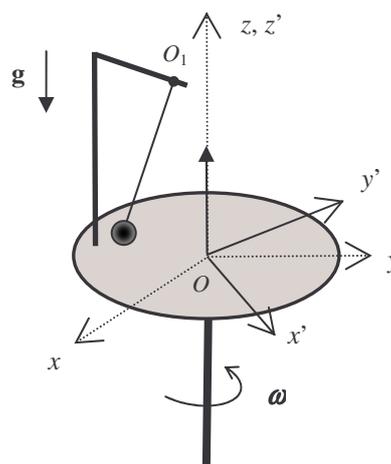


Fig. 1 - Pendule de Foucault simulé avec un pendule lié à un tabouret en rotation représentant la Terre.

Le référentiel $\mathcal{R} = Oxyz$ est le référentiel du laboratoire, $\mathcal{R}' = Ox'y'z'$ est celui lié au tabouret et sera en rotation lorsque le tabouret tournera ; O_1 est le point de suspension du pendule.

Lorsque le tabouret est immobile, le pendule lâché dans le champ de pesanteur effectue des oscillations dans un plan vertical fixe dans \mathcal{R} , par exemple celui défini par les axes Ox et Oy . C'est une propriété bien connue des pendules d'osciller dans un plan vertical déterminé dans \mathcal{R} . Si l'on met le tabouret en rotation, on constate que le pendule effectue toujours des oscillations dans le plan vertical fixe précédent. Il en résulte que dans \mathcal{R} , le plan d'oscillation du pendule semble effectuer une rotation en sens inverse de celle du tabouret.

II.- PREUVE DE LA ROTATION DE LA TERRE

L'expérience précédente permet de comprendre en quoi le pendule de Foucault est une preuve expérimentale de la rotation terrestre. Foucault, dans sa publication originale de 1851, interprète le comportement du pendule en se plaçant aux pôles, car c'est en ces points que le phénomène est le plus simple à décrire. Dans le référentiel géocentrique lié aux étoiles fixes $\mathcal{R}_g = Tx_gy_gz_g$, où T est le centre de la Terre, le pendule écarté de sa position d'équilibre oscille par rapport à \mathcal{R}_g dans un plan vertical déterminé par les conditions initiales. Dans le référentiel terrestre $\mathcal{R} = Oxyz$ qui tourne avec la vitesse angulaire Ω autour de l'axe sud nord Oz , dans le sens ouest - est, le plan d'oscillation du pendule semble effectuer une rotation autour de l'axe polaire dans le sens est-ouest. La période de révolution T_p par rapport aux étoiles est le jour sidéral, égal à 23h 56min.

Ailleurs qu'aux pôles, la période est plus grande : elle dépend de la latitude du lieu d'expérimentation λ par son sinus (Fig. 2) :

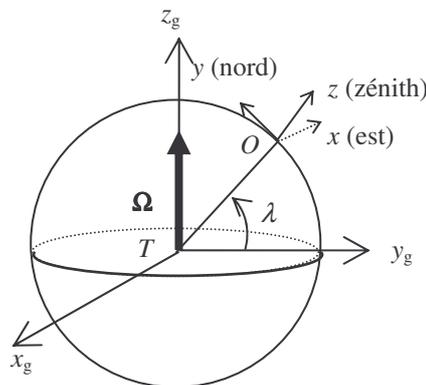


Fig. 2 - Schéma du globe terrestre : $\mathcal{R}_g = Tx_gy_gz_g$ est le référentiel géocentrique où T est le centre de la Terre, Tx_g , Ty_g et Tz_g sont trois axes pointant vers des étoiles lointaines ; $\mathcal{R} = Oxyz$ est le référentiel terrestre avec O le lieu d'expérimentation de latitude λ .

Notons que $\Omega \sin \lambda$ est la projection selon Oz du vecteur Ω (Fig. 2).

Par exemple, à Toulouse, la période d'oscillation mesurée, lors de la présentation à la cathédrale Saint Etienne, est 34h 30min, ce qui donne une latitude de $43,9^\circ$. En réalité, Toulouse est à une latitude de $43,48^\circ$ ce qui donne une période de révolution de 34h 47min.

III.- INTERPRÉTATION QUANTITATIVE DE CETTE EXPÉRIENCE

L'explication théorique du comportement du pendule est fournie par l'expression de la deuxième loi de Newton dans le référentiel terrestre \mathcal{R} , en toute rigueur non galiléen : on doit introduire, outre le poids, une force supplémentaire appelée *force de Coriolis* (Gustave Coriolis, Paris 1792 – Paris 1843) directement reliée à la vitesse angulaire de la Terre autour de l'axe des pôles. En désignant respectivement par $\mathbf{a}_{A/\mathcal{R}}$ et $\mathbf{v}_{A/\mathcal{R}}$ l'accélération et la vitesse de la masse pendulaire A dans \mathcal{R} , m sa masse et \mathbf{T} la tension du fil de suspension, il vient :

$$m\mathbf{a}_{A/\mathcal{R}} = m\mathbf{g} + \mathbf{T} - 2m\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}_{A/\mathcal{R}}$$

où le dernier terme est la force de Coriolis.

Il est important de souligner que Foucault a donné une interprétation de sa célèbre expérience sans aucune équation ! C'est un mathématicien italien, discret, du nom de Plana, qui interpréta théoriquement les résultats de Foucault à l'aide de la force de Coriolis et de l'équation précédente. On a là un bien bel exemple historique de l'originalité de la démarche de physiciens : l'intuition, la modélisation la plus simple et la plus pertinente, enfin la réalisation.

CONCLUSION

Retenons l'importance historique et scientifique de l'expérience du pendule de Foucault. Elle a mis en évidence clairement la rotation de la Terre sur elle-même et, aussi, en toute rigueur, le caractère non galiléen du référentiel terrestre. Dans ce contexte, Foucault a construit en 1852 un dispositif plus commode pour mettre en évidence la rotation de la Terre : le gyroscope (cf. M2).

M4

Surprenante mécanique des fluides !

La mécanique des fluides est le domaine de la physique qui étudie les mouvements – et leurs causes – des liquides ou des gaz (que l'on regroupe sous le terme générique de *fluides*). Ces mouvements de fluides sont souvent appelés *écoulements*.

Nous allons voir ici par quelques expériences que le comportement d'objets dans des écoulements n'est pas toujours intuitif, et révèle certaines surprises...

I.- PREMIÈRES EXPÉRIENCES SURPRENANTES

I.1- Lévitiation d'une balle de ping-pong

Le matériel nécessaire est constitué d'une balle de ping-pong et d'un sèche-cheveux (embout à section circulaire).

On oriente le jet du sèche-cheveux verticalement et on place délicatement la balle dans le jet d'air à une dizaine de centimètres au-dessus de l'embout. La balle reste en lévitation stable dans le jet d'air ! Si l'on incline progressivement le jet, la balle reste en lévitation au dessus du « vide » ! Elle finit par décrocher lorsqu'on dépasse un certain angle (de l'ordre de 45°) par rapport à la verticale.

On comprend bien comment le jet d'air peut soutenir la balle, mais celle-ci devrait, lors de l'inclinaison, s'échapper du jet par le côté et tomber. Au contraire, elle a tendance à rester dedans. Pourquoi ?

I.2- Les amours d'une cuillère et d'un jet d'eau

Tenons une cuillère (à soupe ou à dessert) suspendue par le manche et approchons sa face bombée du jet d'un robinet d'eau courante. Dès que le contact est établi, la partie bombée de la cuillère est vivement attirée vers l'intérieur du jet.

Cette expérience montre qu'un fluide s'écoulant autour d'un objet convexe (bombé) a tendance à aspirer l'objet. Ce fait nous permet d'interpréter la première expérience : si la balle de ping-pong s'écarte du centre du jet d'air, tout se passe alors comme avec la cuillère, elle va être aspirée vers l'intérieur du jet. Cette force de rappel assure que la balle reste dans le jet d'air – l'équilibre est *stable*. Quand on incline le jet, cette aspiration va de plus compenser une partie du poids de la balle. Si le jet est trop incliné, l'effet d'aspiration n'est plus suffisant et la balle tombe.

II.- QUELQUES EXPLICATIONS

Un fluide a toujours tendance à s'écouler vers les endroits où la pression est la plus faible – ainsi l'air s'échappe spontanément d'un pneu si on ouvre la valve, ou s'il y a un trou, ou encore d'un ballon de baudruche ouvert, etc. Ainsi la force de pression qui met un fluide en mouvement est toujours dirigée des fortes pressions vers les faibles pressions.

Quand un fluide s'écoule autour d'un objet convexe, ce dernier lui impose de prendre un virage. Ceci requiert l'existence d'une force de pression dirigée vers l'intérieur du virage (c'est-à-dire vers l'objet) – en effet, une des grandes lois de la mécanique, la *première loi de Newton* (ou *principe de l'inertie*), implique que les objets suivent un mouvement rectiligne uniforme en l'absence de toute force appliquée. On peut donc en conclure que la pression est plus faible à l'intérieur du « virage d'air », près de l'objet, qu'à l'extérieur. On parle de *dépression dynamique* car c'est le mouvement du fluide qui la génère. Remarquons que l'effet sera inverse pour un écoulement au creux d'un objet concave, où il règnera une surpression dynamique. La dépression dynamique n'existe pas de l'autre côté de la balle ou de la cuillère, où il n'y a pas d'écoulement. C'est finalement pour cette raison que la balle ou la cuillère sont aspirées par le jet d'air ou d'eau (Fig. 1).

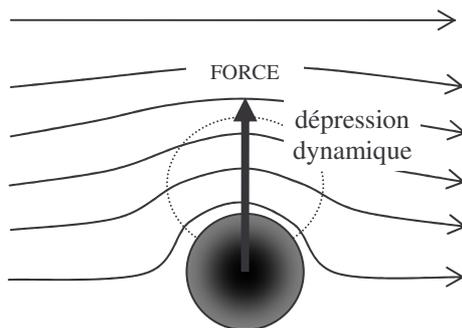


Fig. 1 - Écoulement d'air autour d'une balle de ping-pong ; l'incurvation du courant d'air implique une différence de pression aspirant la balle et la maintenant dans le jet.

