



PHYSIQUE

COURS DE BASE
ELECTRONIQUE

EURELEC
(2)

COURS DE BASE ELECTRONIQUE
Physique 2

1 – LE MONDE DES VIBRATIONS

Nous vivons au milieu d'objets qui vibrent. Tout vibre : les murs de la maison où nous habitons, à cause des bruits, l'air qui porte notre voix, les moyens de transport, les ateliers, le sol quand il y a un tremblement de terre, l'eau des vagues et tant d'autres objets, petits et grands, qu'il est impossible de les énumérer tous.

La vibration est un peu la respiration et la voix de la matière. Si nous réussissions à enregistrer et étudier les vibrations qui animent continuellement les particules ultra-microscopiques de la matière, nous parviendrions à connaître les propriétés des diverses substances, tout comme le mécanicien connaît le fonctionnement du moteur d'après le bruit qu'il fait.

De nombreux phénomènes que nous étudierons au cours des leçons théoriques, ont pour origine des types de vibrations particulières. Nous allons donc dès maintenant nous efforcer d'examiner comment se produisent, et comment surviennent en général les mouvements vibratoires.

L'idée de la vibration peut nous être donnée de manière très simple par une petite lame d'acier trempé serrée dans un étau, comme le montre la figure 1.

Tout le monde sait ce qui se produit lorsqu'on fléchit la lame et qu'on la relâche brusquement : la lame se met à vibrer, et prend pendant un certain temps un mouvement de "va et vient" autour de la position verticale.

Or, nous pourrions nous demander pourquoi la lame ne retourne pas tout simplement dans la position verticale, ou pourquoi elle ne reste pas carrément pliée.

Qu'elle ne reste pas pliée peut s'expliquer, si l'on se souvient que l'acier trempé a la propriété d'être élastique. Bien d'autres substances ont cette même propriété : un ressort tendu, ou bien comprimé, et qu'on relâche, reprend sa forme initiale parce qu'il est élastique ; une bille de verre qui tombe sur un sol en marbre rebondit parce qu'elle est élastique ; l'air comprimé dans un cylindre par un piston repousse ce piston vers sa position de départ parce que l'air comprimé est aussi élastique.

Nous pourrions citer de nombreux autres cas de corps ou de substances élastiques, mais ce n'est pas nécessaire, car l'élasticité est une propriété assez commune et connue de tous.

Il reste encore à répondre à la question : pourquoi, en retournant vers la verticale la lame ne s'arrête-t-elle pas, mais va-t-elle plus loin ?

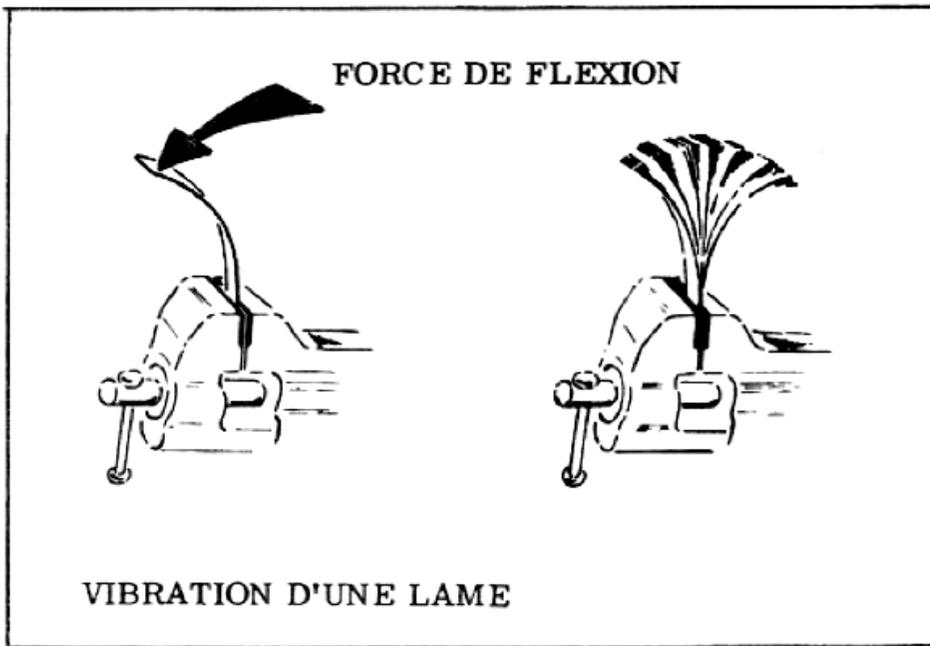


Figure 1

La raison de ce comportement a déjà été illustrée de façon assez détaillée au cours de la précédente leçon de physique : LA LAME NE PEUT PAS S'ARRÊTER A CAUSE DE L'INERTIE DE MOUVEMENT ACQUISE PENDANT SON RETOUR.

C'est donc par inertie qu'elle dépasse la verticale, et malgré une certaine résistance, elle acquiert une nouvelle flexion, en direction opposée à la précédente.

Le mouvement se poursuit alternativement d'un côté et de l'autre pendant un certain temps ; il pourrait continuer sans fin s'il n'y avait pas de frottement, dont le principal est dû à la résistance de l'air.

Ce mouvement, constitué par un continuuel "va et vient" faisant repasser la lame par les mêmes positions à des intervalles de temps réguliers, a quelque chose qui rappelle le mouvement circulaire que nous avons vu dans l'expérience de la bille (Physique 1, Figure 5) et le mouvement circulaire des satellites artificiels.

Ce rappel n'est pas simplement occasionnel, car en réalité ces deux types de mouvements, l'un vibratoire et l'autre circulaire à vitesse constante, appartiennent à une même catégorie qui est précisément celle des MOUVEMENTS PERIODIQUES.

L'étroite parenté entre ces deux mouvements, qui pourtant paraissent si dissemblables, peut être démontrée en imaginant une expérience facile qui transforme un mouvement circulaire en mouvement vibratoire.

Supposons que nous prenions le disque dont nous nous sommes déjà servi pour étudier le mouvement circulaire au cours de la précédente leçon de physique, et que nous disposions comme le montre la figure 2 un faisceau de lumière et un écran recevant l'ombre de la bille. En faisant tourner le disque à une vitesse constante, on maintient la bille en mouvement circulaire uniforme ; on peut alors observer que l'ombre de la bille se déplace sur l'écran linéairement d'avant en arrière, en un mouvement, semblable à celui de la lame vibrante.

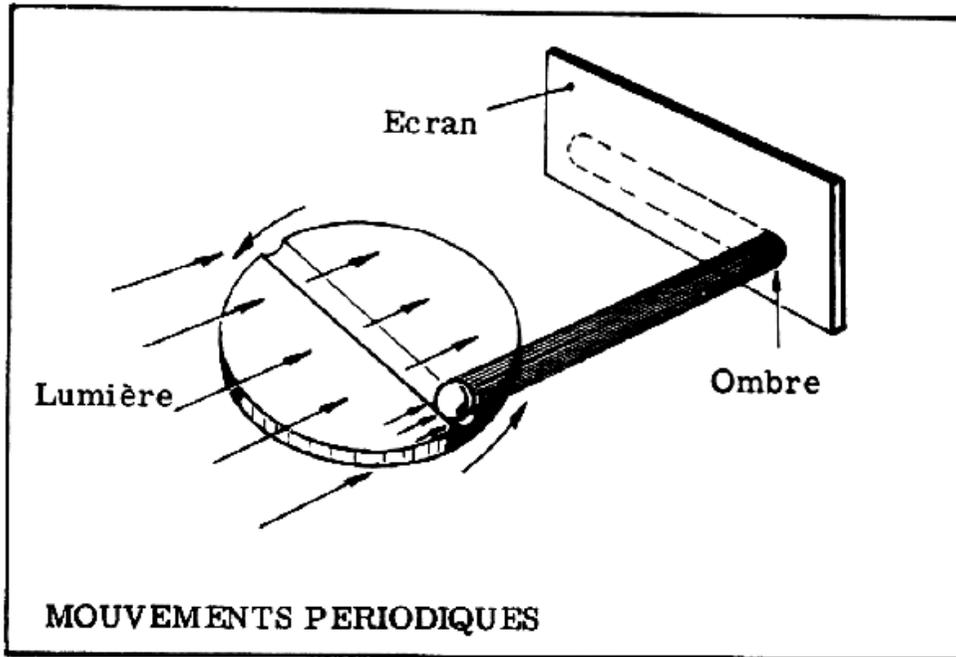


Figure 2

Cet appareil très simple a donc la propriété de transformer le mouvement circulaire en mouvement vibratoire, démontrant par là-même le lien étroit existant entre ces deux mouvements périodiques. Signalons que **LORSQU'ON PEUT FAIRE CORRESPONDRE, INSTANT PAR INSTANT, UN MOUVEMENT VIBRATOIRE A UN MOUVEMENT CIRCULAIRE UNIFORME** (comme dans le cas que nous venons d'examiner), **LE MOUVEMENT VIBRATOIRE EST APPELE MOUVEMENT HARMONIQUE.**

Nous verrons plus loin de nombreux autres exemples de mouvements harmoniques ; maintenant nous allons examiner un autre phénomène qui nous servira à faire ressortir un aspect du mouvement vibratoire tout aussi intéressant que le précédent.

PHYSIQUE 2

5

Chacun de nous a déjà observé ce qui se passe quand on jette un caillou à la surface d'une étendue d'eau parfaitement tranquille.

Tout autour du point frappé par le caillou il se forme de nombreux cercles qui se suivent, en s'élargissant et en s'éloignant de plus en plus.

Cette perturbation est représentée sur la figure 3-a ; il faut toutefois avoir présent à l'esprit, qu'il est impossible de reproduire sur le dessin le mouvement d'éloignement, à partir du point central animant la vague et méritant une considération particulière.

En premier lieu il convient de préciser que le mouvement d'éloignement, en un certain sens, n'est pas réel, mais illusoire. En effet, ce qui s'éloigne n'est pas l'eau : celle-ci reste toujours à la même place comme on le voit en observant un bouchon, ou une feuille, balloté par une vague : ce qui s'éloigne est l'ondulation de l'eau, c'est-à-dire le soulèvement et l'abaissement de son niveau, succédant l'un à l'autre.

Ceci étant précisé, il nous reste à expliquer pourquoi cette eau se met dans cet état d'agitation, et pourquoi cette agitation continue à se reproduire spontanément pendant quelque temps, en partant régulièrement du point où est tombé le caillou.

Que l'eau soit perturbée par le caillou au point de sa chute peut se comprendre facilement : en ce point l'eau se trouve chassée vers le bas, et donc une certaine quantité se déplace vers le bas, tandis qu'autour, une autre quantité est poussée vers le haut.

