

COURS DE PHYSIQUE

pour débiter ses études en **santé**

PASS-LAS
Licence

COURS DE PHYSIQUE

pour débiter ses études en **santé**

Denis **Mariano-Goulart**



Conception graphique couverture : Éric VIGIER

ISBN 9782340-113985

Dépôt légal : avril 2026

©Ellipses Édition Marketing S.A.

8/10 rue la Quintinie 75015 Paris



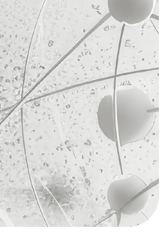
Le Code de la propriété intellectuelle et artistique n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.editions-ellipses.fr

Prête au vrai maintenant une oreille attentive,
Nette de tout souci, aiguise ton esprit,
Et mes dons, apprêtés avec un soin fidèle,
Garde d'en faire fi avant d'y rien comprendre,
Car je vais t'exposer les hautes lois du ciel
Et des dieux, dévoiler d'où procèdent les choses.

Lucrèce. *De rerum natura*, Chant 1, vers 50-55
Traduction d'Olivier Sers, Belles lettres, 2012.



Préambule

I- La physique est une science de la nature

Du fond de sa caverne, Platon reléguait les phénomènes qu'il observait au rang d'images imparfaites et dégradées de concepts généraux, les Idées. La science pour sa part, dès les origines, a pris le contre-pied de cette approche idéaliste pour considérer le monde observable comme une réalité objective, indépendante de l'observateur. Son approche matérialiste met l'expérience sensible au premier plan.

En sciences, toute démarche commence par une observation minutieuse d'un phénomène naturel, puis par une tentative de modélisation théorique de cette observation. Elle se poursuit par une confrontation des prévisions de cette modélisation avec des observations dont les conditions sont contrôlées au mieux, suivant un protocole expérimental précis.

Cette confrontation à l'expérience amène parfois à réfuter ou à valider l'idée que l'on se fait de la nature des choses. Le plus souvent, elle conduit à amender et améliorer une théorie antérieure pour mieux décrire le monde tel qu'il nous apparaît.

Au fil des siècles, cette approche s'est nourrie d'observations mettant en jeu d'abord les cinq sens naturels, puis des instruments de mesure de plus en plus sophistiqués permettant d'expérimenter dans un cadre toujours mieux contrôlé. Mais les résultats de ces expériences sont variables dans le temps et l'espace : au fil de l'année, le soleil s'élève plus ou moins haut sur l'horizon, chauffe plus ou moins, les durées de la journée varient...

Pour fixer ces observations, s'en faire une idée et comprendre d'où elles procèdent, l'homme eut recours d'abord au langage et aux éléments de logique portés par la grammaire qui permettent de définir les objets d'observation et d'exprimer des liens entre ces derniers. Les premiers modèles qui permirent à l'humanité de se faire une idée de la nature furent ainsi portés par des mythes et des récits fondés sur la logique naturelle du langage et du cerveau humain. Les observations se perfectionnant, elles devenaient plus riches et plus complexes. Pour les expliquer (au sens propre du terme, les déplier donc), il a fallu commencer par les simplifier au moyen de protocoles expérimentaux contrôlés limitant les paramètres en jeu, puis s'attacher à les décrire par des modèles logiques aussi simples que possible. C'est probablement à ce moment que naquit la physique dont l'étymologie fait référence à une science expérimentale de la nature. Cette science repose sur des théories qui conduisent à une modélisation du monde visant à en expliquer certains aspects,

théories dont les prévisions n'ont eu de cesse d'être comparées aux résultats expérimentaux d'observations qui infirment certains modèles et en valident d'autres à une certaine précision près. Au fil des siècles, les modèles validés par l'observation se sont comportés à la manière de poupées russes, chaque nouveau modèle issu d'une théorie nouvelle venant affiner le modèle précédent et assurer une adéquation plus exacte avec les données toujours plus précises des observations expérimentales.

L'histoire de l'astronomie nous en donne un exemple, parmi d'autres : les peuples antiques observaient la course quotidienne du soleil d'est en ouest et l'imaginaient associée aux pérégrinations d'une divinité. Après Pythagore, des savants grecs tels qu'Eudoxe de Cnide (IV^e siècle avant J-C) puis Hipparque (II^e siècle avant J-C) et Ptolémée (II^e siècle après J-C) exploitèrent leurs connaissances en géométrie pour affiner les premiers modèles géocentriques et les ajuster plus précisément aux mesures astronomiques qu'Égyptiens, Babyloniens puis Grecs avaient colligées depuis des siècles. Ce premier modèle géométrique de l'univers fut complexifié et affiné tout au long du Moyen Âge. Il se révéla très efficace pour prédire les mouvements des corps célestes et les éclipses, ou pour fournir des outils pour la navigation. Treize siècles plus tard, les progrès dans les instruments optiques d'observation astronomique conduisirent à la révolution copernicienne. Sans remettre en cause l'ensemble des acquis astronomiques de son époque, ce nouveau modèle déplaça de la terre au soleil le centre des orbites des planètes connues. Après quelques améliorations dues à T. Brahé, J. Kepler et G. Galilée au tournant des XVI^e et XVII^e siècles, ce modèle héliocentrique finit par supplanter les capacités prédictives des épicycles de Ptolémée. A la fin du XVII^e siècle, les progrès en calcul différentiel dus à G.W. Leibniz et I. Newton permirent à ce dernier de développer sa théorie de la gravitation universelle (1687). Les lois de Kepler y trouvèrent une justification, tout comme les observations astronomiques de l'époque, jusqu'à prédire l'existence d'une planète, Neptune, qui échappait alors à l'observation (U. Le Verrier, 1846). En dépit de ses succès, cette théorie fut à son tour supplantée par la théorie de la gravitation d'A. Einstein connue sous le nom de relativité générale (1915). Encore une fois, cette dernière ne niait pas les résultats scientifiques de Newton, mais les reléguait à la place d'une bonne approximation d'un modèle plus complexe capable d'expliquer certaines observations subtiles qui n'entraient pas dans le cadre de l'approximation des lois de Newton : anomalies observées dans l'orbite de la planète Mercure, courbure des rayons lumineux au voisinage d'un astre, variabilité de l'écoulement du temps au voisinage d'une masse, etc. Au-delà de ces points, la relativité générale allait donner les clés d'une nouvelle compréhension du temps et de l'espace, de l'histoire de notre univers (univers en expansion, big bang...) et aboutir à la

prédiction d'objets nouveaux et surprenants désormais observés (trous noirs, ondes gravitationnelles...), et dont l'étude reste en cours.

En reprenant les mots d'Albert Einstein à propos des travaux de Louis de Broglie, ces modèles ont, au fil des siècles, peu à peu levé le voile sur la réalité du monde physique dans lequel nous vivons, à la manière d'une brume qui, au petit matin, se dissipe progressivement et dévoile les détails d'un paysage. Là encore, l'étymologie de ces génies du langage que furent les grecs anciens est révélatrice : dans leur langue, le mot vérité s'identifie au dévoilement d'un objet caché, à une réminiscence d'une expérience oubliée.