C'est ce même effet qui provoque le soulèvement des tuiles d'un toit par grand vent, et qui permet aux avions de voler, grâce à la forme convexe du dessus des ailes.

III.- D'AUTRES EXPÉRIENCES

III.1- Tunnel de papier

Plions une feuille de papier en forme de créneau et dirigeons le jet d'un sèche-cheveux sous le tunnel ainsi formé (Fig. 2). Au lieu d'être emporté, le tunnel de papier est plaqué au sol et son toit s'affaisse.

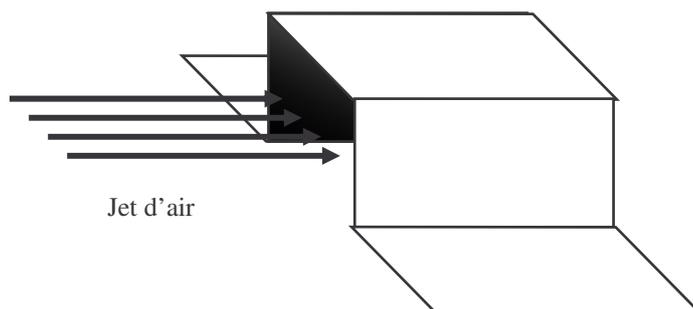


Fig. 2 - Écoulement d'air sous un tunnel de papier

Contrairement à l'intuition trompeuse, l'air s'écoulant rapidement dans le tunnel est en *dépression* par rapport à la pression atmosphérique. N'oublions pas en effet que la force de pression est dirigée vers les pressions les plus faibles. Ceci explique pourquoi le toit du tunnel s'affaisse, mais aussi pourquoi la pression est plus faible dans le jet d'air. En effet, c'est cette même force de pression qui intervient pour accélérer le mouvement de l'air. Ainsi, dans une veine d'air en accélération, comme c'est le cas dans le sèche-cheveux, la pression est d'autant plus faible que la vitesse de l'air est plus grande.

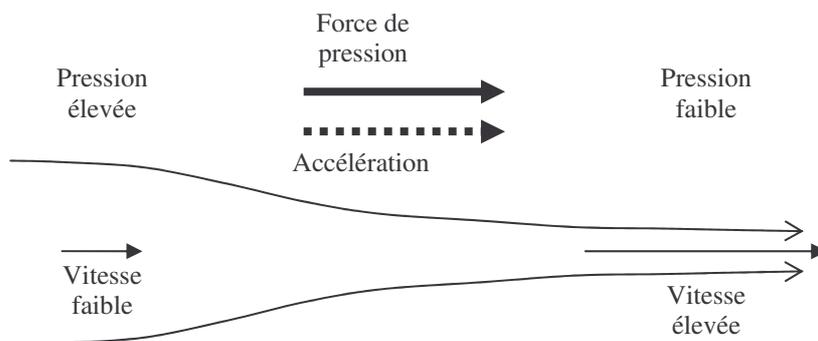


Fig. 3 - Dans une veine d'air par exemple, la pression est d'autant plus faible que la vitesse de l'écoulement est grande.

III.2 Le fol entonnoir

Un entonnoir est relié par un tuyau souple en caoutchouc à une source d'air comprimé. On établit alors un courant d'air important dans l'entonnoir orienté vers le haut et on y introduit une balle de ping-pong. Lorsqu'on renverse l'entonnoir, on constate, avec surprise, que la balle reste suspendue dans l'entonnoir et ne tombe pas ; si l'on coupe le jet d'air, la balle tombe !

Cette expérience impressionnante est une illustration plus spectaculaire encore du phénomène précédent. La forme de l'entonnoir force le jet d'air à diverger, donc à ralentir, et ceci s'accompagne d'une augmentation de la pression. C'est donc au fond de l'entonnoir que la pression est minimale, et cette dépression suffit à compenser le poids de la balle de ping-pong (Fig. 4).

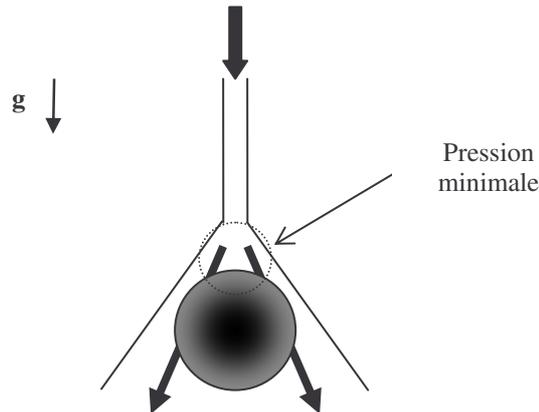


Fig. 4 - Une balle dans un entonnoir renversé dans lequel circule un jet d'air puissant reste en suspension !

CONCLUSION

Retenons ces quelques expériences spectaculaires qui mettent en évidence des phénomènes inattendus que l'on explique en considérant les propriétés des fluides en écoulement. Au-delà de l'aspect amusant, la mécanique des fluides tient une grande place dans la vie quotidienne, dans l'automobile et dans l'aviation par exemple : il est toujours passionnant et scientifiquement émouvant de voir décoller un avion tel l'Airbus A380.

EM1

Léviton d'un anneau métallique

On propose ici une expérience de lévitation d'un anneau métallique en aluminium provoquée par le phénomène d'induction électromagnétique.

I.- OBSERVATIONS

Le matériel nécessaire pour cette manipulation est constitué d'un alternostat pouvant délivrer un courant d'intensité maximale 1,25 A, d'un multimètre, d'une bobine magnétique (1000 spires), d'un noyau magnétique et de plusieurs anneaux de constitution matérielle différente (aluminium, acier et PVC). Lorsque la bobine est parcourue par un courant alternatif d'intensité $i_b(t)$, l'anneau d'aluminium est soulevé : il lévite, et, si on le touche, on constate qu'il est chaud (Fig. 1).



Fig. 1 - Photos du dispositif expérimental (en haut) et observation de l'anneau en lévitation (en bas).

L'expérience montre également que les effets précédents sont inobservables pour l'anneau de PVC (matériau non conducteur) et pour l'anneau d'acier.

II.- INTERPRÉTATION

Elle relève du phénomène d'*induction électromagnétique* découvert en 1831 par le physicien anglais Michael Faraday (Newington 1791 – Hampton Court 1867). Le courant alternatif d'intensité $i_b(t)$ crée, dans l'axe de la bobine, un champ magnétique variable $\mathbf{B}(t)$, lequel produit dans l'anneau d'aluminium des courants induits dont le sens, donné par la loi de Lenz (Heinrich Lenz : Dorpat en Estonie 1804 – Rome 1865), est tel qu'ils s'opposent aux causes qui les ont engendrés. Par exemple, durant une alternance, $i_b(t)$ crée une face nord en regard de l'anneau, il apparaît au sein de cet anneau un courant induit d'intensité $i_a(t)$ qui engendre une face nord en regard de la bobine. L'anneau et la bobine se repoussent donc. L'alternance suivante crée deux faces sud en regard, etc. Comme la fréquence du courant est suffisante pour que l'anneau n'ait pas le temps de retomber entre deux alternances, il lévite.

L'échauffement de l'anneau d'aluminium est dû à la puissance électrique dissipée par effet Joule dans l'anneau. En effet, les courants induits peuvent être très importants, et, bien que la résistance électrique de l'anneau soit faible, l'effet Joule qui en résulte est suffisant pour élever la température de l'anneau.

L'absence de courant dans un milieu non conducteur rend compte du fait que l'anneau de PVC ne lévite pas. Pour l'acier, ces effets sont masqués, car la force de répulsion créée n'est pas suffisante pour soulever l'anneau. De plus, l'acier étant un matériau ferromagnétique, l'anneau est attiré par les régions où règne un champ magnétique important. La nature du matériau constituant l'anneau est donc très importante.

Remarque : Le feuilletage du matériau magnétique est destiné à gêner la circulation des courants induits dans le matériau. Dans le cas de conducteurs massifs, comme un anneau, on appelle ces courants induits courants de Foucault, en l'honneur de Léon Foucault (cf. Mécanique) qui s'est aussi intéressé à l'électromagnétisme.

III.- APPLICATIONS DU PHÉNOMÈNE D'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

On retrouve le phénomène d'induction électromagnétique dans de nombreuses applications. Ainsi, dans certaines plaques chauffantes, en cuisine, on utilise la dissipation par effet Joule due aux courants de Foucault pour chauffer la casserole contenant les aliments. Certains véhicules lourds sont équipés d'un système de freinage utilisant ces courants. Enfin, en électrotechnique, la production d'énergie électrique (alternateur) et sa modification (abaissement ou élévation de tension par des transformateurs) sont des applications directes de l'induction électromagnétique.

CONCLUSION

Retenons que la lévitation et l'échauffement de l'anneau d'aluminium illustrent les effets du phénomène d'induction électromagnétique. Ce dernier est largement employé dans la vie courante (transformateurs, alternateurs, plaques chauffantes, freinage,...).

O1

La lumière polarisée nous cache quelque chose

On propose quelques expériences simples mettant en évidence une caractéristique de la lumière, son état de *polarisation*.

I.- ASPECTS THÉORIQUES

I.1- État de polarisation de la lumière

La lumière est une onde électromagnétique, c'est-à-dire un ensemble de deux champs, l'un électrique \mathbf{E} et l'autre magnétique \mathbf{B} . Au cours de la propagation en espace libre, ces champs sont *transverses*, c'est-à-dire perpendiculaires à la direction de propagation, comme le montre la figure 1.