Il se produit là un fait semblable à ce que nous avons vu dans le cas de la lame de la figure 1, lorsqu'on lui applique la force de flexion.

D'abord l'eau est parfaitement tranquille et toute entière au même niveau (tout comme la lame se maintenait primitivement immobile dans sa position de repos) ; il est donc naturel que, tout de suite après, lorsque le

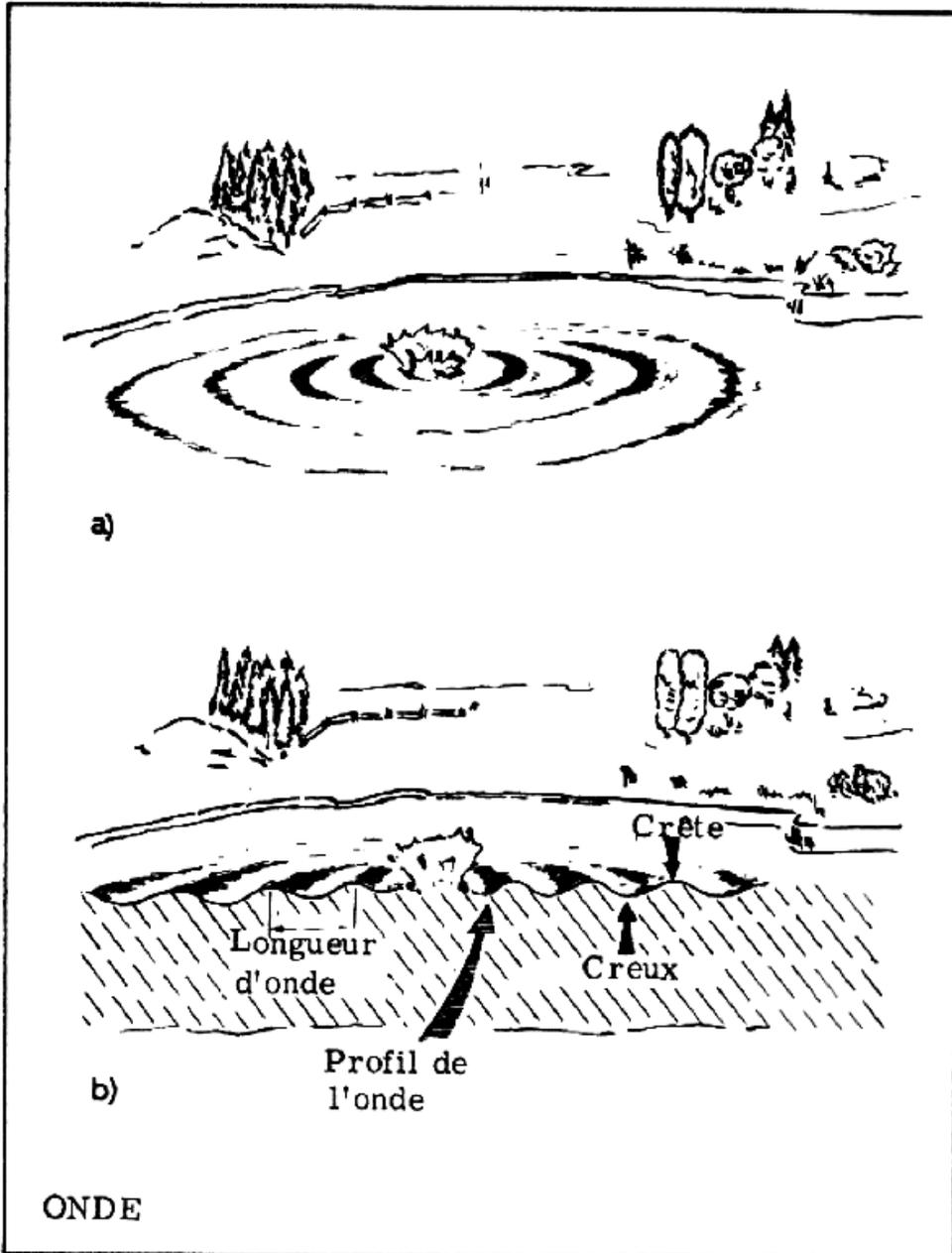


Figure 3

caillou est déjà en train de couler au fond, elle tend à retourner vers sa position de départ.

Nous avons déjà vu dans l'exemple de la lame vibrante que, à cause de l'inertie, elle ne peut pas se contenter de retourner à sa position de repos, mais qu'elle a, au contraire, tendance à la dépasser. La même situation, ou du moins une situation très semblable, se produit pour l'eau, qui commence à osciller de haut en bas, entre creux et crête, autour de son niveau initial.

Tout ceci se produit au point où le caillou est tombé ; cela pourrait rester un phénomène circonscrit à ce point, mais l'eau qui est autour est également entraînée dans un mouvement analogue à cause de la force qui unit entre elles toutes les parties d'une masse liquide ; ainsi, en allant du point central vers les points extérieurs, toute la surface entre progressivement en agitation.

Il est intéressant de remarquer que LA PROPAGATION DU MOUVEMENT OSCILLATOIRE N'EST PAS INSTANTANÉE, mais qu'elle demande un certain temps.

Il en résulte donc que, lorsque le niveau est maximum en un point, il est encore minimum à une distance déterminée de ce point.

Le passage d'un maximum à un minimum, à savoir d'une crête à un creux, et inversement, est graduel et reproduit le profil des oscillations.

Nous pouvons admettre de manière intuitive que la forme de l'onde est bien celle qui est représentée sur la figure 3-b ; par la suite, nous justifions aussi ce point très complètement en décrivant une expérience s'y rapportant.

LA DISTANCE ENTRE DEUX CRETES SUCCESSIVES, ENTRE DEUX CREUX, OU ENTRE DEUX POINTS INTERMEDIAIRES QUELCONQUES (qui se trouvent au même niveau) EST EGALE ET CONSTANTE ; par conséquent, comme il s'agit d'une caractéristique bien définie pour

chaque onde, on a voulu lui donner un nom bien particulier, qui est la **LONGUEUR D'ONDE**.

La longueur d'onde sert, soit à caractériser l'onde, c'est-à-dire la perturbation superficielle de l'eau, soit à donner une certaine mesure des mouvements oscillatoires ou vibratoires qui sont à l'origine de la formation des ondes.

Si nous revoyons les trois expériences précédentes, celle de la lame vibrante, celle de la bille et de son ombre sur l'écran et celle du caillou dans l'eau, nous voyons que le mouvement circulaire, le mouvement vibratoire et le mouvement apparent de l'onde qui s'éloigne d'un centre, peuvent tous trois être liés entre eux, instant par instant, et qu'ils ont donc une allure semblable, bien qu'ils se présentent sous des aspects très différents qu'il semblerait, à première vue, impossible de comparer. En d'autres termes on peut dire que **L'ONDE, LA LAME VIBRANTE ET LA BILLE ONT DES COMPORTEMENTS DIFFERENTS, MAIS PARFAITEMENT EQUIVALENTS ENTRE EUX, SUIVANT UNE LOI COMMUNE QUI REGLE TOUS LES MOUVEMENTS PERIODIQUES.**

2 – LE SON

Pour pouvoir comprendre de nombreux phénomènes électriques, sur lesquels sont fondées les expériences de physique, il faut avant tout comprendre comment se produisent les sons, et comment ils se comportent dans les conditions particulières que nous allons examiner.

Les sons peuvent être produits par la vibration d'une corde, comme cela se passe, par exemple, pour le violon ; par la vibration d'une lame ou d'une sonnette métallique, comme dans les ronfleurs et les sonnettes électriques ; par la vibration d'une colonne d'air, comme dans les tuyaux des

PHYSIQUE 2

9

orgues ; par la vibration d'une membrane, comme dans le tambour, etc..

A l'origine de tous ces sons, il y a toujours la vibration de quelque chose, de la même manière qu'à l'origine des ondes qui se forment sur l'eau, il y a les oscillations que nous avons décrites dans la première partie de cette leçon.

Prenons par exemple le tambour illustré sur la figure 4 et voyons ce qui se passe après qu'il ait été frappé par la baguette.

La membrane, qui était d'abord immobile, commence à vibrer à cause de l'élasticité de la peau et de celle de l'air contenu dans le tambour. En même temps l'air qui se trouve au contact de la peau est mis en agitation, de même que l'eau est agitée par la chute d'un caillou, comme nous venons de le voir dans l'expérience précédente.

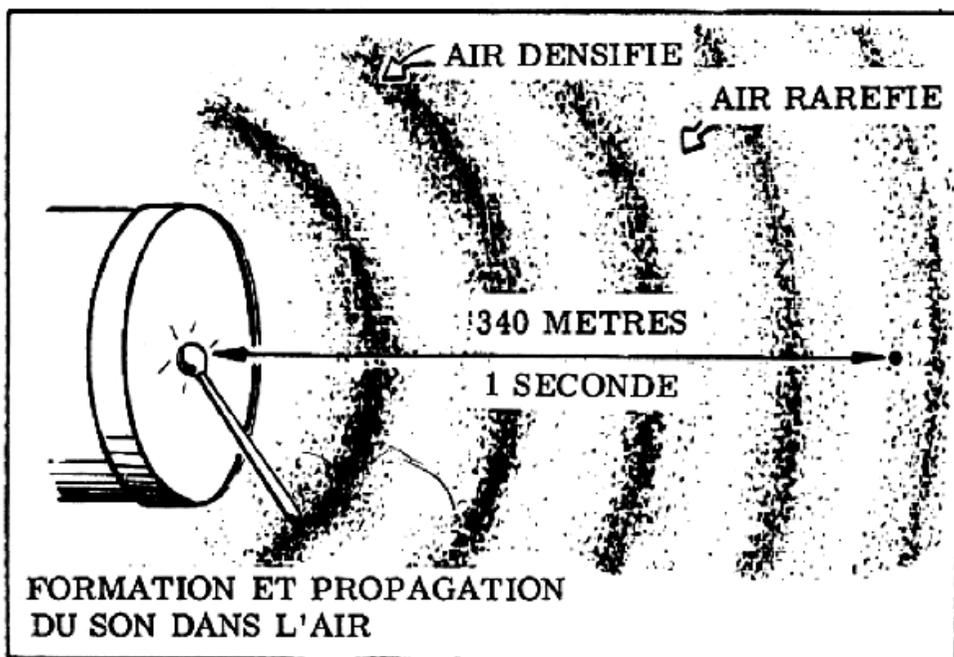


Figure 4

Quand la membrane du tambour se déplace vers l'intérieur, dans son voisinage immédiat il se produit un certain vide qui détermine une raréfaction de l'air ; lorsque, par contre, la membrane du tambour se déplace vers l'extérieur il se produit une compression qui produit une augmentation de densité de l'air.

Raréfactions et augmentations de densité se suivent avec la même régularité que la vibration de la membrane et se propagent dans toutes les directions, comme les ondes sur l'eau.