Ce livre invite à suivre le conseil qu'Isaac Newton donnait à Robert Hooke en 1675 : à défaut de se dresser sur leurs épaules, du moins se laisser accompagner par les idées de quelques géants tels que Ludwig Boltzmann, Louis de Broglie, Albert Einstein et quelques autres pour donner aux étudiants se destinant à une profession de santé ou à des études de sciences et, plus généralement, à tout lecteur exigeant et curieux, les bases nécessaires pour lever un coin du voile sur le monde physique qui nous entoure.

II- Expliquer l'origine des lois physiques au lecteur non spécialiste

Etudier la physique pour une personne qui se destine à une profession de santé (médecin, pharmacien, maïeuticien, odontologiste, biologiste, etc.), ou simplement pour quelqu'un de curieux sans formation scientifique universitaire n'est pas chose aisée. Contrairement à un étudiant en physique, ceux-ci ne disposent généralement pas de la maîtrise des outils mathématiques qui permettent de modéliser, puis d'explorer le monde qui nous entoure en s'appuyant sur un raisonnement formel et abstrait. Or les domaines de la physique qui concernent directement le professionnel de santé, ceux qui fondent la physiologie ou sont à la base de l'imagerie et de la biologie moderne, relèvent presque tous d'une physique qui ne s'est développée qu'au tournant du XX^e siècle, sur des bases mathématiques qui ne constituent pas un héritage commun à la majorité des lecteurs.

Il existe d'excellents ouvrages didactiques de physique, rigoureux et écrits par des scientifiques de renom ou des enseignants de talent. La bibliographie en fin d'ouvrage en cite quelques-uns parmi les plus populaires. Mais ces exposés requièrent une culture mathématique généralement enseignée en fin de licence

ou en maîtrise de physique ou de mathématiques. Ils sont de ce fait essentiellement destinés aux seuls physiciens ou mathématiciens en formation. De l'autre côté du spectre, de très nombreux ouvrages destinés au grand public s'efforcent de vulgariser les idées les plus fondamentales, ou les plus contre-intuitives, issues des progrès de la physique. Ces livres sont l'œuvre de physiciens de talent qui se contraignent à n'utiliser aucun argument mathématique pour partager leur passion avec un lectorat le plus large possible. Cette approche a le grand mérite de faire rentrer la connaissance scientifique dans le cadre de la culture générale qui fait société et que tout un chacun se devrait probablement de partager, « pour l'honneur de l'esprit humain » selon le mot du mathématicien Jean Dieudonné. Elle n'est cependant pas sans risque au sens où, faute de se donner les moyens de démontrer, ou du moins de justifier les faits scientifiques décrits, ces derniers peuvent être relégués au rang d'opinions subjectives dépendant de l'individu, du temps ou du lieu où elles sont énoncées. La notion même de sciences s'y dissoudrait.

L'ouvrage de physique que nous proposons se situe à mi-chemin entre ces deux approches pédagogiques. Le parti pris par l'auteur est de ne rien affirmer qui ne soit démontré, ou au minimum justifié, de manière à ce que les résultats énoncés apparaissent comme les conséquences d'un raisonnement logique accessible au plus grand nombre. Celui-ci s'appuiera sur le strict nécessaire en matière de formalisme mathématique et sera détaillé dans ses moindres détails, pas à pas et sans raccourci, de manière à accompagner le lecteur tout au long de l'exposé des idées qui conduisent à énoncer quelques-unes des principales lois de la physique.

Cela suppose de faire l'hypothèse d'un minimum de connaissances mathématiques maîtrisées par le lecteur. Ce minimum a été choisi au niveau des enseignements de mathématiques de fin de lycée. S'il n'est pas maîtrisé, ou s'il a besoin d'être rappelé, une annexe en fin d'ouvrage regroupe toutes les notions de mathématique et de physique requises pour tirer le meilleur profit de ce livre.

Dans ces conditions, et moyennant au besoin l'étude préalable de cette annexe, ce livre s'adresse à tout lecteur désireux de comprendre d'où proviennent les grandes idées de la physique moderne, et pourquoi il n'y a rien de magique dans le principe de moindre action ou dans la notion d'entropie, ni dans les idées suivant lesquelles un électron est à la fois une onde et une particule, qu'il ne peut prendre dans un atome que des niveaux d'énergie précis, ou qu'il est impossible de lui associer une trajectoire déterminée. Ce livre se veut donc être aussi un livre de vulgarisation, mais une vulgarisation exigeante qui offrira au lecteur attentif, au prix d'un certain effort, une vraie compréhension des idées qui sous-tendent la physique moderne.

L'auteur a bénéficié pendant près de quarante ans de l'enseignement de ses étudiants de première et deuxième année de médecine. Ces derniers ont fini par le convaincre que cet effort de modélisation de la physique au moyen d'outils mathématiques limités est nécessaire et suffisant pour permettre à des étudiants en santé (médecine, pharmacie, odontologie, maïeutique, etc.) d'assimiler correctement les notions de physique qui sont indispensables à l'apprentissage de la physiologie, des techniques de laboratoire, de l'imagerie médicale, et de certaines techniques thérapeutiques (radiothérapie en particulier), puis à l'exercice d'un métier de soin tout au long de leur vie professionnelle.

Ce livre a été pensé principalement pour eux. Il présente toutes les notions de physique qui sont nécessaires dans les premières années d'un cursus universitaire en santé pour aborder sereinement et sur des bases solides la biophysique et les technologies complexes utilisées dans le soin. A ce titre, il respecte les limites du programme de biophysique et d'imagerie médicale tel qu'il a été conçu par le Collège des Enseignants de Biophysique et Médecine Nucléaire pour la première d'année universitaire de préparation à des études de santé.

La lecture de cet ouvrage pourra aussi être un outil utile pour tout élève de fin de lycée désirant se préparer à des études universitaires en santé, en sciences, ou à des classes préparatoires scientifiques, agronomiques ou vétérinaires. Il regroupe nombre de lois physiques finalement relativement simples à justifier qui permettent d'aborder ces formations avec des idées claires.

La méthode pédagogique que nous adoptons vise à proposer à l'étudiant un exposé raisonné et justifié de deux grands domaines de la physique contemporaine qui sont importants pour des étudiants en santé : la physique atomique et nucléaire d'une part, la thermodynamique d'autre part.

Chaque fois que ce sera pertinent, une brève mise en situation historique destinée à agrémenter la lecture et à montrer que la physique est aussi une science humaine introduira la notion abordée. Celle-ci sera ensuite traitée avec toute la rigueur scientifique possible mais en évitant systématiquement le recours à des outils mathématiques qui ne sont pas abordés dans les enseignements scientifiques des lycées. Toutes les propositions énoncées seront systématiquement démontrées ou justifiées, au moins à un certain niveau d'approximation, évitant l'écueil du formulaire de physique indigeste, dénué de sens, et qui ne permet pas au lecteur de fonder ses connaissances sur des bases solides. Cette approche permet par ailleurs de bien mettre en lumière l'aspect scientifique, objectif et rationnel des lois physiques, à mille lieux de tout énoncé sensationnel qui, non expliqué ni justifié, pourrait paraître pour le moins ésotérique.

Les domaines de la physique abordés dans cet ouvrage vont nous amener à accompagner le lecteur à travers les révolutions conceptuelles dont a bénéficié l'histoire de la physique à la fin du XIX^e siècle et à l'aube du XX^e siècle : ondes, atomistique, dualité onde-corpuscule, mécanique quantique et relativité dans un premier chapitre, mécanique statistique, thermodynamique et équilibres de part et d'autre d'une membranes biologique dans un second. Ces deux chapitres peuvent être lus indépendamment.