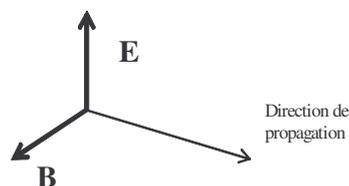


Fig. 1 - Représentation vectorielle de la lumière (onde électromagnétique). Les champs électrique \mathbf{E} et magnétique \mathbf{B} sont dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

L'état de *polarisation* correspond à l'évolution de l'*orientation* du vecteur \mathbf{E} . Ainsi, on parle de polarisation *rectiligne* lorsque \mathbf{E} reste constamment parallèle à une *direction fixe*. La polarisation est dite *circulaire* si l'extrémité du vecteur \mathbf{E} décrit au cours du temps un *cercle* ; elle est circulaire *droite* (ou circulaire *gauche*) si, pour un observateur qui reçoit la lumière, ce cercle est décrit dans le sens des aiguilles d'une montre (ou en sens inverse).

I.2- Lumière naturelle

Pour la lumière *naturelle* (lumière du jour ou lumière émise par une source quelconque), l'état de polarisation change constamment de façon *aléatoire* (environ toutes les 10^{-8} seconde) : la lumière naturelle *n'est pas* polarisée.

I.3- Polariseur. Polariseur et analyseur

Un polariseur linéaire (dans l'usage courant on parle simplement de polariseur) est un dispositif optique qui, éclairé par un faisceau de lumière naturelle, transmet un faisceau de lumière polarisée rectilignement. Le polariseur est caractérisé par la direction de polarisation qu'il impose. Si l'intensité du faisceau de lumière naturelle est I_0 , l'intensité du faisceau polarisé transmis est égale à la moitié de I_0 (Fig. 2).

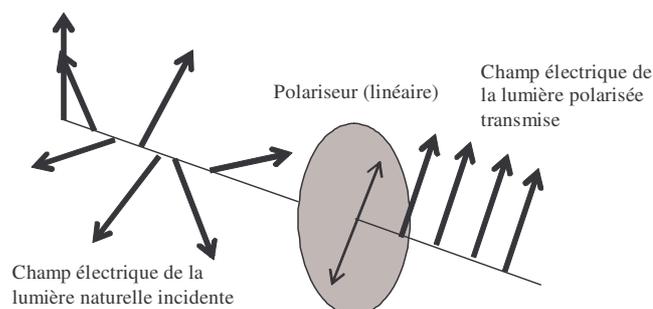


Fig. 2 - Effet d'un polariseur linéaire : il polarise une lumière non polarisée (lumière naturelle) dans une direction déterminée.

Si le faisceau de lumière incident est polarisé rectilignement, le polariseur ne laissera passer que la projection du champ électrique selon sa direction de polarisation (Fig. 3).

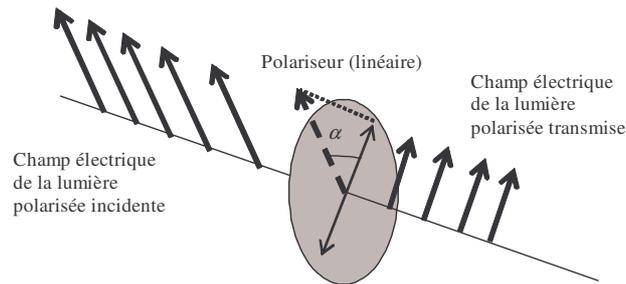


Fig. 3 - Illustration de la loi de Malus

Ainsi, si les directions de polarisation du faisceau incident et du polariseur font un angle α , l'intensité I transmise par le polariseur est donnée par la *loi de Malus*, du nom du physicien français Etienne Louis Malus (Paris 1775 – 1812) :

$$I = I_0 \cos^2 \alpha$$

Si les deux directions sont perpendiculaires ($\alpha = 90^\circ$), le faisceau transmis est éteint ($I = 0$). Un polariseur permet donc aussi d'analyser l'état de polarisation d'une lumière, d'où son nom d'*analyseur* dans ce cas.

II.- EXPÉRIENCES ET OBSERVATIONS

Dans les expériences qui suivent, on propose d'observer différentes lumières à travers une feuille de matériau polarisant qui joue alors le rôle d'analyseur. Il s'agit de noter comment varie l'intensité lumineuse quand on fait tourner l'analyseur autour de l'axe du faisceau (Fig. 4) :



Fig. 4

II.1- Observations

a) Lumière du ciel

Cette observation ne peut pas se faire si le temps est couvert : il faut avoir au moins un petit coin de ciel bleu. La présence simultanée de ciel bleu et de nuages constitue les conditions idéales d'observation. Si on observe ainsi le ciel à travers l'analyseur, on constate que lorsqu'on fait tourner ce dernier :

- ✓ le flux lumineux (luminosité) provenant des nuages est constant ;
- ✓ celui issu du ciel bleu dépend de la position de l'analyseur. Il existe deux positions de ce dernier pour lesquelles le flux lumineux est le plus faible.

b) Lumière d'une lampe à incandescence

Observons une lampe à incandescence à travers l'analyseur. On constate que l'intensité ne varie pas quand on fait tourner l'analyseur, mais on note qu'elle est plus faible que si on regardait directement la lampe à l'œil nu.

c) Lumière réfléchie par une surface d'eau

Une surface d'eau se comporte comme un (mauvais) miroir. Observons à travers l'analyseur le reflet de la lampe à incandescence précédente donné par la surface libre de l'eau contenue dans un récipient (on peut aussi observer les reflets sur une flaque d'eau ou sur une route mouillée). En faisant tourner l'analyseur, on constate que l'intensité de la lumière transmise passe par un minimum lorsque la direction de polarisation de l'analyseur est perpendiculaire au plan d'incidence. L'intensité minimale transmise est pratiquement nulle lorsque α avoisine 40° , donc lorsque son complémentaire approche 50° (Fig. 5).

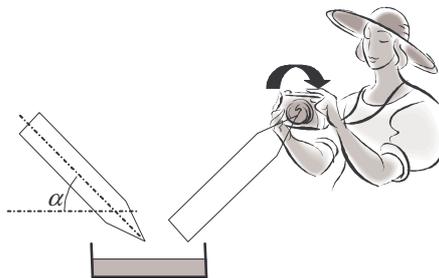


Fig. 5 - Polarisation par réflexion ; elle est totale pour un angle particulier, ici proche de 40° ; son complémentaire (50° environ) est appelé angle de Brewster.

II.2- Interprétation

Dans toutes les expériences précédentes, on utilise un dispositif particulier appelé *polariseur*. Sans connaître exactement la façon dont il agit sur la lumière, on met en évidence que cette action n'est pas la même avec toutes les lumières, ce qui nous permet de conclure que certaines sont polarisées. Ainsi l'orientation du polariseur n'agit pas sur la lumière de la lampe à incandescence : nous en concluons qu'elle n'est pas polarisée.

Remarque : En réalité, même si la conclusion est vraie, cette expérience simple ne nous permet pas de conclure aussi rapidement : nous aurions obtenu le même résultat avec un faisceau de lumière polarisée circulairement !

La variation d'intensité observée lorsqu'on fait tourner le polariseur, quand on regarde le ciel, nous conduit à la conclusion que la lumière du ciel bleu est polarisée. La lumière venant du Soleil n'est pas polarisée mais sa diffusion par les atomes de l'atmosphère (diffusion Rayleigh) la polarise (cf. O3 : « Optique atmosphérique : le spectacle lumineux du ciel »).

En revanche, la lumière venant des nuages n'est pas polarisée : il faut dans ce cas considérer la diffusion par les gouttelettes d'eau des nuages, qui sont en nombre important et dont la taille se distribue sur une échelle de $1 \mu\text{m}$ à $200 \mu\text{m}$ au plus. Ce sont les multiples diffusions que subit un rayon lumineux qui sont à l'origine du caractère non polarisé de la lumière issue d'un nuage, mais aussi de leur couleur généralement blanche. En outre, la diffusion de la lumière solaire par une gouttelette d'eau ne relève plus de la simple diffusion de Rayleigh mais de la diffusion de Mie découverte en 1908 par le physicien allemand Gustav Mie (Rostock 1868 – Fribourg 1957).

Enfin nous avons constaté que la lumière réfléchie par une surface d'eau était polarisée. La polarisation par réflexion se produit chaque fois que la lumière se réfléchit à la surface de séparation entre deux milieux diélectriques (air - eau, air - verre par exemple). On explique ces résultats en étudiant le comportement d'une onde électromagnétique à l'interface entre deux diélectriques. On peut en particulier montrer que, pour un angle d'incidence particulier i_B , dit angle de Brewster (David Brewster, physicien écossais : Jedburgh 1781 – Melrose 1868), tel que :

$$\tan i_B = \frac{n_2}{n_1}$$

où n_1 est l'indice du milieu incident, la lumière réfléchie est polarisée rectilignement suivant la direction perpendiculaire au plan d'incidence.

II.3- Applications

La polarisation de la lumière du ciel est utilisée par les abeilles pour s'orienter. L'autrichien Karl von Frisch (Vienne 1886 – Munich 1982, Prix Nobel de médecine 1973) a montré que les yeux des abeilles étaient sensibles à la direction de polarisation de la lumière. Comme la polarisation de la lumière provenant du ciel dépend de la position du Soleil, cette propriété est utilisée par les abeilles comme boussole.

Les photographes se servent de la polarisation de la lumière en utilisant des filtres polariseurs qui jouent le rôle d'analyseur : ils laissent passer la lumière naturelle non polarisée mais peuvent atténuer, plus ou moins fortement suivant leur orientation, la lumière polarisée. Ainsi, la polarisation partielle de la lumière réfléchie permet, par l'utilisation d'un filtre polarisant, d'éliminer les reflets sur un plan d'eau ou sur une vitre. On peut aussi utiliser la polarisation par diffusion de la lumière du ciel : un filtre polarisant permet d'assombrir le bleu du ciel et d'améliorer le contraste.

CONCLUSION

Ces quelques expériences simples mettent en évidence une caractéristique importante de la lumière, la *polarisation*, qui est la manifestation éclatante du caractère *vectoriel* de la variable physique qui la décrit.