Cette similitude entre les vagues et les perturbations de l'air a suggéré le nom d'ONDE SONORE pour indiquer la répartition régulière des raréfactions et des augmentations de densité.

L'onde sonore, tout comme l'onde de l'eau, est animée d'un mouvement de propagation qui fait succéder une augmentation de densité à une raréfaction et de nouveau une augmentation de densité à une raréfaction, et ainsi de suite. Mais, même dans ce cas, il ne s'agit pas d'un véritable transport de l'air.

L'air, tout comme l'eau, reste toujours à la même place : ce qui se propage c'est seulement la vibration des différentes molécules d'air autour de leur position normale.

Enfin, comme dans le cas de l'eau, la vibration exige un certain temps pour passer d'un point à un autre et elle se transmet donc avec une certaine vitesse ; CETTE VITESSE DE PROPAGATION DU SON A ETE MESUREE: ON A TROUVE QU'ELLE EST CONSTANTE ET EGALE A ENVIRON 340 m/s (METRES PAR SECONDE).

2 – 1 – LA FORME DE L'ONDE SONORE

Essayons maintenant de donner une représentation graphique de l'onde sonore, c'est-à-dire "d'écrire" un son sur du papier, de manière à pouvoir

étudier commodément l'allure des vibrations : ce sera vrai non seulement pour des vibrations sonores, mais aussi pour toutes les autres vibrations régulières, comme celles de la lame serrée dans l'étau (figure 1) ou celles de l'ombre de la bille sur l'écran (figure 2).

Pour ce faire, nous allons voir une autre expérience.

Le diapason, c'est-à-dire l'instrument qui a la forme représentée sur la figure 5, a la propriété de vibrer assez longuement en émettant le son très pur d'une note de musique ; donc, à partir de ses vibrations, on peut reproduire le tracé d'un son très simple et surtout uniforme.

Le diapason utilisé pour cette expérience doit être muni d'une pointe traçante, qui appuie légèrement sur la bande de papier, de façon à laisser une trace sans que cela fasse obstacle à la vibration.

La bande doit se dérouler de haut en bas, dans le sens des flèches dessinées sur sa bordure, à une vitesse élevée et constante.

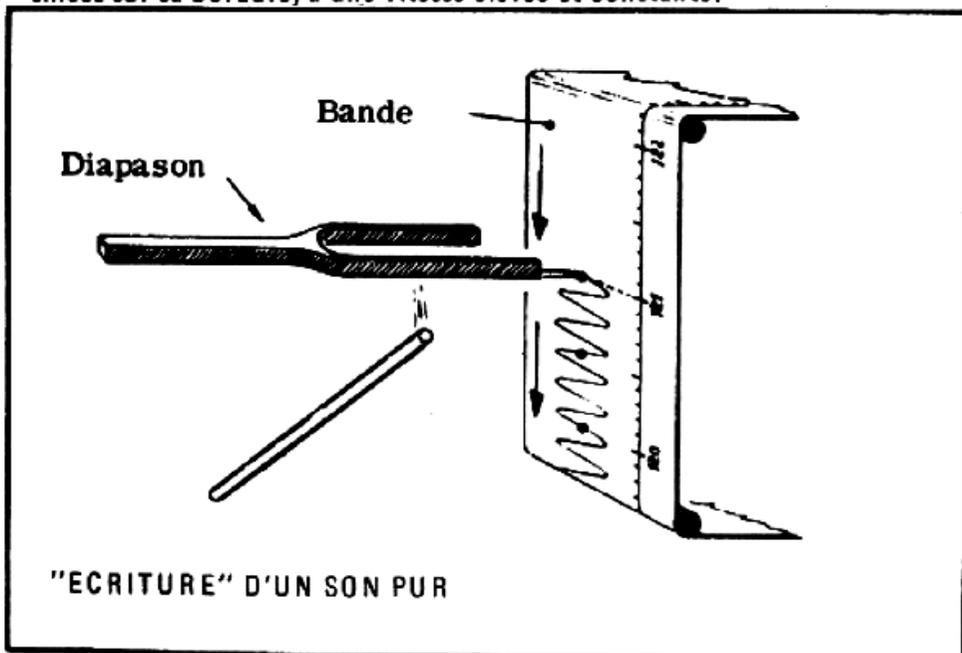


Figure 5

Les chiffres indiqués sur l'échelle graduée représentent les centièmes de seconde passés à partir du moment où la bande a été mise en mouvement.

La distance entre deux chiffres successifs, par exemple entre 120 et 121, ou entre 121 et 122, est toujours la même, et peut donner une idée de la vitesse de la bande.

Pour établir la valeur de cette vitesse, il suffit de mesurer la distance entre deux chiffres successifs, par exemple entre 120 et 121, distance qui s'avère être de 2 cm environ.

Ensuite on gardera présent à l'esprit que la bande se déroule de façon à faire passer la pointe d'un chiffre à l'autre (par exemple de 120 à 121) en un centième de seconde.

Le calcul restant à faire est très simple.

Puisque la distance entre deux chiffres successifs est de 2 cm environ et que le temps nécessaire pour la parcourir est d'un centième de seconde, on aura, en une seconde, un déroulement cent fois plus long, soit de 200 cm ; la vitesse de la bande doit donc être de 200 cm/s, ce qui est équivalent à 2 m/s.

L'expérience consiste à exciter le diapason avec une baguette et à observer la trace laissée sur le papier par la pointe traçante.

La trace reproduit l'allure de la vibration, donc celle de l'onde sonore, tout comme l'onde de la figure 3, reproduit l'allure des oscillations de l'eau.

Entre l'expérience de la figure 3 et celle de la figure 5, il y a cependant une grande différence. Dans la première expérience, l'eau sur laquelle apparaît l'onde reste toujours à la même place ; par contre dans la seconde

expérience la bande, sur laquelle est tracée la représentation de l'onde, se déroule très vite sous la pointe traçante. Dans la première expérience de petites portions d'eau, les unes à côté des autres, oscillent avec un certain retard les unes par rapport aux autres, de telle sorte qu'elles font apparaître sur la surface de l'eau la figure de l'onde ; dans la seconde expérience, seule la pointe vibre, et la figure de l'onde est obtenue grâce au déroulement de la bande.

Mais, malgré cette différence dans la façon de procéder, le profil de la figure 3-b a la même allure que la trace laissée sur la bande ; les résultats peuvent donc être considérés comme étant équivalents, sauf que dans la seconde expérience la précision est plus élevée.

Afin de pouvoir examiner plus en détail la forme de l'onde, on a dessiné sur la figure 6-a un tronçon de bande portant quelques modifications dans sa marge.

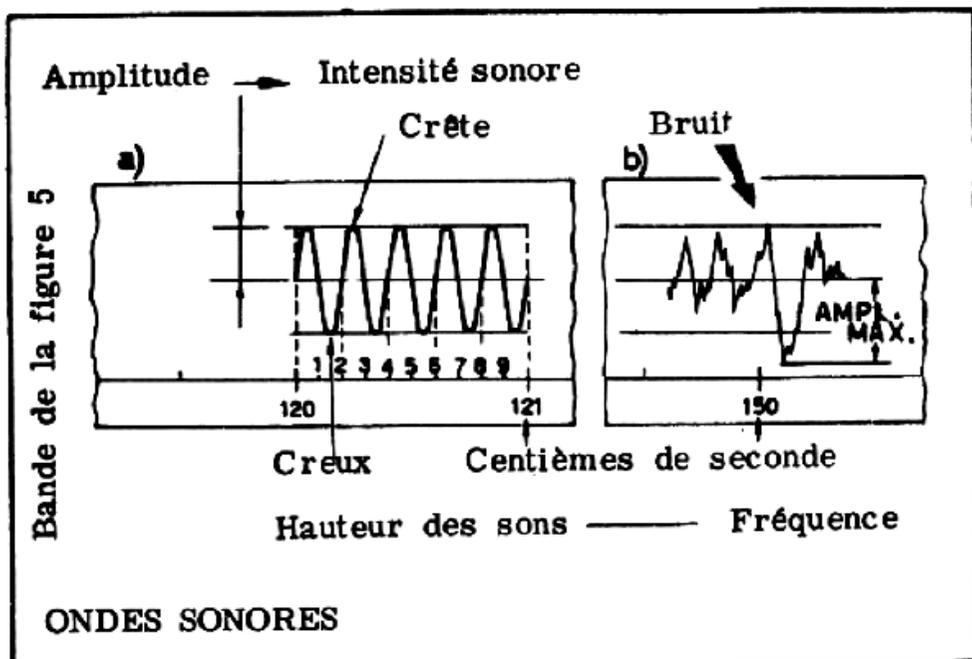


Figure 6

Au lieu de considérer tout le graphique tracé par la pointe sur le papier, examinons seulement le tronçon compris entre 120 et 121 centièmes de seconde, en nous rappelant bien que les mêmes considérations peuvent s'appliquer à tous les intervalles d'un centième de seconde qui précèdent ou qui suivent le tronçon pris en considération.

L'échelle a été complétée, entre les chiffres 120 et 121, en y ajoutant 9 subdivisions servant à délimiter 10 petits intervalles : chaque petit intervalle correspond donc à une durée d'un millième de seconde.

Ces précisions apportées, voici ce que nous pouvons observer.

La tracé de l'onde se répète de façon identique à partir du second, du quatrième, du sixième et du huitième millième de seconde, ce qui signifie que chaque oscillation s'accomplit au cours d'une durée exacte de 2 millisecondes.

CETTE DUREE PORTE EN GENERAL LE NOM DE PERIODE.

Dans tout l'intervalle on peut compter 5 oscillations complètes, ce qui signifie que la pointe du diapason a accompli 5 mouvements d'aller et de retour en un centième de seconde.

Puisque le diapason a continué à vibrer avec la même régularité avant et après l'intervalle considéré, il est évident que pendant une durée d'une seconde il s'est produit une quantité d'oscillation 100 fois plus grande, soit exactement 500 oscillations.

LE NOMBRE DES OSCILLATIONS PRODUITES EN UNE SECONDE PORTE EN GENERAL LE NOM DE FREQUENCE.

La fréquence est une donnée très importante, car sa valeur est liée à une caractéristique des sons qui est directement perceptible par notre ouïe ; un son peut s'avérer aigu, si la fréquence est élevée, grave si la fréquence est basse. Par exemple, un tambour de grandes dimensions émet

un son grave parce que les vibrations que sa membrane accomplit en une seconde sont relativement peu nombreuses (environ cinquante) ; le violon par contre émet des sons aigus, parce que les vibrations que ses cordes accomplissent en une seconde sont bien plus nombreuses (environ trois mille). DANS LE PREMIER CAS ON DIT QUE LA FREQUENCE DU SON EST BASSE, TANDIS QUE DANS LE SECOND, ON DIT QUE LA FREQUENCE EST HAUTE.