Le premier chapitre vise principalement à introduire le concept de **dualité onde-corpuscule** suivant lequel tout objet physique peut et doit être modélisé à la fois comme une onde et comme une particule si l'on veut en décrire l'ensemble de ses manifestations. Cette idée qui date du début du XX^e siècle (1923) est la clé qui permet de modéliser un atome (donc de fonder la chimie moléculaire), mais aussi de comprendre les bénéfices et les dangers de l'utilisation de certains rayonnements en imagerie médicale (radiologie et médecine nucléaire), en radiothérapie (externe ou interne) ou en laboratoire d'analyse médicale.

Cela nécessitera de commencer par définir ce qu'est une **onde** et par en donner un modèle mathématique. Nous justifierons ensuite le **principe de moindre action**, en réalité un théorème (démontrable donc), dont nous ferons le plus grand usage dans tout ce qui suivra. Il nous permettra de comprendre comment une onde se **propage** dans un milieu homogène. A titre d'exemples essentiels, nous définirons, décrirons et caractériserons les **ondes sonores et électromagnétiques**. Ces connaissances seront directement utiles aux professionnels de santé pour comprendre d'une part le fonctionnement et les pathologies de la vision et de l'audition humaine, et d'autre part les techniques de radiothérapie et d'imagerie utilisées dans les centres de soins (échographie, radiologie, imagerie par résonance magnétique nucléaire, imagerie scintigraphique gamma, imagerie par émission de positons, etc.). L'établissement des **lois de la réflexion et de la réfraction** permettra de comprendre comment une onde se propage dans un milieu hétérogène, comment fonctionne un œil humain normal, et comment sont corrigées certaines déficiences visuelles au moyen de lunettes ou de lentilles. Nous étudierons ensuite comment des **ondes stationnaires** peuvent s'établir entre deux miroirs, ce qui constituera une première approche de la **quantification** des grandeurs physiques. Nous terminerons cette partie en étudiant comment une onde traverse un orifice en **diffractant** et en produisant des **interférences**. Cela nous permettra de définir la **résolution** d'un appareil d'imagerie (dont ceux utilisés en imagerie médicale), de déterminer comment **échantillonner** une image, et de comprendre comment les modèles tridimensionnels des molécules peuvent être déterminés. Ces éléments de physique des ondes

expliqués, l'exploitation du principe de moindre action nous amènera très naturellement à une **modélisation duale, onde-particule**, de la nature. Il sera alors temps de faire un détour dans le monde étonnant de la **relativité restreinte** pour expliquer la relativité de l'écoulement du temps et justifier l'énergie qui est associée à une masse au repos. Cela nous permettra de comprendre pourquoi l'**énergie d'un photon**, la particule associée à une onde électromagnétique, est proportionnelle à la fréquence de cette onde. Un retour sur les expériences de diffraction nous permettra de nous faire une idée de l'origine des phénomènes aléatoires qui régissent le comportement d'une particule élémentaire, et justifient les **relations d'incertitudes d'Heisenberg**. Enfin, la notion d'onde stationnaire décrite précédemment dans le cadre de la physique classique éclairera le concept de **quantification** des grandeurs physiques associées aux particules élémentaires, et en particulier de leur énergie. Ce premier chapitre se continuera dans les pas du physicien Niels Bohr pour établir un **modèle d'atome** où l'on constatera que les électrons atomiques se répartissent sur des couches énergétiques discrètes. Ce modèle, et ses améliorations ultérieures que nous expliciterons dans les limites des prérequis mathématiques admis (**équation de Schrödinger** et **fonction d'onde**) est à la base de toute la **chimie moderne** (théorie des orbitales moléculaires, liaisons covalentes, etc.), mais aussi des **sources des rayonnements ionisants** utilisés en imagerie ou dans les laboratoires d'analyse médicale. Nous terminerons ce premier chapitre en nous intéressant au noyau atomique cette fois, pour décrire les réactions de **désintégrations radioactives** qui peuvent se produire au sein des noyaux de certains atomes, et préciser comment les médecins nucléaires les exploitent en imagerie scintigraphique et en radiothérapie interne vectorisée.

Le second chapitre est consacré à l'étude de la thermodynamique, une autre révolution majeure en physique de la fin du XIX^e siècle. Elle décrit, entre autres choses, les transferts de chaleur et de matière (eau ou solutés) au sein des compartiments biologiques, fonde la physiologie cellulaire et permet de comprendre les mécanismes de l'homéostasie d'un organisme humain. Après une brève introduction, nous adopterons une approche mécanique simple pour définir, dans le cadre de la **théorie cinétique des gaz parfaits**, les grandeurs élémentaires de la thermodynamique que sont la **pression**, la **température** et la **chaleur**. Nous démontrerons les lois de **Boyle-Mariotte** et de **Dalton** qui lient ces grandeurs. Nous établirons ensuite les **trois principes fondamentaux de la thermodynamique**, en adoptant pour le deuxième principe une approche de physique statistique due à L. Boltzmann qui permet de se faire une idée claire de ce qu'est l'**entropie**. Ces éléments nous permettront d'introduire les notions d'**énergie libre** et de **potentiel chimique**,

puis d'établir un pilier de la chimie que constitue la **loi d'action de masse** et son application aux équilibres acido-basiques (**pH**).

La suite du chapitre exploitera les notions de thermodynamique présentées pour étudier comment un solvant, des solutés ou de la chaleur peuvent traverser des membranes biologiques (membranes cellulaires ou limitant des organites intracellulaires) pour assurer l'homéostasie du milieu intérieur d'un organisme biologique. Ce sera l'occasion d'établir la **loi de Fick** (diffusion passive d'un solvant, de solutés non chargés électriquement ou de chaleur), les **lois de Nernst, de Goldman et de Donnan** (diffusion passive de solutés chargés électriquement). En généralisant ces lois, nous pourrions alors donner une première approche des transports actifs qui ont lieu de part et d'autre des membranes biologiques, et sont à la base de l'électrophysiologie cellulaire.

Le second chapitre se terminera en exploitant les notions de thermodynamique étudiées pour décrire les **propriétés colligatives** des solutions qui caractérisent la variation d'une grandeur physique (pression, pression de vapeur saturante, températures d'ébullition ou de fusion) en fonction de la concentration de particules dans un soluté, comparé au solvant pur. Nous établirons à cette fin la **loi de van't Hoff** qui définit la **pression osmotique** et permet de comprendre les phénomènes de diffusion d'eau qui ont lieu au niveau des vaisseaux capillaires humains. Nous terminerons le chapitre par l'établissement des trois **lois de Raoult** (utilisées en laboratoire pour déterminer des masses molaires de substances dissoutes par exemple) et la **loi de Henry**, qui permet de comprendre l'origine du mal des montagnes, de la narcose ou des accidents de décompression qui peuvent survenir en plongée avec scaphandre autonome.