O2

Rencontre étrange de la lumière polarisée et de la matière

On met en évidence des propriétés optiques remarquables de certains matériaux, dits *anisotropes* car leurs propriétés dépendent de la direction. On parle alors de *biréfringence* (ou double réfraction).

I.- OBSERVATIONS

I.1- Le comportement extraordinaire de la calcite

Posons un gros cristal de calcite (CaCO_3) de quelques centimètres d'épaisseur sur une feuille de papier portant un texte ou un dessin. On obtient deux images (Fig. 1) !

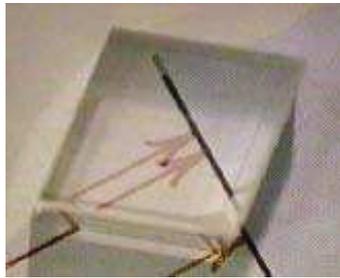


Fig. 1 - Images d'un dessin vu à travers un cristal de calcite de quelques centimètres d'épaisseur.

En tournant le cristal sur la feuille, on constate que l'une des deux images, qualifiée d'*extraordinaire*, tourne autour de l'autre, *ordinaire*, qui reste fixe.

Observons enfin les deux images à travers une feuille polarisante et faisons tourner ce polariseur autour de la direction d'observation : on remarque que l'on peut faire disparaître chacune des deux images pour deux orientations perpendiculaires du polariseur.

I.2- Un ruban de scotch comme vous ne l'avez jamais vu

Collons un ruban de scotch sur un diaphragme circulaire comme l'indique la figure 2.

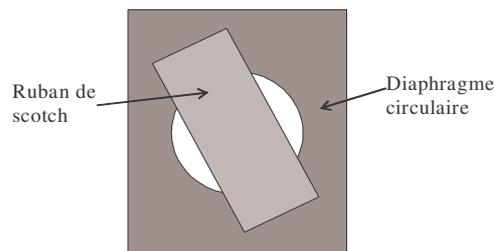


Fig. 2

La lumière issue d'une lampe est alors observée à travers un dispositif constitué de deux polariseurs entre lesquels est placé le diaphragme précédent (Fig. 3).

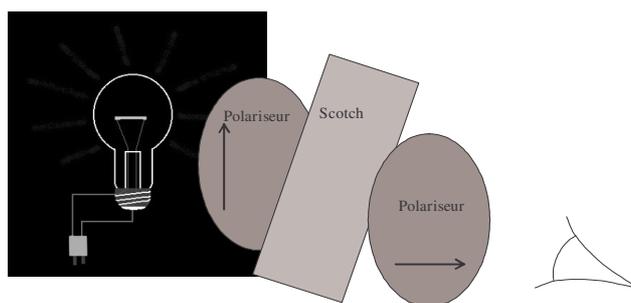


Fig. 3 - Observation d'une lampe à travers une lame de scotch disposée entre deux polariseurs croisés.

Les deux polariseurs doivent être croisés. Pour cela, en l'absence du ruban de scotch, on oriente l'un des polariseurs de façon à réaliser une intensité nulle. Quand on introduit la lame de scotch, la lumière est rétablie et le ruban apparaît coloré. Si on fait tourner dans son plan le diaphragme portant le ruban de scotch, on peut retrouver l'extinction pour deux positions du ruban qui correspondent à deux directions perpendiculaires. Le ruban est ensuite incliné d'environ 45° par rapport à l'une des positions précédentes. Noter alors la couleur du ruban de scotch. Faire tourner l'un des polariseurs et noter l'évolution des couleurs. Relever en particulier la couleur du ruban lorsque les deux polariseurs sont parallèles.

Si on remplace le ruban de scotch par une lame de verre (lame porte-objet de microscope), on peut vérifier que les observations précédentes traduisent bien une propriété remarquable du ruban de scotch.

I.3- Visualisation des forces

Dans le montage de la figure 3, remplaçons la lame de scotch par une pièce en plexiglas en forme de U (Fig. 4). Lorsqu'on serre les deux branches du « U », on voit apparaître des zones noires et des zones brillantes.

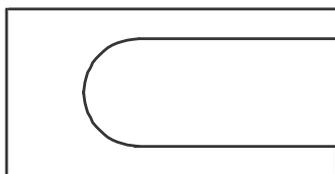


Fig. 4 - Pièce de plexiglas

II.- INTERPRÉTATION

II.1- La biréfringence de la calcite

Un milieu *anisotrope* peut transmettre deux ondes monochromatiques polarisées perpendiculairement, avec des vitesses différentes (ou avec des indices n différents). C'est la *biréfringence* ou de double réfraction. Un faisceau de lumière naturelle arrivant sur ce milieu va donc donner naissance à deux faisceaux. L'un se comporte comme la lumière dans un milieu isotrope usuel (du verre par exemple) ; c'est le faisceau *ordinaire*. L'autre a un comportement différent qui a surpris les physiciens habitués à travailler avec les milieux isotropes ; c'est le faisceau *extraordinaire*. Si le cristal suffisamment épais, ces deux faisceaux sont séparés, ce qui explique l'observation de deux images avec le cristal de calcite.

De tels matériaux permettent de fabriquer des polariseurs : si on peut éliminer l'un des faisceaux, il restera un faisceau de lumière polarisée rectilignement. Dans les milieux *dichroïques*, l'un des faisceaux est absorbé ; dans d'autres dispositifs, on élimine le faisceau ordinaire par réflexion totale.

II.2- Les couleurs des lames minces

On utilise souvent des lames taillées dans des matériaux anisotropes de faible épaisseur (très inférieur au millimètre). Pour de telles épaisseurs, les faisceaux ordinaire et extraordinaire ne sont pas séparés spatialement. On appelle *lignes neutres* de la lame les deux directions perpendiculaires correspondant aux deux directions de polarisation que la lame peut transmettre lorsqu'elle est éclairée sous incidence normale. Entre

polariseur et analyseur croisés, on détermine ces deux directions en tournant la lame pour chercher à rétablir l'extinction.

On explique les couleurs des lames minces par un phénomène d'interférence : on peut décomposer la polarisation incidente (définie par la direction du polariseur) suivant les directions des lignes neutres de la lame. Les deux faisceaux correspondant traversent la lame à des vitesses différentes et présentent donc à la sortie un déphasage. Pour obtenir des interférences il faut superposer des faisceaux ayant des directions de polarisation *non* perpendiculaires. Le second polariseur, jouant le rôle d'analyseur, donne deux faisceaux de polarisations parallèles déphasés. Si l'épaisseur de la lame n'est pas trop importante (de l'ordre de $100\ \mu\text{m}$ pour du quartz), il y a interférence destructive pour une longueur d'onde du domaine visible. On observe alors une plage uniformément colorée dont la couleur dépend de la longueur d'onde de la radiation qui a été retirée du faisceau par interférence. Cette teinte évolue en faisant tourner l'analyseur. Si le polariseur et l'analyseur sont parallèles, on observe une couleur complémentaire de celle obtenue avec polariseur et analyseur croisés, car leur addition donne du blanc.

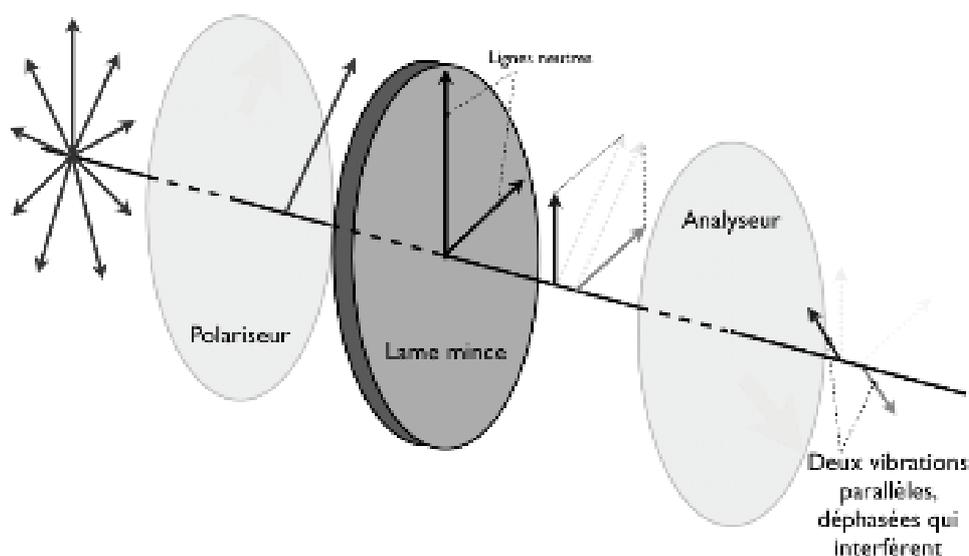


Fig. 5 - Interférence en lumière polarisée en utilisant des lames minces.

Si l'épaisseur de la lame est plus importante (quelques millimètres pour du quartz), la condition d'interférence destructive sera vérifiée pour plusieurs longueurs d'onde du domaine visible : on observera à l'œil une plage blanche, mais on parle de *blanc d'ordre supérieur*, car il manque plusieurs longueurs d'onde. Le spectre de cette lumière blanche est un spectre continu avec des raies noires pour chaque longueur d'onde pour lesquelles on vérifie la condition d'interférence destructive : le spectre est dit *cannelé*.

II.3- La photoélasticimétrie

Certains matériaux qui ne sont pas naturellement biréfringents peuvent le devenir sous l'action de contraintes extérieures, par exemple un champ électrique, un champ magnétique ou une contrainte mécanique. Un matériau isotrope transparent soumis à une force peut devenir biréfringent ; la biréfringence ainsi provoquée est proportionnelle à la force appliquée. Par exemple, avec une pièce en plexiglas placée, entre polariseur et analyseur croisés, on observe des lignes colorées qui reproduisent la distribution des contraintes mécaniques à l'intérieur de la pièce de plexiglas. La photoélasticimétrie est l'application de cette propriété : pour étudier le comportement mécanique d'une pièce, on en réalise une maquette en plexiglas avec laquelle on peut visualiser la distribution des contraintes et prévoir ainsi sa résistance mécanique en fonction de sa forme.