Le diapason de l'expérience, accomplissant 500 oscillations en une seconde, a une fréquence intermédiaire entre celle du tambour et celle du violon ; il devrait donc émettre un son d'une hauteur intermédiaire, ni très aigu, ni très grave.

Le tableau de la figure 7 indique les fréquences des différentes notes de musique réparties en huit gammes : $A_0, A_1, A_2, A_3, \dots$.

La gamme A_0 est celle des sons les plus graves ; les fréquences en

	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
DO (C)	16,35	32,70	65,41	130,8	261,6	523,3	1047	2093
RE (D)	18,35	36,71	73,42	146,8	293,7	587,3	1175	2349
MI (E)	20,60	41,20	82,41	164,8	329,6	659,3	1319	2637
FA (F)	21,82	43,65	87,31	174,6	349,2	698,5	1397	2794
SOL (G)	24,49	49,00	98,00	196,0	392,0	784,0	1568	3136
LA (A)	27,50	55,00	110,0	220,0	440,0	880,0	1760	3520
SI (B)	30,86	61,74	125,5	246,9	493,9	987,8	1976	3951
FREQUENCES DES NOTES DE MUSIQUE								

Figure 7

sont donc aussi les plus basses : elles sont comprises entre 16,35 vibrations par seconde et 30,86 vibrations par seconde.

Les vibrations ayant des fréquences inférieures à 16 ne sont pas perçues par l'oreille, bien qu'il existe encore une onde dans l'air ; nous ne prendrons donc pas en considération les notes ayant des fréquences inférieures à 16, et on considère la gamme A_0 comme "gamme fondamentale", au moins en théorie.

En pratique, étant donné qu'il est plus précis d'évaluer à l'ouïe un son intermédiaire, ni trop grave, ni trop aigu, on a fixé COMME SON DE REFERENCE CELUI DU "LA" APPARTENANT A LA GAMME A_4 : C'EST LE SON EMIS PAR UN DIAPASON ETALON A LA FREQUENCE DE 440 VIBRATIONS PAR SECONDE.

En partant de cette fréquence on a défini toutes les notes musicales, au moyen de calculs que nous ne reproduirons pas parce qu'ils dépasseraient le sujet d'un cours d'électronique industrielle.

Retenez seulement que toute fréquence de la gamme A_1 est le double de la fréquence correspondante dans la gamme A_0 (32,70 est le double de 16,35 ; 36,71 est pratiquement le double de 18,35 et ainsi de suite). A leur tour, les fréquences de la gamme A_2 sont le double des fréquences correspondantes dans la gamme A_1 et le quadruple des fréquences correspondantes de la gamme A_0 , et ainsi de suite pour toutes les gammes successives.

Si nous considérons la gamme A_0 comme FONDAMENTALE, les gammes suivantes, obtenues en doublant les valeurs de fréquences de la gamme fondamentale, en les quadruplant et ainsi de suite, sont appelées HARMONIQUES (A_1 première gamme harmonique ; A_2 deuxième harmonique, etc..).

Les fréquences des sons peuvent arriver jusqu'à environ 16.000 vibrations par seconde. Au-delà de cette limite notre ouïe ne perçoit plus

aucune vibration ; donc au-delà de cette limite s'ouvre un nouveau domaine de fréquences, qui ne sont pas audibles, et ce domaine est connu sous le nom d'ULTRASONS.

Le domaine des fréquences audibles, appelées aussi **FREQUENCES ACOUSTIQUES**, s'étend donc de 16 à 16.000 vibrations par seconde. La limite supérieure de ce domaine touche celui des ultrasons, tandis que la limite inférieure touche à celui des fréquences inférieures à 16 vibrations par seconde, appelées aussi **INFRASONS**.

Retournons maintenant au graphique de la figure 6.

Outre la fréquence, il faut aussi prendre en considération **L'AMPLITUDE** de la vibration et de l'onde correspondante.

D'habitude, pour représenter l'amplitude d'une vibration ou d'une onde, on ne considère pas la distance entre les positions extrêmes, c'est-à-dire entre crête et creux d'une onde, mais la moitié de cette valeur, **SOIT LA DISTANCE ENTRE LE NIVEAU MOYEN, CORRESPONDANT A LA POSITION DE REPOS ET LE NIVEAU MAXIMAL DE CRETE OU MINIMAL DE CREUX**.

Cependant, s'il s'agit non plus d'un son pur, mais d'un **BRUIT**, il faut avoir présent à l'esprit que le tracé de la vibration est très irrégulier (figure 6-b) et il faut alors prendre en considération l'amplitude maximale qui se réfère toujours au niveau de repos, mais peut ne se présenter que d'un côté seulement ; par exemple, dans la figure 6-b, elle n'apparaît que du côté des creux.

L'AMPLITUDE DES SONS PURS ET L'AMPLITUDE MAXIMALE DES BRUITS SONT PERCUES PAR NOTRE OUIE COMME LEUR INTENSITE SONORE, c'est-à-dire comme la plus ou moins grande force du son (sons forts ou sons faibles).

Cependant nos sensations ne suivent pas fidèlement l'augmentation

de l'intensité du son : l'oreille se révèle extrêmement sensible aux sons très faibles mais très peu sensible aux sons forts et très forts.

La figure 8 montre une échelle approximative des sensations sonores, produites par des bruits de différentes natures. On y voit par exemple que la sensation sonore, produite par le bruit provenant d'un autobus, est environ deux fois plus élevée que celle produite par le bruit d'une maison d'habitation.

En réalité, si nous mesurons les intensités des deux bruits, nous trouverions que l'intensité sonore du bruit produit par un autobus est dix mille fois plus forte que celle des bruits venant de la maison. De manière analogue, si nous mesurons l'intensité sonore d'une sirène, nous trouverions qu'elle est dix milliards de fois plus forte que celle des bruits venant de la maison.

L'AUGMENTATION DES INTENSITES EST DONC DE BEAUCOUP SUPERIEURE A CELLE PERÇUE PAR L'OREILLE HUMAINE.

2 – 2 – RESONANCE – REFLEXION – INTERFERENCE

Jusqu'à présent, nous avons vu comment se comporte l'onde sonore dans l'air, quelles sont ses caractéristiques les plus importantes et comment celles-ci sont évaluées par notre appareil auditif. Pour conclure notre brève étude, nous devons également examiner quelques phénomènes, dus à la présence dans l'air de corps autres que ceux produisant des sons, ou bien dus à la présence d'autres ondes sonores.

Lorsque l'onde en s'éloignant de sa source rencontre un obstacle, deux phénomènes peuvent se produire : **PARFOIS LE CORPS SERVANT D'OBSTACLE SE MET A VIBRER**, comme par exemple les vitres des fenêtres sous l'influence de bruits violents, **PARFOIS L'OBSTACLE RENVOIE LE SON DANS UNE DIRECTION DIFFERENTE DE CELLE D'OU IL VIENT**, OU LE RENVOIE TOUT SIMPLEMENT VERS SON

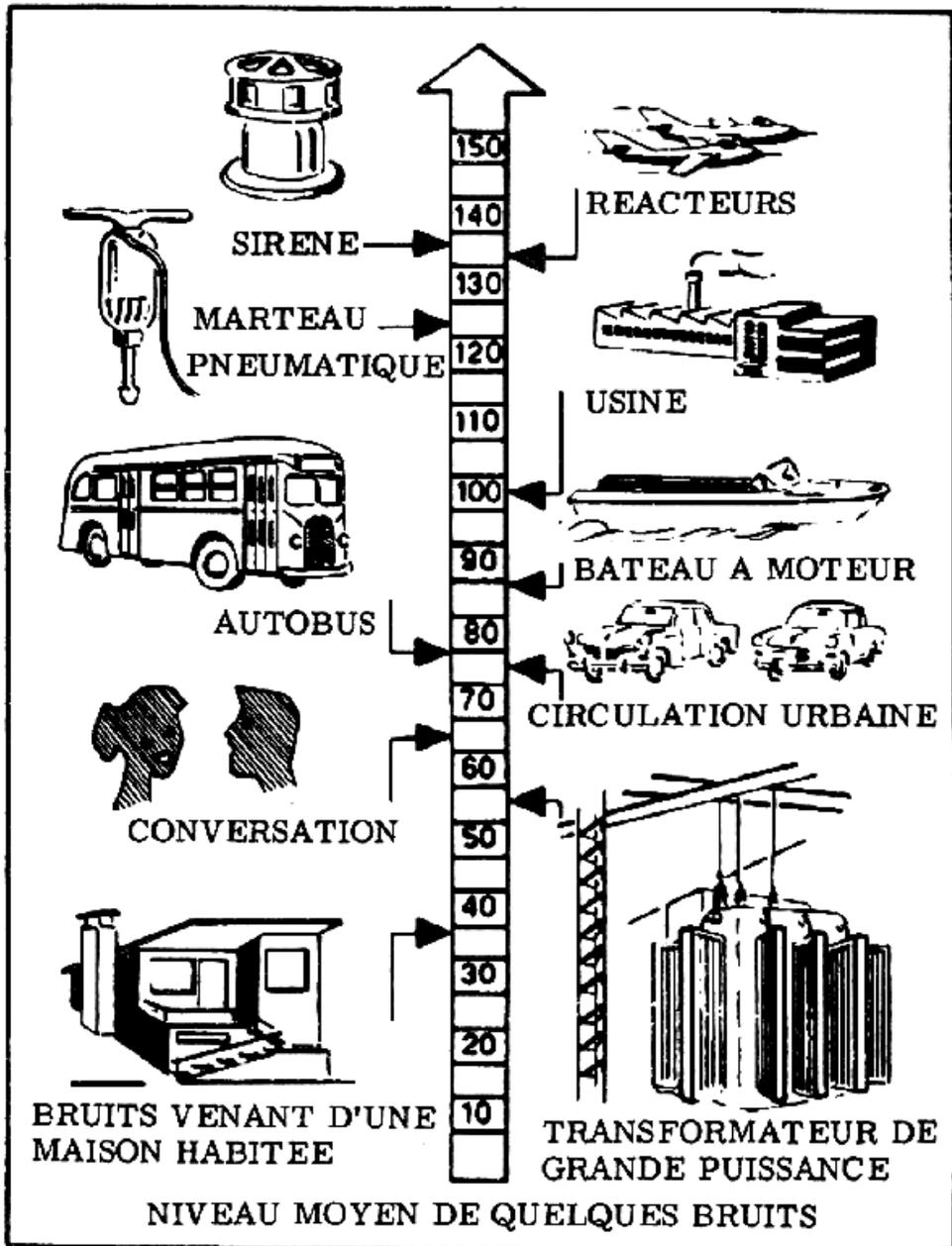


Figure 8

POINT DE DEPART, COMME CELA SE PRODUIT DANS L'ECHO.