La physique, comme science de la nature fut d'abord une branche de la philosophie qui s'est développée avec les penseurs pré Socratiques. Les observations d'Aristote, puis le développement de la géométrie d'Euclide, lors de la période alexandrine, ont permis une première modélisation mathématique de la physique, mais celle-ci n'a vraiment émergé comme science au sens moderne du terme qu'au XV^e siècle, avec les travaux en mécanique et en astronomie de N. Copernic (1473-1543) et G. Galilée (1546-1642). Au XVII^e siècle, le développement du calcul différentiel par G. W. Leibnitz (1646-1716) permit l'éclosion d'une première révolution qui vit le recours systématique à la formalisation mathématique en physique. Pendant près de deux siècles, les progrès de la physique furent majeurs, aboutissant à la fin du XIX^e siècle à des résultats qui satisfaisaient globalement les physiciens. Ce modèle physique du monde était alors dualiste, considérant la réalité physique soit de façon corpusculaire, soit d'un point de vue ondulatoire. L'approche corpusculaire, solidement fondée sur les principes fondamentaux de la mécanique (L. Lagrange 1736-1813) avait rencontré les succès les plus flagrants, tant dans l'étude du mouvement que de la thermodynamique (théorie cinétique des gaz de L. Boltzmann 1844-1906) ou de la chimie. L'approche ondulatoire, initiée par A. Fresnel (1788-1827) en optique, avait également connu un grand succès au XIX^e siècle avec la théorie électromagnétique de J.C. Maxwell (1831-1879) qui unifiait optique, électricité et magnétisme et prédisait l'existence d'ondes électromagnétiques, mises en évidence vingt ans plus tard par H.R. Hertz (1857-1894). A l'aube du XX^e siècle, il restait quelques résultats expérimentaux imparfaitement modélisés par ces deux approches (rayonnement du corps noir, stabilité du modèle atomique planétaire, valeur de la vitesse de la lumière dans des repères mobiles...). Les recherches visant à les résoudre ont permis de développer une théorie physique plus complète, applicable aussi à l'échelle atomique et subatomique et assumant de façon cohérente la nécessité d'une description complémentaire, ondulatoire et corpusculaire de la nature.

Dans ce chapitre, nous commencerons par étudier la notion centrale d'onde progressive et ses caractéristiques au moyen d'un modèle ondulatoire classique. Nous appliquerons ensuite celui-ci à deux catégories particulières d'ondes, les ondes sonores et les ondes électromagnétiques, dont la lumière est un cas particulier. Cela nous permettra d'introduire les éléments de physique qui pourront permettre d'aborder ultérieurement l'étude de la vision et de l'audition, ainsi que de leurs pathologies.

Une approche théorique élémentaire de modes particuliers de propagation d'ondes progressives (réflexion totale entre deux miroirs, diffraction, interférences) nous permettra d'introduire simplement la notion de dualité onde-corpuscule qui fonde la mécanique ondulatoire moderne (ou mécanique quantique) et permet de comprendre la structure des atomes, base de toute la chimie. Elle éclairera aussi utilement la compréhension de la notion de résolution d'un appareil d'imagerie médicale. Nous terminerons ce chapitre en utilisant le modèle d'atome établi et les notions de physique décrites pour détailler la nature des sources de rayonnements ionisants utilisées en santé que ce soit à des fins d'imagerie ou à des fins de radiothérapie.

I. Physique des ondes

Ce paragraphe commence de façon un peu formelle par définir et modéliser la notion d'onde progressive et les grandeurs physiques fondamentales qui lui sont associées (célérité, fréquence, pulsation propre et période, longueur d'onde, phase, vecteur d'onde, surface d'onde). Cette modélisation permettra immédiatement de justifier un des principes de base de la radioprotection. On explique ensuite pourquoi, moyennant quelques conditions non restrictives en physique, toute onde progressive périodique est la superposition d'ondes progressives sinusoïdales, ce qui permettra de limiter la suite de l'exposé au cas simple de ces ondes. Ce modèle sera exploité pour justifier le principe de moindre action et expliquer par exemple pourquoi un rayon lumineux se propage en ligne droite dans un milieu homogène. Pour ancrer ces concepts un peu abstraits dans la réalité physique, on décrira ensuite deux types d'ondes plus ou moins familières au lecteur : l'onde sonore d'abord dont la modélisation permettra d'introduire l'onde de pression acoustique associée à un son, puis de déterminer la vitesse de propagation et la puissance surfacique d'un son, ainsi que la façon dont un son se propage d'un milieu à un autre de densité différente. Un détour dans le domaine de la psychoacoustique permettra enfin de définir l'intensité d'un son (en décibels) et sa hauteur. On illustrera ensuite le propos en partant de quelques bases d'électrostatique et de magnétostatique pour introduire la notion d'onde électromagnétique. Le lecteur sera initié aux équations de Maxwell sous un formalisme minimal qui permettra de décrire la nature ondulatoire de ces phénomènes, le couplage entre champs électrique et magnétique, et de calculer la vitesse de la lumière. Après définition de la notion de chemin optique, le principe de moindre action sera exploité pour établir les lois de la réflexion et de la réfraction, puis pour en déduire la formule de conjugaison du dioptré sphérique, qui permettra une première approche de la vision humaine et de certaines de ses pathologies (myopie, hypermétropie). Dans une approche plus générale, la loi de la

réflexion nous permettra d'introduire la notion d'onde stationnaire et d'initier le lecteur à une première approche de la quantification que nous utiliserons pour établir les fondements de la mécanique ondulatoire. Ce paragraphe se terminera en traitant du comportement d'une onde à la traversée d'un orifice (diffraction) et des phénomènes d'interférences qui s'ensuivent. Une application directe de ces notions permettra de définir la résolution d'un appareil d'imagerie, de déterminer comment il est possible de numériser une image sans perte de résolution et de comprendre les principes qui permettent de déterminer la géométrie d'une molécule (telle que l'ADN) à partir d'une image de diffraction de rayons X.

1. Onde progressive : définition et caractéristiques

a. Définition

Les ondes, et leurs interactions avec la matière vivante, sont au centre de nombreux phénomènes physiques importants pour le soignant. Ce sont d'abord les vecteurs de l'information captée par les organes sensoriels que sont la vue et l'ouïe en particulier. La compréhension de nombreuses pathologies auditives et ophtalmologiques passe par des idées claires sur les ondes associées, la lumière et le son. Ceci reste vrai pour les autres sens que sont l'odorat, le goût et le toucher, mais les implications des modèles physiques dans les pathologies associées à ceux-ci sont plus modestes.

Les ondes progressives sont aussi l'outil essentiel mis en jeu par toutes les techniques d'**imagerie médicale** pour sonder l'intérieur d'un organisme humain et permettre une grande partie des diagnostics faits dans les structures de soins. Enfin, ces mêmes ondes, utilisées différemment, peuvent détruire des tissus pathologiques et sont devenues un outil de soin précieux en **radiothérapie**. La compréhension des modes d'interactions d'ondes (ultrasonores, X, gamma, hertziennes) avec un tissu humain est essentielle pour qui veut connaître les limites des appareils d'imagerie utilisés en soins (du microscope aux appareils d'imagerie ou de radiothérapie les plus importants), mais aussi les avantages et les risques éventuels qu'ils impliquent pour les patients et les soignants.