CONCLUSION

Des expériences simples peuvent laisser croire que les lois de Descartes de l'optique géométrique devraient être remises en cause. En fait, elles s'interprètent dans le cadre de la théorie électromagnétique de l'optique et ne font que traduire les propriétés particulières de certains matériaux, lesquelles sont à l'origine de nombreuses applications en optique ou en optoélectronique.

O3

Optique atmosphérique : le spectacle lumineux du ciel

On propose une expérience simple à réaliser, mettant en évidence les phénomènes physiques responsables de la couleur bleue du ciel et de la couleur rouge du Soleil couchant ou levant. On analyse aussi la polarisation du rayonnement bleu. Enfin, l'application à l'optique atmosphérique est discutée brièvement.

I.- OBSERVATIONS

I.1- Description du montage

Le matériel nécessaire pour la manipulation est le suivant : une lampe comme source lumineuse, un condenseur, un récipient parallélépipédique transparent, de l'eau, du lait, un polariseur et un écran blanc. Le récipient est rempli d'eau et éclairé par un faisceau lumineux quasi parallèle issu de l'ensemble {lampe – condenseur}, comme le schématise la figure 1. La longueur du récipient est $L = 30$ cm et le volume d'eau qu'il contient est $V = 7,65$ L.

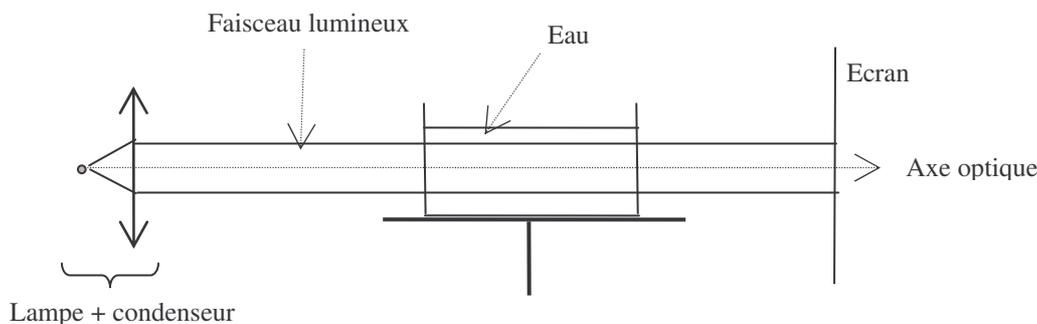


Fig. 1 - Montage optique : un récipient parallélépipédique transparent rempli d'eau est éclairé par un faisceau quasi parallèle d'une lumière blanche issue d'un ensemble lampe + condenseur.

I.2- Observation 1

Le liquide ne présente aucune coloration. On constate en regardant le récipient à travers un polariseur qu'il n'y a aucune variation de l'intensité lumineuse lorsqu'on fait tourner le polariseur, et ce quel que soit l'axe de visée.

I.3- Observation 2

Ajoutons 2 mL de lait dans le récipient et agitions. On observe alors nettement une légère *coloration bleutée* du mélange et l'intensité de la lumière observée à travers un polariseur *varie* selon sa direction de polarisation : on passe d'une intensité minimale à une intensité maximale pour deux directions perpendiculaires du polariseur. En outre, en se déplaçant, on constate que le phénomène est le plus marqué lorsque l'axe de visée est *perpendiculaire* à l'axe optique. Enfin, on perçoit sur l'écran une faible couleur *orangée*.

I.4- Observation 3

Ajoutons 3 mL de lait : la couleur orangée sur l'écran est plus vive, et on observe également une teinte orange dans le mélange du côté de l'écran. Le bleu est, lui, d'autant plus vif que l'on se rapproche de la face d'entrée du récipient. L'intensité de la lumière orange vue à travers le polariseur ne dépend pas de sa direction de polarisation.

Remarque : Il est important de respecter les proportions précédentes concernant les volumes de lait et d'eau, car une concentration de lait trop faible ou trop forte ne convient pas.

II.- INTERPRÉTATION

On explique ces résultats en considérant l'interaction entre la lumière *blanche* issue de la lampe et les électrons des molécules du lait. Les observations précédentes montrent que cette interaction dépend de la fréquence ; en outre, le rayonnement émergent est d'autant plus polarisé qu'il est observé *perpendiculairement* à l'axe optique.

II.1- Dépendance en fréquence

Lorsqu'un électron est excité par une lumière visible monochromatique, il vibre à la même fréquence que cette lumière et réémet un rayonnement de même fréquence dans toutes les directions. On dit que la lumière a été *diffusée* par l'électron (ou qu'elle a subi une *diffusion*) ; le rayonnement est qualifié de *dipolaire*. On peut montrer que la dépendance en fréquence ν (Hz) de l'intensité lumineuse diffusée satisfait à une loi en puissance quatrième de ν :

$$\text{Intensité de la lumière diffusée} \propto \nu^4 \propto \lambda^{-4}$$

avec $\lambda = c/\nu$ (m) la longueur d'onde dans le vide, et c la vitesse de la lumière dans le vide égale à 299792458 m.s⁻¹. Cette loi est connue sous le nom de *loi de Rayleigh*, du nom du physicien anglais John William Strutt devenu Lord Rayleigh (Essex 1842 – 1919).

Ainsi, chacune des fréquences de la lumière de la lampe est diffusée dans tout l'espace par les électrons des molécules du lait selon la loi précédente. Le bleu et le rouge ayant une longueur d'onde d'environ 450 nm et 650 nm respectivement, on en déduit que le bleu est environ quatre fois plus diffusé que le rouge, d'où la couleur bleutée de la solution de lait.

Cela explique aussi la couleur orangée sur l'écran : la lumière incidente perd par diffusion le bleu qu'elle contient originellement au fur et à mesure de sa propagation dans l'eau laiteuse ; au bout d'une certaine distance, il ne reste majoritairement que du rouge orangé.

L'intensité de ces couleurs dépend, comme le montrent les observations, de la concentration en molécules de lait. Plus elles sont en nombre important (mais limité cependant, comme l'indique la remarque précédente), plus les couleurs bleutées et orangées sont vives. En outre, le bleu est entièrement diffusé sur une distance plus courte et le mélange prend une couleur orangée lorsqu'on progresse vers la sortie du récipient. Soulignons, par ailleurs que l'observation de la coloration rouge orangé montre bien que cette couleur est, elle aussi, diffusée.

II.2- Étude de la polarisation

La série expérimentale précédente sur la polarisation a mis en évidence le processus de polarisation par diffusion. Cette propriété de la lumière diffusée s'explique, elle aussi, par la théorie du rayonnement dipolaire. L'expérience illustre bien la polarisation de la lumière bleue diffusée ; en outre, on voit que l'intensité du rayonnement est maximale lorsque la source émettrice et l'observateur sont dans des directions perpendiculaires. En transmission, le rouge est, comme la lumière blanche de la lampe, non polarisé.

III.- OPTIQUE ATMOSPHERIQUE

Les résultats expérimentaux précédents se transposent directement à l'atmosphère *sans* nuage : la lumière blanche de la lampe simule celle du soleil et les électrons des molécules de lait correspondent à ceux des molécules d'air.

III.1- Couleurs et luminosité du ciel sans nuage

La diffusion simple de la lumière solaire par les électrons des molécules d'air est, on l'aura compris, responsable de la couleur bleue du ciel. Naturellement, l'intensité de ce bleu est directement reliée à l'épaisseur d'atmosphère traversée : plus elle est faible, moins il y a de diffuseurs et plus le ciel est foncé ; à la limite le ciel est noir.

On peut également observer qu'en s'éloignant du zénith la couleur bleue s'atténue ; à l'horizon, le ciel est quasi blanc et très lumineux. Dans ce cas, le nombre de diffuseurs est si grand que la lumière subit un très

grand nombre de diffusions ; toutes les couleurs sont diffusées (les courtes longueurs d'onde étant favorisées) et finalement, lors de l'observation, elles se retrouvent mélangées : le ciel très lumineux apparaît donc blanc.

Au lever ou au coucher du Soleil, l'horizon prend des colorations rosées, jaunes, orange et rouges, d'autant plus vives que le Soleil est bas sous l'horizon. La diffusion du bleu (cf. expérience) explique cela. Soulignons, en outre, que ce rougissement est accentué par l'ozone, qui absorbe fortement dans le vert, et, d'autre part, par la présence de particules de quelque 100 nm (poussières, fumées, aérosols). La grande variabilité temporelle et spatiale de leur distribution se retrouve dans le spectacle changeant de l'aube ou du crépuscule.

Le tableau suivant donne, pour chaque couleur, l'intensité observée au sol relativement à celle de la lumière incidente au sommet de l'atmosphère : ces fractions sont calculées selon la théorie de Rayleigh. Ce tableau montre que le phénomène illustré par l'expérience précédente rend compte du rouge du couchant (levant) et de la blancheur du soleil au zénith.