D'habitude il n'est pas possible de faire une distinction entre ces deux phénomènes, car l'un et l'autre surviennent presque toujours en même temps. En outre, bien souvent on ne les perçoit même pas, car ce qui domine nettement, c'est la perception du son émis par la source principale. Mais on peut imaginer deux expériences distinctes, comme celles illustrées sur la figure 9 où les deux phénomènes sont considérés séparément.

Si l'on place près d'une lame vibrante, émettant un son bien défini et continu, une autre lame immobile, absolument semblable à la première, c'est-à-dire de même forme, de même grandeur et faite de la même matière, on peut entendre, au bout d'un instant, un son en provenance de la seconde lame, de même hauteur, mais beaucoup moins intense, que celui émis par la lame vibrante.

En nous rappelant ce que signifie la hauteur d'un son, nous pouvons donc AFFIRMER QUE LA SECONDE LAME S'EST MISE A VIBRER A LA MEME FREQUENCE QUE LA PREMIERE, mais avec une amplitude inférieure. Pour cette raison elle reproduit fidèlement le son, ou comme on a l'habitude de dire, elle **RESONNE**.

Les conditions indiquées, à savoir que la seconde lame soit en tous points identique à la première et que le son soit bien défini, sont indispensables si l'on veut obtenir de façon sûre le phénomène de la **RESONANCE ACOUSTIQUE** que nous venons de décrire.

En général cependant, pour obtenir un certain effet de résonance, il n'est pas nécessaire d'avoir des conditions aussi restrictives. S'il s'agit d'un son quelconque, composé de fréquences nombreuses, comme cela se passe dans les cas les plus habituels, il suffit que le corps touché puisse vibrer librement sur une des fréquences du son. Dans le cas contraire on ne peut obtenir aucun effet de résonance.

Or, puisque tout corps, comme on a pu le constater dans le cas

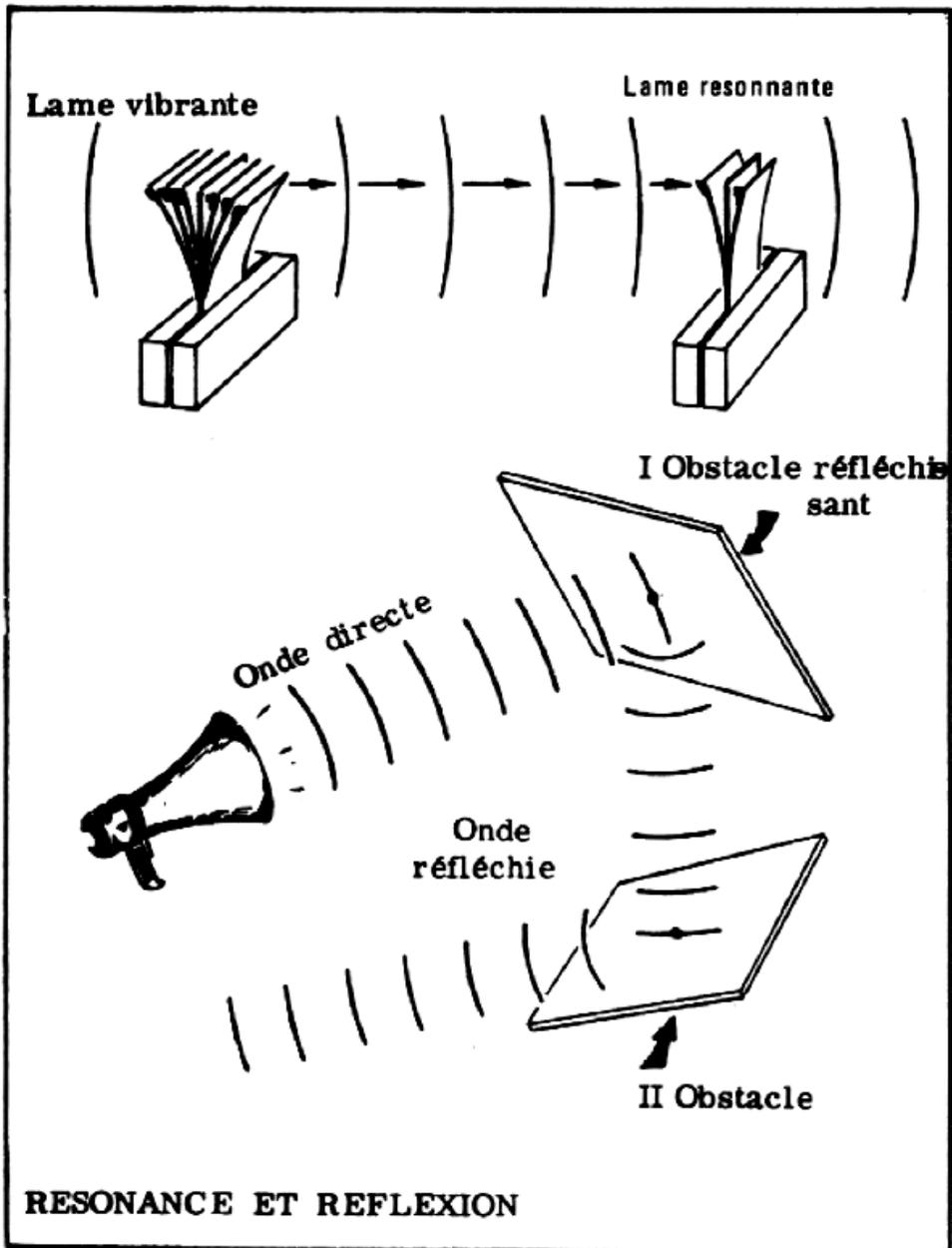


Figure 9

particulier du diapason, ne vibre librement que sur une fréquence bien définie, il est évident qu'il ne peut entrer en résonance que si le son qui le touche a la même fréquence que ses fréquences de vibration libre.

Dans tous les autres cas, c'est-à-dire quand la fréquence de l'oscillation libre et celle du son sont différentes l'une de l'autre, ou bien quand l'obstacle rencontré par l'onde est absolument rigide et se trouve dans l'impossibilité de vibrer, on observe exclusivement le phénomène de la REFLEXION : L'ONDE SONORE QUI FRAPPE L'OBSTACLE REBONDIT COMME UNE BALLE ELASTIQUE LANCEE CONTRE UN MUR. S'il y a des obstacles disposés d'une façon particulière, cette onde peut même être réfléchi plusieurs fois et, en changeant successivement de direction, elle peut retourner à son point de départ au bout d'un certain temps, PRODUISANT L'EFFET D'ECHO bien connu.

Il nous reste encore à examiner les phénomènes dus à l'INTERFERENCE de deux ondes qui se superposent dans le même milieu.

D'habitude, lorsqu'on écoute deux notes identiques, émises simultanément par deux instruments, on a la sensation que l'intensité sonore est augmentée par rapport à celle d'une note unique. Mais en certaines circonstances, des notes émises simultanément de deux points différents interfèrent entre elles de telle sorte qu'aucune des deux ne puisse être entendue.

Le renforcement du son comme son affaiblissement, peuvent être obtenus au moyen de l'appareil représenté sur la figure 10-a, étudié tout spécialement pour démontrer les phénomènes d'interférences.

Dans cet appareil se trouve une seule source de vibrations sonores, le sifflet, mais deux chemins distincts s'offrent à l'onde sonore : les tuyaux A et B.

Par conséquent, au point de convergence C arrivent deux ondes distinctes, qui ont la même fréquence, puisqu'elles proviennent de la même source.

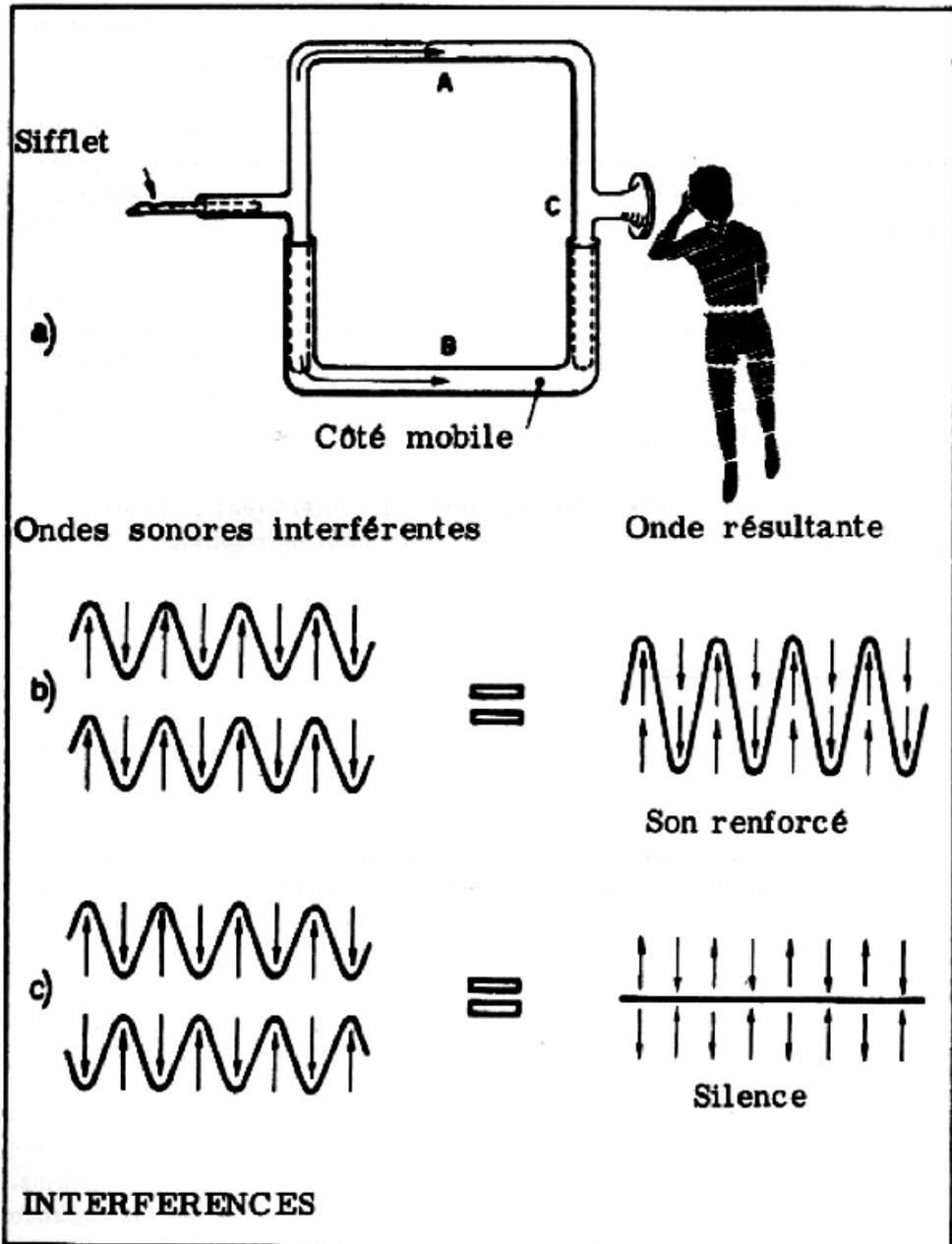


Figure 10

L'essai consiste à faire varier la longueur du tuyau mobile pendant que le sifflet émet une note continue, d'intensité toujours égale.