Le terme même d'onde fait directement référence aux vaguelettes que l'on observe à la surface d'un plan d'eau lorsque celle-ci est déformée localement, par exemple en y jetant un petit caillou. Dans cette situation, la pierre en s'enfonçant à la surface du liquide entraîne avec elle les molécules de la surface liquidienne. La surface se creuse, puis du fait de propriétés élastiques

de la surface liquidienne, revient à sa position initiale tout en entraînant les molécules d'eau voisines sous la surface initiale du liquide, reproduisant dans ce voisinage immédiat l'effet de la chute du caillou. Ce retour du point d'impact de la pierre à sa position d'équilibre s'accompagne de la formation de vaguelettes qui se propageront de façon centrifuge à partir du point d'impact. La hauteur de ces vaguelettes peut varier avec la masse du caillou, mais dans tous les cas, la vitesse de propagation des rides à la surface de l'eau semble inchangée. Cette observation très simple est un exemple typique d'onde progressive : on y retrouve un milieu de propagation (la surface du liquide) qui subit une perturbation d'une de ses caractéristiques physiques (l'altitude de la surface du liquide) sous l'effet d'une source d'énergie extérieure (l'impact du caillou), et une perturbation qui se propage en fonction seulement de caractéristiques physiques du milieu (propriétés élastiques de la surface en l'occurrence).

La notion d'onde progressive, notion centrale en physique, recouvre bien d'autres aspects et peut être utilisée pour modéliser des réalités physiques aussi différentes que le son, la lumière, ou des actions mécaniques sur des solides (compressions, oscillations, chocs). En toute généralité, on définira donc une onde progressive de la façon suivante :

- 1- Une **onde progressive** est la propagation dans un milieu donné (matériel ou vide) d'une perturbation entretenue d'une ou plusieurs caractéristiques physiques de ce milieu (par exemple, une position de particules, une pression, une température, un champ électrique ou magnétique etc.). La vitesse de propagation de cette perturbation sera appelée **célérité** de l'onde.
- 2- Une onde progressive sera dite **scalaire** lorsque la grandeur physique perturbée est quantifiée par un nombre réel, **vectorielle** lorsqu'elle est quantifiée par un vecteur.
- 3- Une onde progressive sera qualifiée de **longitudinale** lorsque la grandeur est perturbée dans la direction de propagation de l'onde, **transversale** lorsque la grandeur est perturbée dans la direction orthogonale à la propagation de l'onde.
- 4- Enfin, dans le cas d'une onde progressive vectorielle, le vecteur caractérisant la grandeur physique perturbée peut garder une direction constante durant la propagation de l'onde. On parle alors d'onde **polarisée rectilignement**. Si ce vecteur tourne avec une vitesse angulaire constante perpendiculairement à la direction de

propagation, en décrivant une hélice, sans changer de norme, on parlera de **polarisation circulaire**. Le terme de **polarisation elliptique** sera réservé à un vecteur décrivant une ellipse le long de sa direction de propagation.

Nous allons illustrer et éclairer ces définitions par quelques exemples simples.

b. Exemples

La figure 1-1 donne un exemple d'onde progressive scalaire longitudinale de vibration où la grandeur physique perturbée est la position de molécules d'air selon une direction notée x . Le lecteur peut avoir une expérience directe de ce type d'onde qui n'est rien d'autre qu'une onde sonore générée par une corde ou une surface vibrante telle que la membrane d'un haut-parleur (HP).

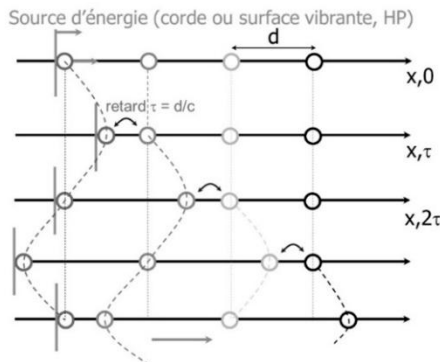


Figure 1-1 : Onde sonore produite par la mise en oscillation de proche en proche de molécules d'air au moyen d'une corde (violon...) ou d'une surface (tambour, haut-parleur, cordes vocales) vibrante.

Le milieu de propagation est de l'air constitué de molécules d'azote et d'oxygène séparées d'une distance moyenne d en l'absence de son. Lors de sa mise en fonction à l'instant $t = 0$, la membrane d'un haut-parleur entraîne dans un mouvement oscillant les molécules d'air directement à son contact (représentées par des cercles dans la figure 1-1). Dans l'intervalle de temps $[0, \tau]$, ces molécules se rapprochent de leurs voisines, augmentant progressivement la densité locale de molécules, donc la pression locale (suivant la loi de Boyle-Mariotte, équation 2-6). Cette surpression exerce alors une force de pression sur la molécule voisine de celle initialement mise en mouvement, lui impulsant à son tour un déplacement dans le sens de propagation de l'onde, celui des x positifs dans cet exemple, et repoussant dans le sens opposé la molécule initialement mise en mouvement. La deuxième molécule jouera alors le même rôle d'initiation d'un mouvement oscillant pour

sa voisine de droite, et ainsi de suite, de proche en proche. Cet exemple simple illustre plusieurs points essentiels. D'une part le mouvement oscillant de la membrane du haut-parleur se voit reproduit de proche en proche à l'identique, chaque molécule jouant successivement le même rôle de source d'onde pour sa voisine que le haut-parleur. Si ce mouvement est identique, il ne débute cependant pas au même instant pour chaque molécule. La première est mise en mouvement à l'instant $t = 0$ où débute l'oscillation du haut-parleur. La deuxième molécule, elle, n'est mise en mouvement que lorsque la première, celle au contact de la membrane du haut-parleur, finit par venir à son voisinage immédiat, ce qui nécessite un certain intervalle de temps égal à la distance moyenne d qui sépare deux molécules au repos divisée par la célérité de l'onde sonore, c'est-à-dire par la vitesse à laquelle l'ordre de se mettre en vibration arrive aux différentes molécules d'air. Chaque molécule débutera son mouvement oscillant avec un retard d/τ par rapport à sa voisine qui est à l'origine de ce mouvement.

La figure 1-2 constitue un autre exemple d'onde progressive scalaire, transversale cette fois. La grandeur physique perturbée est la position suivant une direction verticale de portions d'une corde tendue par une force de tension T . La propagation se fait le long de cette corde qui constitue le milieu de propagation, dans une direction horizontale. La source de l'onde est une baguette fixée à une extrémité de la corde qui lui impose un mouvement oscillant.

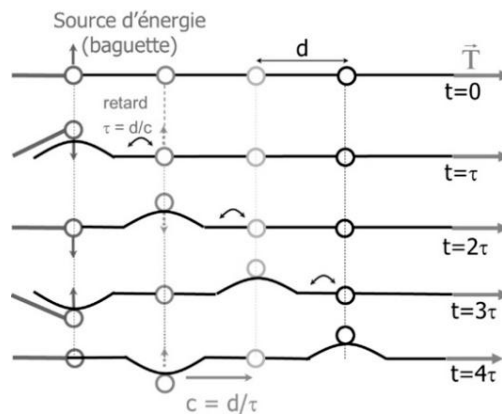


Figure 1-2 : Propagation d'une onde progressive transversale de vibration le long d'une corde tendue, ou de la surface d'un plan d'eau.