Couleur	Soleil au zénith	Aube/Crépuscule
Rouge	96%	21%
Vert	90%	2.4%
Bleu	76%	0.0065%

III.2- Polarisation du ciel

La lumière du ciel est polarisée au maximum lorsqu'on regarde dans une direction perpendiculaire à celle du Soleil. Cependant, la polarisation n'est pas parfaite (80% environ) en raison notamment des effets dus à la diffusion multiple. Cette dernière est notamment responsable de la présence dans le ciel de trois régions de polarisation nulle appelées *points neutres*. Ces points, situés sur le cercle passant par le Soleil et le zénith (cercle solaire vertical) sont le point de Brewster Br, ($10^\circ - 20^\circ$) sous le Soleil, le point de Babinet Ba, ($10^\circ - 20^\circ$) au-dessus du Soleil et le point d'Arago A, symétrique de Br par rapport à la droite zénithale (Fig. 2) :

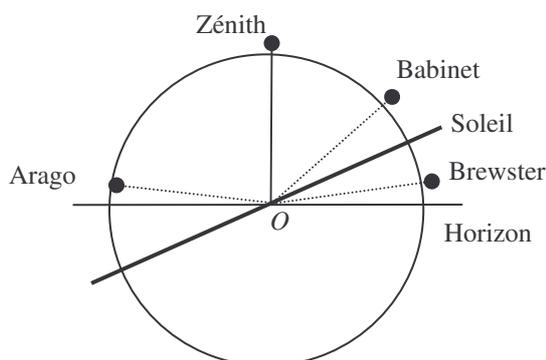


Fig. 2 - Points neutres de polarisation du ciel découverts respectivement par Babinet (Ba), Brewster (Br) et Arago (A). Ba et Br sont respectivement à environ $10^\circ - 20^\circ$ au-dessus et au-dessous du Soleil sur le cercle solaire vertical.

Remarque : François Arago (Estagel 1786 – Paris 1853) ; Jacques Babinet (Lusignan 1794 – Paris 1872).

CONCLUSION

Retenons la loi de Rayleigh en λ^{-4} sur la diffusion simple qui explique la couleur bleue du ciel, sa polarisation et la rougeur de l'aube ou du crépuscule. L'atmosphère fournit un immense laboratoire naturel d'optique où l'on peut apercevoir, si l'on est attentif, les couleurs du ciel, les points de polarisation nulle et d'autres beaux et curieux phénomènes que nous n'avons pas abordés ici...

EL1

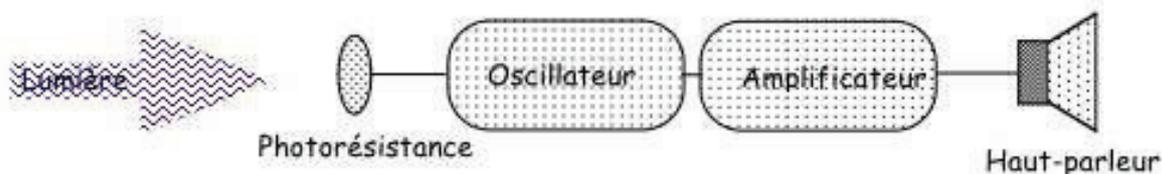
Ecouter la lumière et la température

On se propose de réaliser un dispositif permettant de détecter des variations d'éclairement ou de température, et de les transformer en variations de fréquence (hauteur) d'un son.

De nombreux composants électroniques possèdent des propriétés qui peuvent dépendre d'un paramètre extérieur. Par exemple, une thermistance voit sa résistance varier en fonction de la température, et, une photorésistance possède une résistance qui dépend fortement de l'éclairement. Une modification de ces paramètres extérieurs entraîne donc une variation de la résistance du composant, variation que nous nous proposons de mettre en évidence.

I.- MANIPULATION

La détection de ces modifications peut être effectuée directement à l'aide d'un ohm-mètre par exemple, mais on peut également détecter la variation de cette résistance par l'intermédiaire d'un montage électronique, lequel transforme la modification de résistance en une variation de la fréquence d'un son audible. Le montage proposé se compose d'un oscillateur dont la fréquence d'oscillation dépend directement de la résistance étudiée. La figure suivante est un schéma synoptique du montage.



Nous constatons qu'en touchant du doigt la thermistance (on modifie ainsi sa température), la fréquence des oscillations change, ce qui se traduit par un son plus aigu. De même, en passant la main devant la photorésistance (on modifie ainsi son éclairement), le son émis par l'oscillateur devient plus aigu.

II.- INTERPRÉTATION

L'oscillateur utilisé est construit autour d'un amplificateur opérationnel fonctionnant en régime de commutation, de sorte que la *période* des oscillations est directement *proportionnelle* à la *résistance* étudiée. Par conséquent, la fréquence des oscillations, qui donne la hauteur du son émis, est inversement proportionnelle à cette résistance.

Prenons l'exemple de la photorésistance qui est un dipôle passif, linéaire et symétrique : lorsqu'elle est éclairée, sa résistance diminue considérablement, donc la fréquence des oscillations augmente : le son entendu devient plus aigu. Au contraire, lorsqu'on passe la main devant la photorésistance, sa résistance augmente et le son devient plus grave ; précisément, elle passe de quelques $M\Omega$ dans l'obscurité à quelques centaines d'ohms sous un éclairement photométrique de 500 lux ($1 \text{ lux} \approx 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ W.m}^{-2}$ à une longueur d'onde de 550 nm).

De même, lorsque l'on pose la main sur la thermistance, le son émis par l'oscillateur devient plus aigu, en raison de la diminution de la résistance de ce composant provoquée par l'élévation de température. Ici, les variations sont plus faibles : quelques centaines d'Ohm autour d'une valeur nominale de 10 k Ω à température ambiante.

Les applications de ces résultats sont nombreuses. Par exemple, on peut citer la réalisation de capteurs utilisés dans différents domaines pour la mesure ou la détection d'échauffements anormaux (alarmes) ou d'un seuil d'obscurité pour déclencher l'éclairage public.

CONCLUSION

Il convient de retenir l'importance de l'électronique, dans la mesure physique, illustrée ici sur les exemples de la température et de l'éclairage lumineux. En effet, de nombreux composants électroniques sont sensibles aux conditions extérieures (température, éclairage). Les nombreuses applications courantes (alarmes, détecteurs de lumière) témoignent de cette place importante occupée par l'électronique.

EL2

Transmission d'un signal sonore par de la lumière

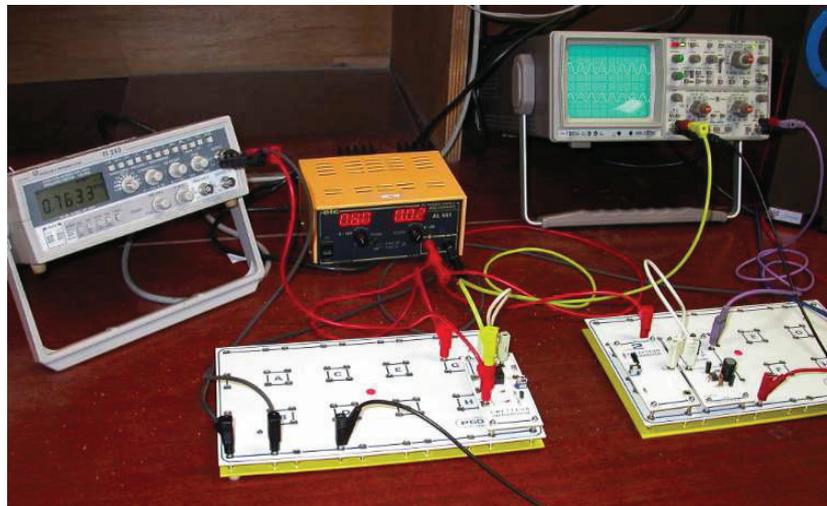
L'information et sa transmission tiennent une place majeure dans la vie courante comme en témoignent les importants moyens de communication (Internet, téléphonie mobile, satellites, télévision, etc.). Les ondes électromagnétiques sont principalement les vecteurs (ou *porteuses*) de l'information en raison notamment de leur grande vitesse de propagation. Par ailleurs, la recherche de la transmission d'un maximum d'informations sur une même porteuse nécessite d'utiliser des fréquences de plus en plus élevées (en effet, un signal occupe une certaine bande de fréquence : 3 KHz pour une communication téléphonique, 15 kHz pour la musique et 5 MHz pour la télévision). Dans ce contexte, on comprend donc l'intérêt de l'optique où les fréquences des ondes sont de l'ordre de 10^{14} Hz (en théorie, une telle voie de communication permet de transporter 50 millions de canaux de télévision !).

Dans cette manipulation, il s'agit de transmettre l'information contenue dans un signal électrique par l'intermédiaire d'un faisceau lumineux. Le schéma synoptique est représenté ci-dessous.



Schéma synoptique de la transmission d'une information, contenue dans un signal électrique, par un signal optique.

Le montage électrique utilisé est celui de la photo suivante.



Le signal électrique E (Émission) à transmettre est par exemple celui issu d'un microphone, ou de la sortie casque d'un appareil audio (baladeur, poste de radio) ; sa fréquence est de l'ordre du kHz et son amplitude de 500 mV. E est ensuite utilisé pour moduler un signal optique émis par une diode électroluminescente. Le flux lumineux, émis par la diode électroluminescente, est ensuite reçu par une photodiode qui transforme ce flux lumineux en un signal électrique R (Réception) contenant la même information que le signal initial E. Le signal R recueilli au niveau de la photodiode étant faible, on l'amplifie afin de pouvoir le restituer convenablement par l'intermédiaire d'un haut-parleur.

Remarque : Précisons que le signal optique transportant l'information est ici transmis en espace libre. On pourrait aussi le transmettre par fibre optique.

T1

Diffusion thermique : chaleur et température, un couple infernal

La thermodynamique est la science de la *chaleur* et de la *température*. Bien que ces deux concepts, chaleur et température, soient intimement liés, il convient de ne pas les confondre : en bref, le premier, noté Q , traduit un transfert d'énergie entre deux points d'un système, alors que le second, noté T , exprime l'énergie moyenne d'agitation des atomes et des molécules situées dans les voisinages respectifs de ces points.

Ce transfert d'énergie Q est plus ou moins facilité par le milieu matériel qui sépare les deux points considérés. Si ce milieu est au repos, ce transfert s'effectue uniquement par *diffusion* ou *conduction thermique*. C'est ce que nous proposons d'étudier.