Dans ces conditions, la personne qui écoute à la sortie de l'appareil perçoit des variations d'intensité appréciables, allant d'un maximum, correspondant à une note forte, jusqu'à un minimum, où le son devient pratiquement inaudible,

L'explication de ce fait singulier est très simple si l'on pense que le son, comme nous l'avons déjà précisé, se transmet avec une vitesse bien définie (340 m/s). Donc, EN AUGMENTANT LA LONGUEUR DU PARCOURS DANS LE COTE MOBILE B, L'ONDE TRANSPORTEE DANS CE TUBE SUBIT UN RETARD PROGRESSIF.

A cause de ce retard, les deux ondes qui interfèrent au point C peuvent se trouver dans l'un des deux cas extrêmes représentés par les figures 10-b et 10-c.

Dans le cas de la figure 10-b, les deux ondes ont le même tracé ; comme l'indiquent les petites flèches dirigées soit vers le haut, soit vers le bas, et le son se trouve renforcé ; dans le cas de la figure 10-c les deux ondes sont en opposition, comme l'indiquent les petites flèches orientées en sens opposé ; le son s'éteint alors totalement et c'est le silence.

Dans les positions intermédiaires il se produit un affaiblissement progressif du son par rapport à son intensité maximale, affaiblissement qui est d'autant plus marqué que l'opposition réciproque des ondes interférentes est plus grande.

Le problème de la composition des ondes sera repris et approfondi dans une leçon de mathématiques, où nous examinerons également le cas des ondes ayant des fréquences différentes.

3 – LA CHALEUR

Jusqu'à présent nous nous sommes occupés des mouvements de corps visibles à l'oeil nu, et de mouvements réguliers que l'on peut décrire avec assez de précision.

Il nous faut maintenant étendre le champ de nos observations et y inclure un autre type de mouvement, très répandu dans la nature, qui est absolument irrégulier si l'on considère le mouvement d'un corps séparé, et qui obéit toutefois à certaines lois si on examine le comportement de **NOMBREUSES PARTICULES REUNIES ENSEMBLE**.

Nous nous contenterons d'une allusion au phénomène observé par le botaniste anglais Brown en 1827 qui étudiait au microscope des préparations servant à ses recherches.

Nous examinerons ensuite les aspects fondamentaux de la théorie de la chaleur, puisque l'on explique la chaleur comme étant justement l'aspect superficiel, décelable par nos sens, d'un mouvement très vif des particules ultra-microscopiques qui constituent les substances.

4 – 1 – MOUVEMENT BROWNIEN

Avez-vous déjà observé une bouteille d'eau naturelle en la plaçant à contre-jour ?

L'eau naturelle contient toujours de nombreux corpuscules de diverses dimensions. Lorsque l'eau est au repos depuis quelque temps, les corpuscules les plus gros descendent lentement au fond de la bouteille ; par contre les plus petits d'entre eux, si on les observe en transparence semblent incertains sur le chemin qu'ils doivent prendre : ils restent suspendus dans l'eau ; parfois ils vont d'un côté et changent ensuite de direction et peuvent aussi aller du côté opposé ; parfois ils vont carrément vers

le haut et descendent de nouveau vers le bas ; ou bien ils s'arrêtent un peu et recommencent à errer sans but.

On croirait qu'ils ne savent pas où s'arrêter, qu'ils ne sentent pas l'action de la pesanteur terrestre ni la poussée qui pourrait les faire sur-nager.

Le phénomène devait sembler sans importance aux savants des siècles passés, puisque des millénaires sont passés sans que personne n'ait songé à s'inquiéter des causes de l'agitation des particules dans l'eau.

Ce n'est qu'en 1827 que le savant Brown s'est intéressé à un mouvement analogue qui animait les particules en suspension dans la goutte d'une préparation destinée à des analyses microscopiques.

Dans le champ du microscope apparaissaient de nombreux corpuscules, bien plus petits que ceux qui sont visibles à l'oeil nu dans l'eau, et aussi beaucoup plus agités : c'était un continuel va-et-vient dans toutes les directions, comme s'il y avait dans la goutte des êtres ultra-microscopiques qui, par jeu, venaient frapper les particules immobiles et envoyaient dans une autre direction celles qui se trouvaient déjà en mouvement.

Le parcours d'un seul corpuscule apparaîtrait comme le tracé de la figure 11, où chaque point, entre A et B, représente un coup donné par ces êtres ultra-microscopiques cachés dans le liquide.

Après que Brown eût signalé ses observations, les physiciens commencèrent à s'intéresser à ce phénomène et mirent en lumière de nouveaux aspects de celui-ci.

Ils établirent que bien d'autres cas de mouvement brownien existent. Par exemple la fumée nous paraît trouble parce que le gaz contient d'innombrables particules solides et liquides, animées d'une agitation très vive.

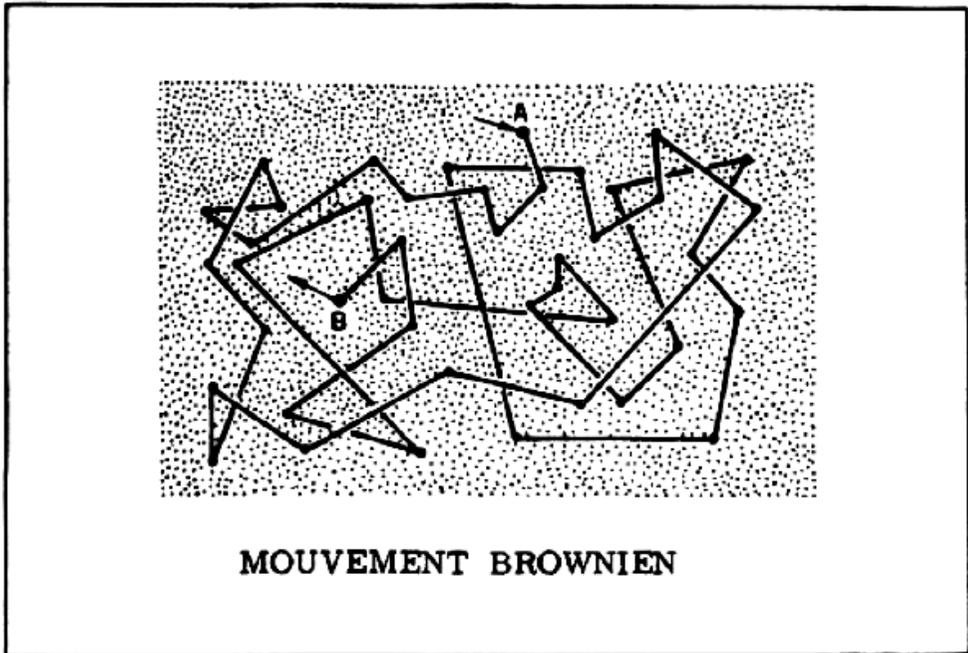


Figure 11

Ces particules, que l'on ne peut pas distinguer à l'œil nu, se voient parfaitement au microscope, où elles apparaissent comme un tourbillonnement scintillant semblable au mouvement des moucherons d'un essaim.

On remarque également que les corpuscules occupent tout l'espace du liquide, ou du gaz dans lequel ils sont suspendus, et qu'ils y sont distribués uniformément.

On peut faire une expérience très simple, en introduisant un colorant solide dans un liquide. Les particules du colorant restent d'abord rassemblées dans la zone où elles sont tombées ; mais ensuite, au bout de peu de temps, elles se diffusent dans tout le liquide, en le colorant de façon parfaitement uniforme.

Cette régularité de la distribution des particules colorantes contraste avec le mouvement désordonné qui anime chacune de ces particules et démontre clairement que, **TANDIS QUE LE MOUVEMENT D'UN CORPUSCULE ISOLE REPOSE SUR LE HASARD, LE MOUVEMENT D'ENSEMBLE, A SAVOIR LA DIFFUSION, OBEIT A UNE LOI BIEN DEFINIE, LA LOI DE LA DISTRIBUTION UNIFORME DES MOUVEMENTS BROWNIENS DANS TOUTE PARTIE DU LIQUIDE OU DU GAZ OÙ CES MOUVEMENTS SE PRODUISENT.**

Les physiciens ont également observé que l'agitation des corpuscules augmente avec la chaleur.

Par exemple, si on chauffe l'eau qui contient des corpuscules en suspension clairement visibles, on remarque que le mouvement brownien, d'abord lent ou même à peine perceptible, acquiert une vivacité appréciable. Cette vivacité s'atténue dès que l'eau commence à se refroidir.

En essayant justement de trouver une explication à ce dernier fait, on arrive à expliquer de façon convaincante le phénomène de la chaleur.

3 – 2 – NATURE DE LA CHALEUR

Qu'un corps puisse être plus ou moins chaud, plus ou moins froid, a sûrement été une des premières expériences faites par les hommes, mais ce qu'est en réalité la chaleur resta longtemps un mystère.

Les physiciens avaient observé beaucoup de phénomènes se produisant à cause de la chaleur. Ils avaient remarqué, par exemple, que les passages de l'état solide à l'état liquide, de l'état liquide à l'état gazeux et inversement, dépendaient d'un réchauffement plus ou moins important.

Cet effet peut être facilement constaté si l'on observe le comporte-

ment de l'eau, qui passe habituellement de l'état solide (glace) à l'état liquide (eau), puis à l'état gazeux (vapeur), à la suite de réchauffement relativement faible. Le même effet se produit pour toutes les autres substances. Sur cette base sont nés dans l'Antiquité les différents procédés de la métallurgie et des distillations.

Les physiciens avaient aussi remarqué qu'un corps chaud cède toujours une partie de sa chaleur à un autre corps moins chaud, qui se trouve en contact avec lui, tout comme l'eau tombe toujours de haut en bas (figure 12). En même temps, ils avaient observé aussi qu'un corps moins chaud ne cède jamais de chaleur à un corps plus chaud, tout comme il n'arrive jamais que l'eau remonte spontanément de la plaine vers la montagne.