De même que pour le premier exemple, le mouvement oscillant de la portion de corde fixée à la baguette se propage de proche en proche le long de la corde, entraînant chaque portion de corde à initier successivement un mouvement analogue à celui de la baguette avec un retard égal au temps mis par l'onde

pour se propager jusqu'à elle. Si la ligne noire représentée sur la figure 1-2 ne représente plus une corde mais une surface liquide initialement plane, et si l'on remplace la baguette, source de l'onde, par le jet d'un caillou qui dans sa chute entraîne la première molécule de liquide vers le fond, puis la laisse remonter, ce modèle permet aussi de comprendre comment des vaguelettes évoquées en introduction de ce chapitre se propagent à la surface d'un plan d'eau après y avoir jeté une petite masse.

La figure 1-3 donne un dernier exemple concernant cette fois une onde vectorielle transversale.

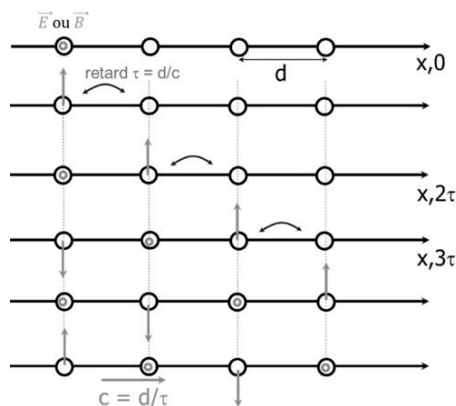


Figure 1-3 : Propagation d'une onde vectorielle transversale (électromagnétique par exemple).

Ce type d'onde aura une importance toute particulière dans ce qui suit puisqu'elle constitue un modèle des ondes électromagnétiques dont l'usage est majeur en diagnostic comme en thérapeutique humaine. La grandeur physique perturbée est ici un champ électrique ou magnétique polarisé rectilignement suivant une direction perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde (x) et dont la norme varie périodiquement avec le temps. Les équations de l'électromagnétisme montrent que dans cette situation, le champ induit l'apparition d'un champ analogue de proche en proche, avec un retard correspondant à la distance à la source de l'onde divisée par la célérité de l'onde dans le milieu considéré (matériel ou vide dans le cas des ondes électromagnétiques). Nous reviendrons longuement sur ce type d'onde dans le paragraphe 1-I-4 consacré à une introduction à l'électromagnétisme.

c. Modélisation

Considérons une onde progressive produite par la perturbation en un point de l'espace $x = 0$ d'une grandeur physique et se propageant dans la direction des x positifs.

A tout instant t , notons $g_0(t) = g(t, x = 0)$ la valeur de la perturbation de la grandeur physique au point $x=0$ où se trouve la source de l'onde.

Notons de même $g_x(t) = g(t, x)$ la valeur de la perturbation de la grandeur physique en un point situé à une distance x de la source, dans la direction de propagation de l'onde.

En un point à la distance $x > 0$ de la source et à l'instant τ , la perturbation de la grandeur physique au point x reproduit les perturbations observées au point $x = 0$, soit $g(\tau, 0)$, avec un retard correspondant au temps mis par l'onde pour se propager du point $x = 0$ au point x à la célérité c , soit un retard de x/c (figure 1-4).

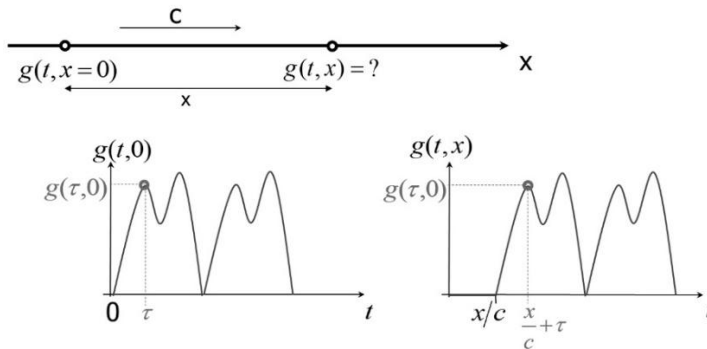


Figure 1-4 : Modélisation d'une onde progressive sinusoïdale

Dans ces conditions, pour tout instant τ , la grandeur physique au point x à l'instant $\tau + x/c$ prend la même valeur qu'à la source de l'onde ($x = 0$) à l'instant τ : $g\left(\tau + \frac{x}{c}, x\right) = g(\tau, 0)$.

En posant $t = \tau + \frac{x}{c}$, il apparaît immédiatement que pour tout instant t et pour toute onde se déplaçant dans le sens des x positifs, la perturbation de la grandeur physique observée au point x se déduit de celle présente à la source de l'onde suivant :

$$\boxed{\begin{aligned} g(t, x) &= g\left(t - \frac{x}{c}, 0\right) \\ g_x(t) &= g_0\left(t - \frac{x}{c}\right) \end{aligned}} \quad (1-1)$$

Dans le cas d'une onde progressive se déplaçant dans le sens des x négatifs, on aurait de même :

$$\begin{aligned} g(t, x) &= g\left(t + \frac{x}{c}, 0\right) \\ g_x(t) &= g_0\left(t + \frac{x}{c}\right) \end{aligned} \quad (1-2)$$

Si la fonction $g(t, x)$ est continue et deux fois dérivable par rapport à chacune de ses deux variables t et x , il est possible d'en calculer des dérivées par rapport à x ou t en considérant la variable par rapport à laquelle on ne dérive pas comme une grandeur constante. Ces dérivées sont appelées **dérivées partielles** et notées au moyen du symbole ∂ : $\frac{\partial g}{\partial x}(t, x) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\partial}{\partial x} g(t, x)$ et $\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}(t, x)$ désignent ainsi les dérivées première et seconde de la fonction g par rapport à la variable x , ces dérivées étant calculées en supposant la grandeur t non plus comme une variable, mais comme une constante.

En notant comme d'usage $g'_0(t)$ et $g''_0(t)$ les dérivées première et seconde de la fonction (de la seule variable temporelle) $g_0(t)$, la relation (1-1) donne :

En dérivant par rapport à la variable t :

$$\begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial t}(t, x) &= \frac{\partial g_0}{\partial t}\left(t - \frac{x}{c}\right) = g'_0\left(t - \frac{x}{c}\right) \\ \frac{\partial^2 g}{\partial t^2}(t, x) &= g''_0\left(t - \frac{x}{c}\right) \end{aligned}$$

Et en dérivant par rapport à la variable x :

$$\begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial x}(t, x) &= \frac{\partial g_0}{\partial x}\left(t - \frac{x}{c}\right) = -\frac{1}{c} g'_0\left(t - \frac{x}{c}\right) \\ \frac{\partial^2 g}{\partial x^2}(t, x) &= \frac{1}{c^2} g''_0\left(t - \frac{x}{c}\right) \end{aligned}$$

En comparant les deux dérivées secondes, on constate que la fonction $g(t, x)$ qui modélise une onde plane progressive satisfait à l'équation :

$$\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}(t, x) = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 g}{\partial t^2}(t, x) \quad (1-3)$$

Cette relation appelée **équation de d'Alembert** est caractéristique de la propagation d'une grandeur physique à la célérité c dans la direction x de

l'espace, donc d'une onde progressive. On peut en effet montrer que de façon réciproque, toute fonction $g(t, x)$ qui satisfait l'équation de d'Alembert (1-3) est de la forme $g(t, x) = f\left(t - \frac{x}{c}\right) + h\left(t + \frac{x}{c}\right)$ et correspond donc dans le cas le plus général à une onde progressive se propageant dans le sens des x positifs et/ou négatifs à la célérité c .