I.- EXPERIENCE D'INGEN HOUSZ

Commençons par une expérience historique, celle du physicien hollandais J. Ingen Housz, qui date de 1789. Plusieurs tiges métalliques de forme géométrique identique, mais de constitutions différentes, sont fixées, par l'une des extrémités, sur la paroi latérale d'un récipient. Ce dernier contient de l'eau chaude, chauffée par une bouilloire électrique qui sert à augmenter sa *température*, précisément l'*énergie moyenne d'agitation* de ses molécules. Les tiges sont enduites de cire sur toute leur longueur (Fig. 1).

Cette énergie d'agitation se transmet de proche en proche aux différentes parties des tiges : c'est la *chaleur*.

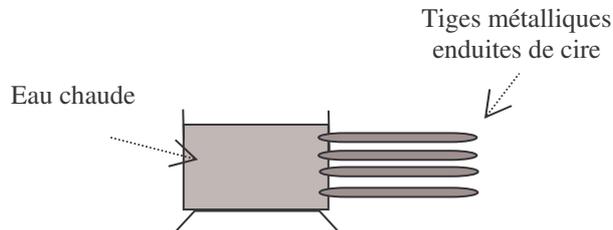


Fig. 1 - Expérience d'Ingen Housz : des bâtons métalliques de constitutions différentes sont enduits de cire et mis en contact, par l'une des extrémités, à la paroi d'une casserole contenant de l'eau chaude.

On constate que la longueur de cet enduit varie avec la nature du matériau de la tige. Ces matériaux transmettent donc différemment l'énergie d'agitation des particules qui les constituent. Aussi caractérise-t-on cette aptitude par le coefficient de *conduction thermique* λ . En unité du système international (watt par mètre et par Kelvin, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), ce coefficient vaut :

Milieu	Cuivre	Acier	Verre	Béton	Corps humain	Bois	Laine de verre	Air	Vide
λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	389	16	1,2	0,92	0,5	0,23	0,04	0,023	0

Coefficient de conduction thermique pour quelques milieux. La diffusion nécessitant un milieu matériel comme support, le vide possède un coefficient nul.

II.- CONTACT THERMIQUE

L'analyse introductive précédente permet de comprendre des expériences quotidiennes, comme la sensation de chaud et de froid que l'on ressent lorsqu'on touche un matériau. Ce qui importe évidemment est la

température de la *surface de contact* T entre les deux matériaux de conductivités différentes. Si l'on suppose pour simplifier le régime stationnaire, cette température de contact a pour expression :

$$T = \frac{\lambda_1 T_1 + \lambda_2 T_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

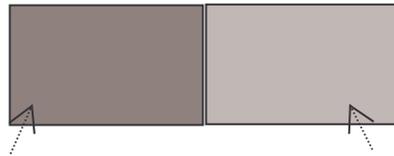
Milieu 1 (λ_1, T_1)Milieu 2 (λ_2, T_2)

Fig. 2 - Contact de deux milieux de conductivités et de températures différentes.

A haute température du bois ou du cuivre, 333 K (60 °C) :

Contact main - bois : $T_1 = 293$ K (20 °C), $\lambda_1 = 0,5$ W.m⁻¹.K⁻¹ et $T_2 = 333$ K (60 °C), $\lambda_2 = 0,23$ W.m⁻¹.K⁻¹, d'où :
 $T = 307$ K (34 °C)

Contact main - cuivre : $T_1 = 293$ K (20 °C), $\lambda_1 = 0,5$ W.m⁻¹.K⁻¹ et $T_2 = 333$ K (60 °C), $\lambda_2 = 418$ W.m⁻¹.K⁻¹, d'où :
 $T = 333$ K (60 °C)

Ainsi, on peut prendre un morceau de bois chaud à pleine main, alors que l'on se brûle avec un morceau de cuivre.

A basse température du bois ou du cuivre, 273 K (0 °C) :

Contact main - bois : $T_1 = 293$ K (20 °C), $\lambda_1 = 0,5$ W.m⁻¹.K⁻¹ et $T_2 = 273$ K (0 °C), $\lambda_2 = 0,23$ W.m⁻¹.K⁻¹, d'où :
 $T = 287$ K (14 °C)

Contact main - cuivre : $T_1 = 293$ K (20 °C), $\lambda_1 = 0,5$ W.m⁻¹.K⁻¹ et $T_2 = 273$ K (0 °C), $\lambda_2 = 418$ W.m⁻¹.K⁻¹, d'où :
 $T = 273$ K (0 °C)

Ainsi, la sensation de froid est donc nettement plus importante avec le cuivre qu'avec le bois.

L'explication est liée au transfert thermique entre les deux milieux : celui-ci est plus grand vers le corps le plus conducteur et plus faible dans l'autre sens, d'où la sensation de chaud ou de froid lorsqu'on touche un métal fortement conducteur à température élevée et température basse respectivement.

Remarque : En réalité, le contact thermique est réalisé en régime non stationnaire, ce qui implique de remplacer dans le calcul le coefficient de conductivité λ par celui d'effusivité thermique $b = (\lambda \rho c_v)^{1/2}$ où ρ et c_v sont respectivement la masse volumique et la capacité thermique massique à volume constant. Cependant, cela ne change en rien la conclusion précédente.

CONCLUSION

Retenons les notions différentes, mais liées, de température et de chaleur ; la première étant l'énergie moyenne d'agitation des molécules d'un milieu, la seconde un transfert de cette énergie moyenne d'agitation entre deux points d'un milieu de température non uniforme. Cette différence est parfaitement illustrée par l'expérience sur la sensation de chaud et de froid lorsqu'on touche un matériau. Associée à l'expérience d'Ingen Housz, nous avons également caractérisé ce transfert d'énergie dans un milieu par sa conductivité thermique, notée λ et exprimée en W.m⁻¹.K⁻¹. Quelques ordres de grandeurs de λ doivent être retenus.

T2

Transitions de phase ou la matière dans tous ses états

L'expérience courante montre clairement qu'un corps pur peut exister, selon les conditions, sous plusieurs *états* différents, ou *phases*, c'est-à-dire sous différentes parties *homogènes* caractérisées par les mêmes propriétés physiques et chimiques. Ainsi, l'eau, par exemple, existe sous les états solide, liquide et gazeux. En évoluant d'un état d'équilibre à un autre, on assiste parfois à une profonde et soudaine modification de certaines des propriétés physiques (mécaniques, électriques, optiques, magnétiques, etc.) du corps pur : il subit un *changement d'état* ou une *transition de phase*. Ces phénomènes sont omniprésents dans la nature : la solidification de l'eau, sa fusion ou encore sa vaporisation sont quotidiennement rencontrés et bien connus ; le gel d'un lac, la fonte de glaçons, le séchage d'un linge par évaporation et la formation des nuages fournissent quelques exemples.

On se propose dans cette deuxième série d'expériences relative à la thermodynamique d'illustrer quelques propriétés simples de certaines transitions de phase. En raison du vaste champ de possibilités offert, nous limitons principalement notre démonstration aux changements d'état impliquant les phases de l'eau. Enfin, dans une dernière manipulation, nous montrons une transition de phase, bien moins connue que les précédentes, impliquant les propriétés magnétiques du fer.

I.- CHUTE DE PRESSION DANS LA TRANSITION EAU VAPEUR – EAU LIQUIDE

Sous certaines conditions, la liquéfaction de la vapeur d'eau s'accompagne d'une chute importante de pression qui peut être mise en évidence à l'aide de l'expérience suivante. Celle-ci possède toutes les qualités d'une belle manipulation de physique : elle est simple, peu coûteuse, facile à réaliser, originale et impressionnante !

I.1- Protocole expérimental

Chauffons, par exemple à l'aide d'une plaque chauffante, une cannette métallique (aluminium) ouverte à l'air libre et contenant une petite quantité d'eau, environ 5 mm de hauteur (Fig. 1a). Au bout de quelques minutes, l'eau change d'état physique : elle se transforme en vapeur (*vaporisation*). En raison de l'ouverture de la cannette, sa pression p_v est en équilibre avec la pression atmosphérique $p_a = 10^5$ Pa (Fig. 1b).

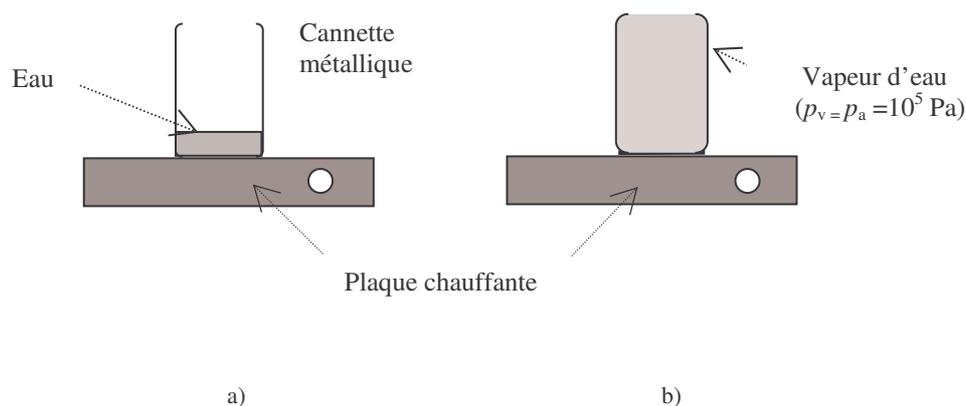


Fig. 1 - Chauffage de quelques millimètres d'eau dans une cannette en aluminium. Le chauffage se fait à la pression atmosphérique constante ; à la température de vaporisation (environ 100 °C), l'eau se transforme en vapeur.

Après s'être assuré que la vapeur remplit en grande partie la cannette chaude, on saisit celle-ci à l'aide de pinces et on la retourne dans un petit cristalliseur rempli d'eau fraîche de telle sorte que son ouverture soit *submergée* (Fig. 2). On constate alors une déformation impressionnante de la cannette accompagnée d'un bruit sourd : la cannette est fortement comprimée !