Ces observations et beaucoup d'autres, parmi lesquelles la dilatation des gaz ou l'augmentation de leur pression, avaient suggéré de nombreuses façons d'utiliser la chaleur dans les domaines les plus divers, qui vont du

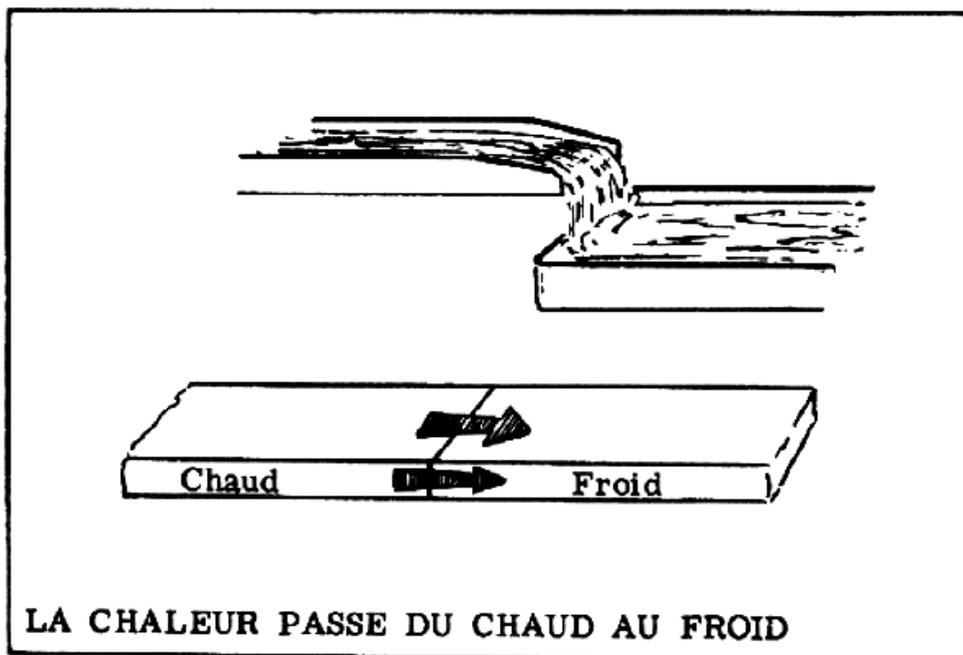


Figure 12

secteur domestique du chauffage au secteur industriel des machines à vapeur.

Mais, bien que les lois qui règlent les échanges de chaleur et beaucoup d'effets dus à la chaleur fussent déjà connus, la curiosité des physiciens restait toujours insatisfaite et ils continuaient à se demander quelle était en réalité la cause de la chaleur perçue par nos sens.

La réponse était trop éloignée de l'image habituelle que nous nous formons d'un corps chaud pour qu'une simple observation ait suffi à la mettre en lumière.

Pour nous, un corps chaud peut être immobile ou bien en mouvement, sans qu'il apparaisse de lien entre chaleur et mouvement, entre chaleur et repos ; or, en réalité, la chaleur est mouvement ; un mouvement caché, totalement invisible, même au moyen des instruments les plus perfectionnés, mais bien réel, qui secoue l'édifice des substances solides, tout comme le vent secoue les feuilles sur les arbres.

Le mouvement brownien, qui est un mouvement lié à la présence de chaleur, n'est pas la cause de la chaleur, mais il en est seulement la conséquence, la preuve la plus sûre et la plus visible du mouvement plus intime de la matière qui compose les diverses substances.

Regardons les grandes lignes de ce qui se passe lorsque nous réchauffons un corps solide. Supposons que primitivement le corps soit totalement froid, (situation d'ailleurs impossible) parce que tous les corps possèdent toujours au moins une petite quantité de chaleur.

DANS LES CONDITIONS IDEALES DE FROID ABSOLU, TOUS LES CORPS SONT SOLIDES ; en outre, chaque plus petite particule de la substance, c'est-à-dire chaque MOLECULE (c'est le nom qui a été donné aux plus petites particules d'une substance), reste parfaitement immobile à sa place, tout comme le reste du corps.

Donner de la chaleur signifie : secouer les molécules, qui commencent donc à vibrer autour de leur emplacement normal.

Les vibrations augmentent au fur et à mesure qu'il se produit un nouvel apport de chaleur, jusqu'à un certain moment où l'édifice de la substance commence à céder en quelque endroit.

A partir de ce moment, toute dose supplémentaire de chaleur ne produit pas un échauffement plus grand du corps, mais précipite et complète l'écroulement de l'échafaudage des molécules.

Nous pouvons constater les effets de l'écroulement total en observant que le corps passe de l'état solide à l'état liquide ; c'est-à-dire qu'il n'est plus en état de maintenir sa forme propre et qu'il se répand sur le fond du récipient qui le contient.

Arrivés à ce point nous pouvons nous rendre compte facilement des causes qui sont à la base du mouvement brownien des liquides.

Les corpuscules en suspension dans le liquide sont ballottés à droite, à gauche, vers le haut, vers le bas, en avant, en arrière, parce qu'ils sont continuellement heurtés par les molécules qui sont en agitation à cause du réchauffement ; donc, le mouvement brownien, comme il l'a déjà été dit, "espionne" la chaleur, ou disons plutôt qu'il révèle ce que signifie la chaleur dans le secret de la matière.

Si l'on continue à réchauffer le liquide, quand on a obtenu la fusion complète du solide, l'agitation des molécules recommence à devenir plus vive et le désordre général des mouvements augmente aussi, jusqu'à ce que l'on se trouve devant une nouvelle situation : les molécules tendent à s'éloigner les unes des autres, en rompant leurs liens réciproques, bien qu'affaiblis par le passage à l'état liquide, continuent toutefois à maintenir le corps rassemblés sur le fond du récipient.

Par la rupture de ces liens, les molécules se diffusent librement

dans tout le récipient, et si celui-ci est ouvert, elles se précipitent dans l'air à l'état gazeux, se heurtant entre elles et heurtant les autres corps avec une extrême vivacité.

LA SOMME DE CES HEURTS, PARTICULIEREMENT SI ELLE S'EXERCE SUR LES PAROIS D'UN RECIPIENT FERME, EST HABITUELLEMENT PERÇUE ET MESUREE, COMME UNE FORCE DE PRESSION.

Des réchauffement ultérieurs du gaz augmentent encore l'agitation des molécules, et déterminent donc des augmentations de pression.

Après avoir éclairci la signification secrète de la chaleur et des transformations dues à la chaleur, examinons quelques notions et quelques applications intéressant directement le technicien-électronicien.

3 – 3 – TEMPERATURE – PROPAGATION DE LA CHALEUR

Nos sens nous font sentir qu'un corps est plus ou moins chaud en évaluant approximativement le **DEGRE D'AGITATION** de ces molécules, mais ils ne nous donnent aucune information directe sur la **QUANTITE DE CHALEUR** présente.

La quantité de chaleur correspond à la quantité de mouvement générale donnée aux molécules pour échauffer le corps. Mais il peut se produire que ce mouvement n'engendre pas du tout d'augmentation proportionnelle du degré d'agitation. On a déjà vu que lorsqu'un corps est sur le point de passer de l'état solide à l'état liquide, la chaleur qui lui est apportée en supplément ne produit pas d'augmentation de l'agitation, et ne provoque donc pas d'échauffement plus grand, mais est utilisée à faire céder progressivement l'échafaudage de la substance solide.

Ce dernier effet n'est obtenu que dans les conditions particulières

d'un changement d'état, mais il est déjà suffisant pour nous faire comprendre que, au moins dans quelques cas, FOURNIR DE LA CHALEUR NE SIGNIFIE DONC PAS OBTENIR UN ECHAUFFEMENT.

Une comparaison peut mieux éclairer cette distinction entre chaleur et échauffement. Imaginons que nous soufflions de l'air dans un ballon : plus nous injectons d'air et plus la pression augmente à l'intérieur du ballon. Si nous continuons à souffler, à un certain moment le ballon éclate et la pression n'augmente plus, comme elle le faisait encore un instant auparavant.

Dans notre comparaison, l'air correspond à la quantité de chaleur ; la pression correspond au degré d'agitation des molécules, l'éclatement correspond à l'écroulement de l'échafaudage solide.

Il y a pourtant une différence qu'il ne faut pas oublier : l'éclatement du ballon est instantané, tandis que le passage de l'état solide à l'état liquide ou bien de l'état liquide à l'état gazeux dure un certain temps, et, pendant toute sa durée, DE LA CHALEUR CONTINUE A ETRE ABSORBEE SANS QU'IL NE SE PRODUISE NI ECHAUFFEMENT NI REFROIDISSEMENT DU CORPS.

On peut présenter de nombreux autres cas dans lesquels la quantité de chaleur se distingue du degré d'agitation ; il faut encore préciser que l'on a attribué un nom au degré d'agitation bien avant que la théorie de la chaleur n'ait été formulée, plus précisément on le désignait (et on continue à le désigner) par le terme de TEMPERATURE.

La température a toujours été la caractéristique principale des corps chauds, celle que nous pouvons percevoir directement avec nos sens et mesurer par des instruments, celle qui détermine et règle tous les échanges de chaleur.

Pour se faire une idée de la façon dont la température exerce son influence, il suffit de se rappeler que la chaleur passe toujours du corps

chaud au corps moins chaud, et que le **PASSAGE DE CHALEUR SURVIENT SPONTANEMENT PAR DIFFUSION DE L'AGITATION MOLECULAIRE**, diffusion qui tend à rendre l'agitation uniforme.

Par l'effet de la diffusion, deux corps qui se trouvent primitivement à des températures différentes acquièrent inévitablement la même température après être restés en contact pendant un temps suffisant.

Sur la base de ce principe, il est possible d'utiliser le **THERMOMETRE**, représenté sur la figure 13.

Le thermomètre (ce mot signifie "mesureur de chaleur", mais on doit le comprendre plutôt comme "mesureur de température") est l'application la plus commune d'une autre propriété de l'échauffement d'un corps.

On a remarqué que la longueur d'une barre métallique, ou d'une colonne liquide, augmente proportionnellement avec la température. L'idée est donc née de mesurer les variations de température en les rapportant aux variations de longueur d'un élément déterminé. A cette fin, on a enfermé une certaine quantité de mercure dans un petit ballon de verre surmonté d'un tube gradué, vidé d'air et hermétiquement fermé.

Les graduations de l'échelle portée sur le tube sont déterminées de telle façon que le 0 corresponde à la température de la glace fondante, et le 100 à la température de l'eau en ébullition.

Entre le 0 et le 100 on a disposé 99 lignes qui déterminent 100 petits intervalles tous égaux entre eux.

On peut d'ailleurs prolonger cette échelle au-dessus de 100 et en-dessous de 0 en ajoutant d'autres subdivisions égales aux précédentes.