Dans la suite de cet exposé, nous nous intéresserons à des fonctions g périodiques, mais celles-ci peuvent par ailleurs être de natures très variées. Nous allons voir dans le paragraphe suivant qu'il est possible de limiter notre étude à des perturbations circulaires, c'est-à-dire modélisées par des fonctions sinus ou cosinus, ce qui permettra de modéliser complètement une onde progressive donnée.

d. Décomposition en série de Fourier

Considérons une onde progressive notée $g_0(t)$ créée en un point $x = 0$ de l'espace. Supposons que cette fonction $g_0(t)$ soit périodique de **période** T et continue par morceaux (avec un nombre fini de points de discontinuités sur une période).

On doit à Joseph Fourier (1768-1830) d'avoir établi que dans ces conditions, la fonction g_0 peut se décomposer en une somme de fonctions circulaires, c'est-à-dire de fonctions sinus et cosinus dont les fréquences sont des multiples de la **fréquence fondamentale** $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$ de la fonction g_0 , où $\omega = 2\pi \cdot f$ est appelée **pulsation propre fondamentale**. La période T s'exprimant en secondes, la fréquence s'exprime en hertz (s^{-1}) et la pulsation propre ω en radians par seconde (rad/s). On a donc :

Théorème de décomposition en série de Fourier : Si $g_0(t)$ est une fonction périodique de période T , continue par morceaux (avec un nombre fini de points de discontinuité sur une période), alors :

$$g_0(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos[(n \cdot \omega) \cdot t] + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin[(n \cdot \omega) \cdot t] \quad (1-4)$$

Les coefficients a_n et b_n se calculent facilement avec l'aide d'une calculatrice scientifique suivant :

$$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T g_0(\tau) \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot \tau) \cdot d\tau$$

$$b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T g_0(\tau) \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot \tau) \cdot d\tau$$

Le relation (1-4) est appelée **décomposition en série de Fourier** de la fonction $g_0(t)$. On peut en donner une expression équivalente qui ne fait intervenir que des fonctions cosinus (ou que des fonctions sinus) en posant :

$$A_n \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \text{ et } \tan \varphi_n \stackrel{\text{def}}{=} \tan^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right)$$

Dans ces conditions :

$$\begin{aligned} g_0(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos[(n\omega)t - \varphi_n] \\ g_0(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin \left[(n\omega)t + \frac{\pi}{2} - \varphi_n \right] \\ g_0(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos[(2\pi \cdot f \cdot n)t - \varphi_n] \end{aligned} \quad (1-5)$$

Ce théorème est essentiel en physique car il permet d'assimiler toute onde progressive périodique à la somme (la superposition) d'ondes correspondant à une perturbation d'une grandeur physique suivant une fonction sinus ou cosinus. La démonstration rigoureuse de ce résultat dépasse un peu les limites que nous nous sommes fixées, mais le lecteur intéressé pourra la trouver détaillée en annexe I-5.

D'un point de vue qualitatif, l'équation (1-5) signifie que toute onde progressive g_0 de période $T = \frac{1}{f}$ se décompose en la somme d'une fonction constante correspondant à sa moyenne sur une période et de fonctions cosinus (ou sinus) de fréquences $f, 2.f, 3.f, \dots$ multiples de f . Ces fonctions cosinus de fréquences multiples de la fréquence fondamentale f sont appelées des **harmoniques** d'ordre 1,2,3, ... Les harmoniques de plus hautes fréquences représentent dans cette décomposition les variations les plus rapides de la fonction g_0 sur une période. Dans la réalité physique, la dérivée de la fonction g_0 prend des valeurs finies, ce qui revient à dire qu'il existe une valeur maximale à la variation de la fonction g_0 en fonction du temps, et que le nombre d'harmoniques à prendre en compte dans la décomposition est donc fini.

La figure 1-5 donne un exemple d'une fonction périodique décomposable en somme de fonctions circulaires qui ne nécessite que de considérer des harmoniques jusqu'à l'ordre 7. La fonction représentée sur la figure 1-5 correspond en effet à une fonction $g_0(t)$ décomposable suivant :

$$g_0(t) = 1 + 1,3 \cdot \cos(t) + 0,4 \cdot \cos\left(3 \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) + 0,3 \cdot \cos(5 \cdot t) + 0,2 \cdot \cos\left(7 \cdot t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Puisque $\cos(t) \stackrel{\text{def}}{=} \sin\left(t + \frac{\pi}{2}\right)$, cette décomposition en fonction cosinus est strictement équivalente à la décomposition en fonctions sinus suivante :

$$g_0(t) = 1 + 1,3 \cdot \sin\left(t + \frac{\pi}{2}\right) + 0,4 \cdot \sin(3 \cdot t + \pi) + 0,3 \cdot \sin\left(5 \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) + 0,2 \cdot \sin(7 \cdot t).$$

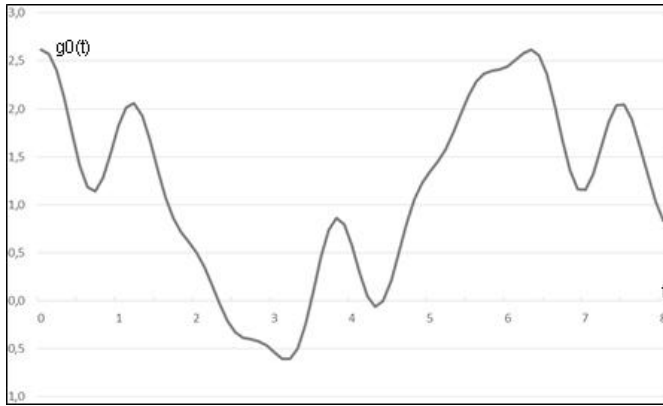


Figure 1-5 : Exemple d'une fonction périodique (de période $2 \cdot \pi$) décomposable en somme de fonctions sinus ou cosinus au moyen de 7 harmoniques.

Cet exemple montre qu'une connaissance totale de la fonction g_0 peut être obtenue de deux façons : soit en connaissant la valeur de la fonction $g_0(t)$ à tout instant sur un intervalle $t \in [0, T]$ correspondant à une période, soit en disposant des paramètres A_n et φ_n nécessaires pour paramétrer chacune des harmoniques n qui composent la fonction $g_0(t)$ et permettent, au moyen de l'équation (1-5), de calculer cette fonction à tout instant.

Les graphes représentant A_n et φ_n en fonction des fréquences $n \cdot f$ (les harmoniques) sont appelés **spectres en amplitude et en phase** (ou transformée de Fourier) de la fonction g_0 . La figure 1-6 donne l'exemple du spectre de la fonction représentée dans la figure 1-5 pour une décomposition en cosinus.