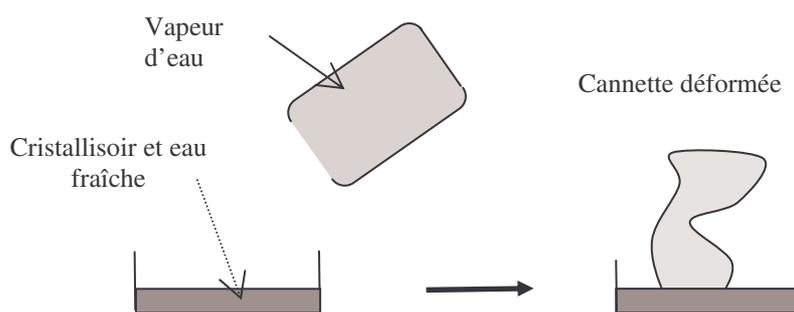


Fig. 2 - Déformation de la cannette lors du contact avec l'eau froide.

I.2- Interprétation

Cette expérience met en évidence la forte diminution de pression dans la cannette, lors de la transition de phase eau vapeur – eau liquide (*liquéfaction*), ainsi que les effets de la pression atmosphérique. La compression est due, en effet, à une différence de pression importante entre l'intérieur de la cannette et l'air atmosphérique ambiant, comme en témoigne la spectaculaire déformation. L'interprétation est simple : c'est le contact soudain avec l'eau froide qui provoque une rapide liquéfaction de la vapeur d'eau ; la forte diminution du nombre de molécules dans la vapeur dans la cannette entraîne cette chute importante de la pression. On pourrait naturellement se demander par ailleurs pourquoi l'eau, dans le cristallisoir, ne monte pas dans la cannette sous l'influence de la pression atmosphérique. C'est en raison du caractère soudain du refroidissement et de la liquéfaction : la déformation de la cannette est le phénomène le plus rapide.

Remarque : Soulignons que l'expérience est d'autant plus impressionnante qu'initialement il y a peu d'eau dans la cannette et que la vapeur d'eau la remplit complètement.

II.- LE BOUILLANT DE FRANKLIN

La coexistence à l'équilibre des phases liquide et vapeur d'un corps pur se produit à une certaine température pour une pression fixée ; cette pression d'équilibre est la pression de *vapeur saturante*, notée p_s . Par exemple, la vapeur d'eau et l'eau liquide coexistent en équilibre pour une température de 100 °C à pression atmosphérique. Se pose alors naturellement la question de la valeur de cette température d'équilibre liquide/vapeur pour une certaine pression. La manipulation suivante répond qualitativement à cette question en précisant la manière dont évolue p_s en fonction de la température.

II.1- Description du montage et observation expérimentale.

De l'eau dans un ballon, ouvert à l'air libre, est portée, à l'aide d'une plaque chauffante ou d'un bec Bunsen, à la température de 100 °C. Une fois l'ébullition obtenue, le ballon est éloigné de la source thermique puis bouché pour enfermer l'eau avec sa vapeur à une température T inférieure à 100 °C ; l'ensemble est alors retourné. Au bout d'une certaine durée, si on appose sur la partie supérieure du ballon un linge mouillé, on constate une reprise de l'ébullition dans le ballon (Fig. 3).

II.2- Interprétation et conclusion

La pose du linge mouillée sur la partie du ballon en contact avec la vapeur provoque une liquéfaction de celle-ci, ce qui entraîne une diminution de la pression dans le ballon (cf. I). La reprise de l'ébullition signifie que la pression a suffisamment diminué pour égaler la pression de vapeur saturante à la température T inférieure à 100 °C. On en déduit que la pression de vapeur saturante est une fonction *croissante* de la température.

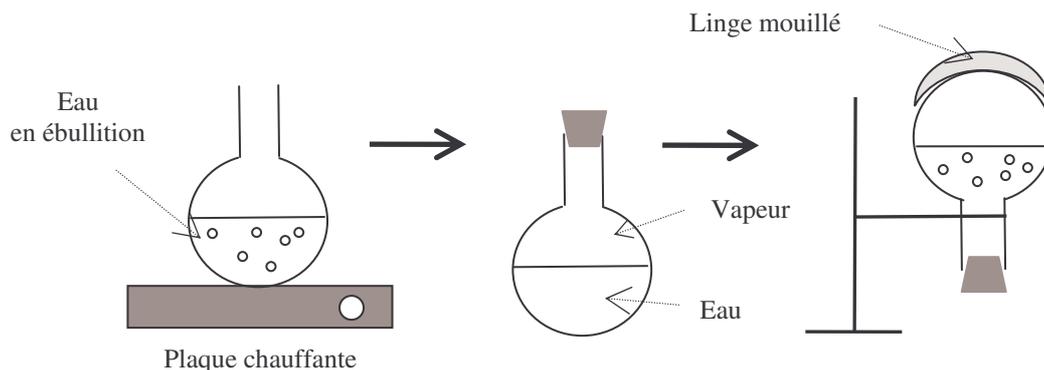


Fig. 3 - Expérience du bouillant de Franklin : de l'eau dans un ballon est portée à ébullition, éloignée de la source thermique, puis enfermée avec sa vapeur à une température inférieure à 100 °C. Après quelques minutes, un linge mouillé, posé sur la partie supérieure du ballon retourné, provoque une reprise de l'ébullition.

Remarque : Cette expérience est due au physicien américain Benjamin Franklin (Boston 1706 – Philadelphie 1790) qui est aussi connu pour ses études en électricité, notamment la découverte de l'effet de pointe et l'invention du paratonnerre. Il fut également un homme politique brillant ; élu député du premier Congrès américain, il rédigea, avec T. Jefferson et J. Adams, la déclaration d'indépendance des États-Unis en 1776.

III.- CHAUFFAGE D'UN CLOU EN FER

Cette expérience met en évidence une transition de phase impliquant les propriétés *magnétiques* du fer.

III.1- Description du protocole et observation

Le montage est celui schématisé sur la figure 4. Un clou en fer est suspendu, par l'intermédiaire d'un fil, en un point A d'un bâti formant ainsi un pendule simple ; un aimant, fixe, est lui aussi, suspendu en un point B d'un autre bâti. Initialement, le clou est attiré par l'aimant (Fig. 4a).

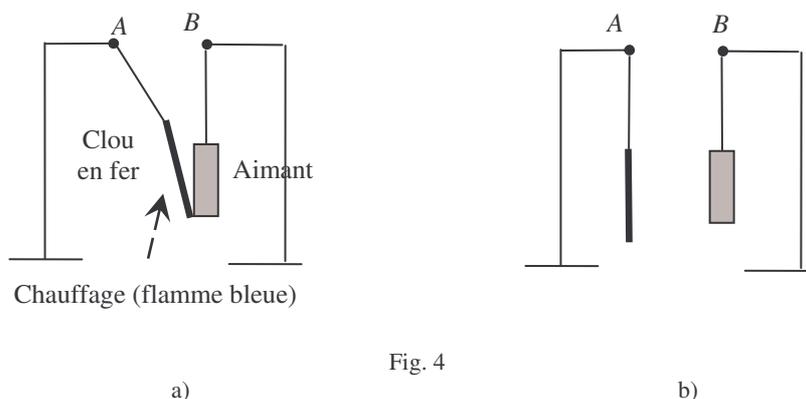


Fig. 4

a) - Chauffage d'un clou en fer initialement attiré par un aimant.

b) - Le clou suffisamment chauffé n'est plus attiré par l'aimant. Après une courte durée nécessaire à son refroidissement, il est de nouveau attiré par l'aimant et retrouve sa position initiale (cf. a).

En chauffant le clou, à la flamme bleue d'un chalumeau, on observe que lorsqu'une certaine température est atteinte, l'attraction magnétique cesse : le clou s'écarte de l'aimant et de la source thermique et oscille autour de sa position d'équilibre verticale (Fig. 4b). En refroidissant, il subit de nouveau l'attraction magnétique de l'aimant et retrouve sa position initiale. On peut, une fois de plus, augmenter la température du clou et constater une nouvelle séparation avec l'aimant, puis une nouvelle attraction consécutive à une diminution de température ; ainsi de suite, de façon cyclique, un chauffage et un refroidissement successifs du clou modifient sa configuration avec l'aimant.

III.-2- Interprétation

On interprète ce comportement par une transition de phase relative aux propriétés magnétiques du fer. En dessous d'une certaine température T_C , dite *température de Curie* (en l'honneur du physicien français Pierre Curie [Paris 1859 – 1906]), égale à 1043 K, le fer possède une aimantation spontanée ; on dit qu'il est dans un état *ferromagnétique*. Au-dessus de T_C , le fer perd cette aimantation macroscopique et devient *paramagnétique* : il est constitué d'aimants microscopiques, qui en raison de la température élevée, ne peuvent pas s'orienter dans une même direction moyenne pour donner une aimantation moyenne macroscopique ; le clou n'est alors plus attiré par l'aimant.

Le ferromagnétisme est une propriété des corps *condensés* ; voici quelques ordres de grandeurs de T_C pour certains métaux et alliages :

Matériaux	Co	Fe	Ni	MnOFe ₂ O ₃	CrO ₂	MnAs
T_C (K)	1388	1043	627	573	386	318

Remarque : L'unité de température internationale est le Kelvin ; la conversion en degrés Celsius se fait selon la relation suivante :

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$$

CONCLUSION

Retenons la notion de transition de phase d'un corps pur comme un changement soudain et important de ses propriétés physiques, ainsi que son omniprésence dans la nature.

Sur l'exemple bien connu du corps pur eau, nous avons montré expérimentalement, quelques-unes de ses propriétés relatives à ses changements d'états physiques (solide, liquide et gazeux), à savoir :

- 1- la chute importante de pression, dans un système clos (la cannette), lors de la liquéfaction de sa vapeur,
- 2- l'augmentation de la pression de vapeur saturante en fonction de la température (équilibre liquide/vapeur) ;

Enfin, retenons également le changement d'état magnétique du fer en fonction de la température.