Cette échelle s'appelle **ECHELLE CENTIGRADE**, d'après le nombre d'intervalles, ou de degrés, compris entre la ligne de température de la glace

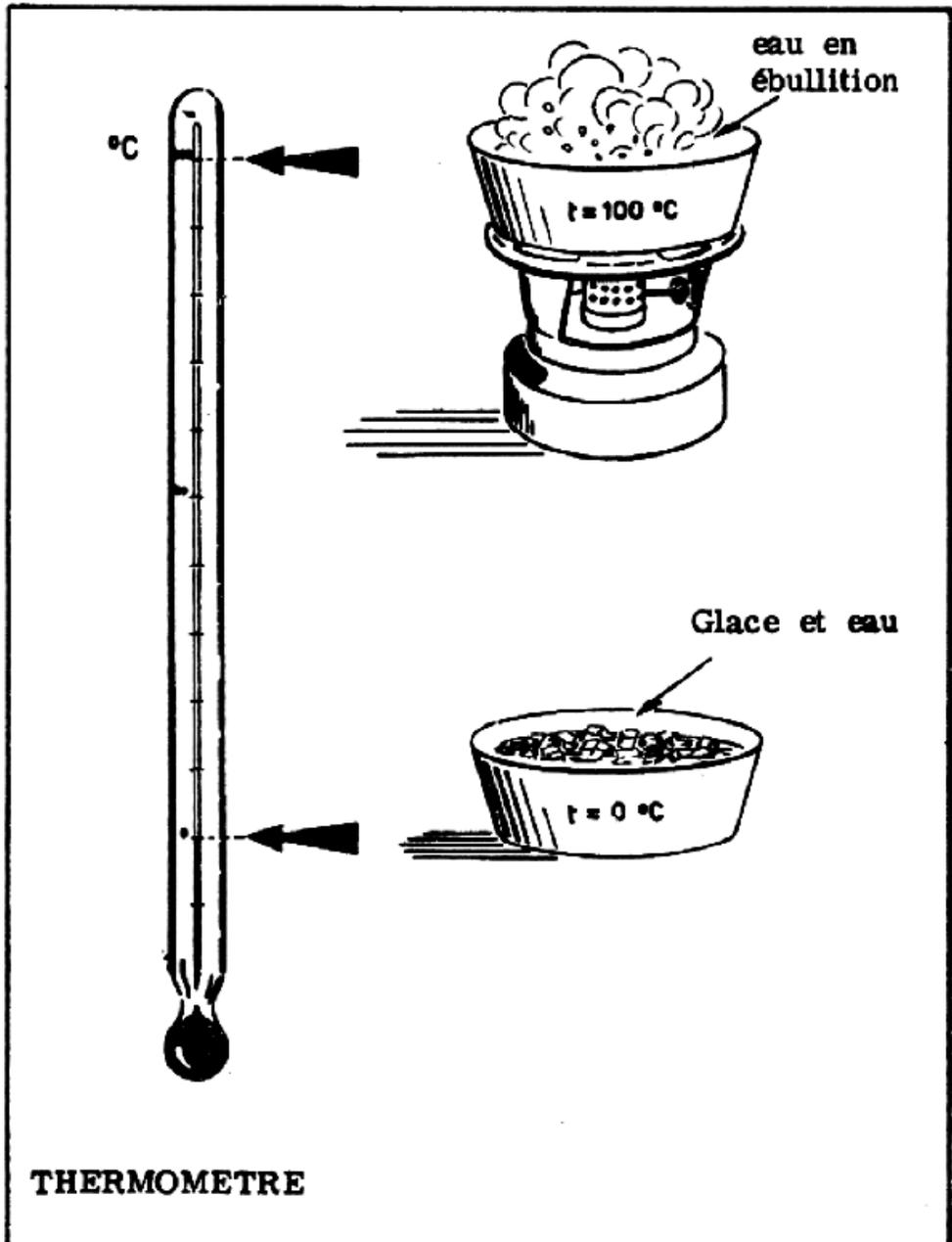


Figure 13

fondante (0°C) et celle de l'eau en ébullition (100°C). Le degré centigrade est habituellement désigné par le symbole $^{\circ}\text{C}$.

Le fonctionnement de l'instrument est très simple. Lorsque le ballon est mis en contact avec le corps dont on désire mesurer la température, le mercure s'échauffe, prend la même température que ce corps et se dilate proportionnellement à son échauffement.

En se dilatant, le mercure monte dans le tube gradué et son niveau indique sur l'échelle à combien de degrés centigrades, au-dessus ou au-dessous de zéro, se situe la température du corps.

Il existe aussi d'autres thermomètres munis d'échelles différentes de l'échelle centigrade ; mais nous ne les décrirons pas ici parce qu'ils ne présentent pas d'intérêt pratique, du moins en France, où l'on se sert uniquement de l'échelle centigrade.

En se référant aux mesures de température on a défini l'unité de mesure de la quantité de chaleur, à savoir la GRANDE CALORIE.

En effet, la grande calorie est définie comme étant la quantité de chaleur nécessaire pour porter une masse d'1 kg d'eau de la température de $14,5$ à celle de $15,5^{\circ}\text{C}$.

La PETITE CALORIE, très usitée pour indiquer une quantité de chaleur, est un sous-multiple de la grande calorie, égale à $1/1000$ de cette dernière.

Il reste à voir comment les corps se refroidissent, c'est-à-dire comment ils perdent de la chaleur. Ce phénomène est habituellement désigné dans le langage technique sous le nom de DISSIPATION THERMIQUE.

La dissipation thermique peut se produire de trois façons, indiquées sur les illustrations de la figure 14.

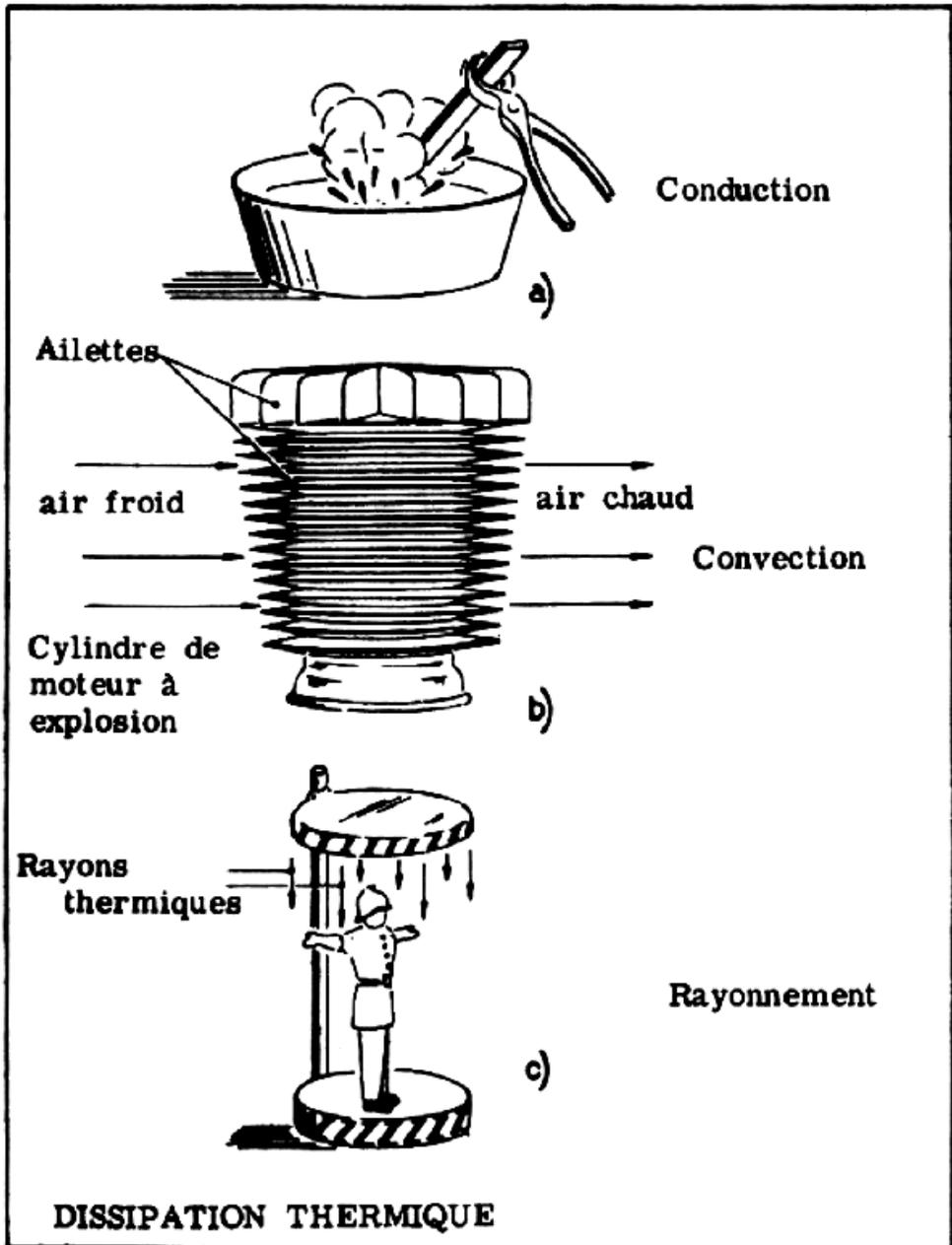


Figure 14

La dissipation par **CONDUCTION** (figure 14-a) est due à la diffusion de l'agitation thermique, comme on l'a vu précédemment.

En nous rappelant que la diffusion cesse quand les corps en contact atteignent la même température, il paraît évident que la dissipation par conduction n'est possible que lorsque des différences de température existent.

La dissipation par **CONVECTION** (figure 14-b) se produit quand un gaz, par exemple l'air, ou bien un liquide, vient en contact avec un corps chaud ; il se réchauffe alors par conduction et en s'éloignant emporte avec lui une certaine quantité de chaleur.

Lorsqu'on désire refroidir un corps par ce système, il convient d'en augmenter la surface extérieure ; à cet effet, on superpose de nombreuses **AILETTES DE REFROIDISSEMENT** dont le but est justement d'étendre et d'améliorer le contact entre le corps chaud et l'élément réfrigérant.

Même lorsque tout refroidissement, que ce soit par conduction ou par convection est impossible, on constate cependant des pertes de chaleur, mais en proportion très réduite.

Ce phénomène est dû à la formation des **RAYONS THERMIQUES** qui se propagent dans l'espace de la même manière que la lumière. Nous entrons donc ici dans un nouveau domaine, dont nous allons commencer l'étude au cours des prochaines leçons de physique.

Le **RAYONNEMENT** (figure 14-c) est produit de façon très efficace par des appareils appropriés et on l'utilise dans des applications particulières, comme par exemple pour le chauffage des agents s'occupant de la circulation urbaine, qui a été adoptée par certaines administrations municipales.