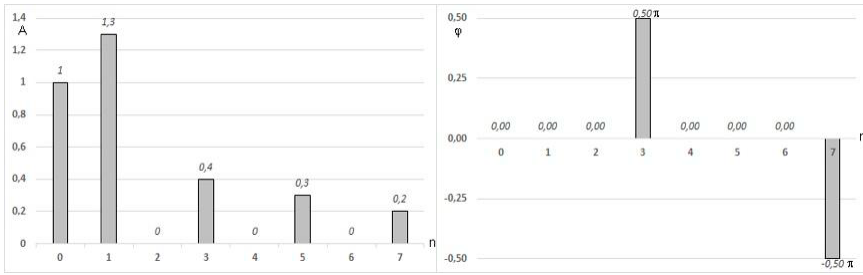


Figure 1-6 : Spectres en amplitude (A , à gauche) et en phase (φ , à droite) de la fonction représentée sur la figure 1-5,

$$g_0(t) = 1 + 1,3 \cdot \cos(t) + 0,4 \cdot \cos\left(3 \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) + 0,3 \cdot \cos(5 \cdot t) + 0,2 \cdot \cos\left(7 \cdot t - \frac{\pi}{2}\right).$$

La valeur n en abscisse représente le numéro de l'harmonique, donc la fréquence $n \cdot f$.

Cette possibilité de décomposer une perturbation source d'une onde progressive $g_0(t)$ en somme de fonctions cosinus s'étend naturellement au modèle d'onde progressive que nous avons établi en tout point distant de x de la source sonore $g_x(t) = g_0\left(t - \frac{x}{c}\right)$ et qui ne se distingue de g_0 que par un terme de retard $\frac{x}{c}$ suivant l'équation (1-1).

Dans ces conditions, et sans perte de généralité, l'étude des ondes progressives peut se concentrer sur le cas d'un type d'onde progressive particulière que nous qualifierons de **pure**, de **sinusoïdale**, de **monochromatique**, ou encore de **radiation** (tous ces termes sont synonymes) et qui consiste en une onde progressive créée par une perturbation $g_0(t)$ dont le spectre ne contient qu'une seule fréquence.

Une onde dont le spectre contient plus d'une fréquence sera qualifiée d'onde **polychromatique**, ou **complexe**, et peut donc être décomposée en une superposition d'ondes monochromatiques, si bien que les résultats que nous obtiendrons dans le cas simplifié de ces dernières pourront aussi s'appliquer aux ondes complexes.

e. Caractéristiques d'une onde progressive monochromatique

Une **onde progressive monochromatique** se propageant dans la direction x avec la célérité c , dans le sens des x positifs, sera donc produite par une perturbation au point $x = 0$ de la forme $g(t, x = 0) = g(0, 0) + A \cdot \sin(\omega \cdot t)$ et conduira à une perturbation à une distance x de la source de la forme :

$$g(t, x) = g(0, x) + A \cdot \sin\left[\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c}\right)\right]$$

où $g(0, x)$ est la valeur de la grandeur physique observée en tout point x avant toute perturbation par l'onde progressive. Pour éviter de surcharger les

notations par ce terme additif, on supposera dans la suite que $g(0, x) = 0$ pour toute position x , et l'on notera :

$$g(t, x) = A. \sin \left[\omega. \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \quad (1-6)$$

Dans cette dernière expression :

A est l'**amplitude** de l'onde (de même unité que la grandeur physique perturbée g),

La **pulsation propre** $\omega \stackrel{\text{def}}{=} 2\pi f \stackrel{\text{def}}{=} \frac{2\pi}{T}$ (en radians par seconde) et la **fréquence** f est de l'onde (en Hertz) sont deux grandeurs représentant la même réalité physique avec deux unités différentes,

T est la **période** (pour la variable temporelle, en seconde).

En un point x figé, l'état vibratoire (maximum ou minimum de l'onde par exemple) est le même à un instant t et à l'instant $t + T$:

$$g(t + T, x) = A. \sin \left[\frac{2\pi}{T}. \left(t + T - \frac{x}{c} \right) \right] = A. \sin \left[\frac{2\pi}{T}. \left(t - \frac{x}{c} \right) + 2\pi \right] = g(t, x)$$

La fonction de deux variables $g(t, x)$ possède aussi une seconde période, par rapport à la variable d'espace x cette fois. A un instant t fixé,

$$g(t, x) = g(t - T, x) = A. \sin \left[\omega. \left(t - T - \frac{x}{c} \right) \right] = A. \sin \left[\omega. \left(t - \frac{cT + x}{c} \right) \right] = g(t, x + c.T)$$

La distance parcourue par l'onde en une période temporelle T est appelée **longueur d'onde** et est notée λ (en mètre). Il s'agit d'une période spatiale au sens où, à un instant t figé, l'état vibratoire (maximum ou minimum de l'onde par exemple) est identique en un point x et un second point éloigné de λ du point x le long de la direction de propagation de l'onde :

$$\lambda \stackrel{\text{def}}{=} c.T = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega} \quad (1-7)$$

A titre d'exemple, considérons des vagues qui atteignent un rivage, et un bouchon de pêcheur stabilisé en un point x de la surface (au moyen d'un fil relié à un plomb). Le bouchon suit les vagues qui l'atteignent dans un mouvement oscillant vertical. La période (temporelle) T est l'intervalle de temps qui séparent deux instants consécutifs où le bouchon se retrouve sur la crête d'une vague.

Pour se représenter la longueur d'onde, il faut en revanche figer le temps au moyen d'une photographie. Sur celle-ci, la longueur d'onde est la distance qui sépare deux lignes de crêtes successives de vagues (Figure 1-7).

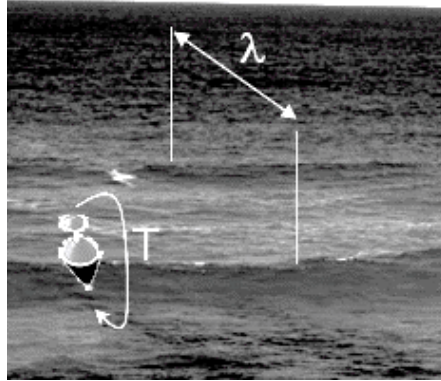


Figure 1-7 : Période et longueur d'onde

Le terme indépendant du temps $\phi = \frac{\omega x}{c}$ de la relation (1-6), $g(t, x) = A \cdot \sin \left[\omega \cdot t + \frac{\omega x}{c} \right]$, complété éventuellement d'autres termes indépendants du temps (comme dans l'expression de la fonction de la figure 1-5) est appelé **phase**.

Par définition une **surface d'onde** est une surface connexe (c'est-à-dire en un seul morceau) contenant l'ensemble des points de même phase (et donc situés à la même distance x de la source de l'onde).

Lorsqu'une onde est émise de façon isotrope dans l'espace à partir d'une source ponctuelle positionnée en un point C de l'espace, les différentes surfaces d'ondes sont constituées de sphères concentriques centrées en C et de rayons x , associées à des phases identiques $\phi = \frac{\omega x}{c}$. Ce type d'onde est qualifié d'**onde sphérique**. A distance de la source C et localement, ces surfaces d'ondes sont proches des plans tangents aux cercles et peuvent autoriser une approximation locale d'une onde sphérique par une **onde plane**.

La figure 1-8 représente un exemple de surfaces d'ondes sphériques S_i (en pointillés, ici associées aux points de même phase d'amplitude maximale à l'instant du schéma) créées par un stylet heurtant périodiquement la surface d'un liquide en un point C . Les sphères sont réduites à des cercles dans l'espace à deux dimensions de la surface du liquide. A distance de la source C et localement, ces surfaces d'ondes sont proches des plans tangents P_i aux