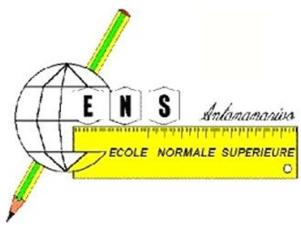




**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE NORMALE SUPERIEURE**



DEPARTEMENT DE FORMATION INITIALE SCIENTIFIQUE

C.E.R PHYSIQUE-CHIMIE

N° d'ordre 307/PC

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU
CERTIFICAT D'APTITUDE PEDAGOGIQUE DE L'ECOLE
NORMALE SUPERIEURE (C.A.P.E.N)**

INTRODUCTION DE LA PHYSIQUE MODERNE EN CLASSE TERMINALE DE LA SERIE SCIENTIFIQUE

Présenté par : RAKOTONDRAZOA Kendrimalala

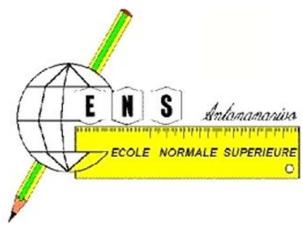
Rapporteur : Monsieur HERIMANDA A.RAMILISON

Date de soutenance : 05 février 2013

Année universitaire : 2011-2012



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE NORMALE SUPERIEURE**



DEPARTEMENT DE FORMATION INITIALE SCIENTIFIQUE

C.E.R PHYSIQUE-CHIMIE

N° d'ordre 307/PC

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU
CERTIFICAT D'APTITUDE PEDAGOGIQUE DE L'ECOLE
NORMALE SUPERIEURE (C.A.P.E.N)**

**INTRODUCTION DE LA PHYSIQUE MODERNE
EN CLASSE TERMINALE DE LA SERIE
SCIENTIFIQUE**

Présenté par : RAKOTONDRAZOA Kendrimalala

Date de soutenance : 05 février 2013

Membres du jury :

- Président du Jury : Monsieur **RATSIFARITANA A. Charles.**
Maitre de conférences
- Juges : Monsieur **RASOANAIVO René Yves.**
Maitre de conférences
Monsieur **RANDRIANANDRAINA Faneva,**
Maitre de conférences
- Rapporteur : Monsieur **HERIMANDA A. RAMILISON,**
Maitre de conférences

Année universitaire : 2011-2012

REMERCIEMENT

En l'honneur de l'accomplissement de ce mémoire, je rends grâce à Dieu tout puissant pour tout ce qu'Il a fait dans ma vie, et pour m'avoir aidé dans mon travail. Je tiens à adresser mes plus vifs remercîments à mes chers parents, qui n'ont pas ménagé leurs efforts durant toutes ces années afin de m'aider dans mes études et pour m'avoir encore soutenu dans la rédaction de ce mémoire. Merci à toutes les personnes qui ont participé.

Particulièrement à

Monsieur RATSIFARITANA A.Charles, Maitre de conférences, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Monsieur RASOANAIKO Réné Yves, Maitre de conférences, membre du jury

Monsieur RANDRIANANDRAINA Faneva, Maitre de conférences, membre du jury

Monsieur HERIMANDA A.RAMILISON, Maitre de conférences, mon encadreur, qui m'a guidé dans mes recherches et qui m'a conseillé pendant tout le temps qu'il m'a fallu pour finir ce mémoire.

Un grand merci à tous et que Dieu vous bénisse !

RESUME

Ce mémoire intitulé « Introduction de la physique moderne en classe terminale de la série scientifique » témoigne de la nécessité d'introduire la physique moderne au programme d'enseignement de la physique au lycée à Madagascar, notamment en classe terminale de la série scientifique. Y figurent une brève histoire de la physique moderne depuis sa naissance, les diverses applications dans le domaine de la technologie, technologie qui nous entourent aux quotidien, le contenu du cours conforme aux objectifs fixés, le compte rendu de l'évaluation de ce cours, et le nouveau programme de physique de la classe terminale de la série scientifique.

TABLE DES MATIERES

Remerciement	i
Résumé	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vi
Liste des annexes.....	vii
INTRODUCTION :	1
PREMIERE PARTIE : L'impact de la physique moderne	3
1. Historique de la physique moderne	4
2. Les succès de la physique moderne	10
2.1 La radioactivité et l'énergie nucléaire	10
2.2 La supraconductivité	11
2.3 Le microscope à effet tunnel	14
2.4 L'imagerie par résonnance magnétique	17
2.5 L'horloge atomique, le GPS et la théorie de la relativité	18
2.6 Révolution de l'électronique et de l'informatique.....	21
2.7 Le laser	22

DEUXIEME PARTIE : Le contenu à enseigner.....	28
1. Le cours	32
2. L'évaluation	70
3. Le nouveau programme de physique atomique et nucléaire	78
CONCLUSION :.....	86
Annexes :.....	87
BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE	90

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Max Planck et Albert Einstein.....	7
Figure 2 : Les partisans au congrès Solvay de Bruxelles en 1927	9
Figure 3 : La radioactivité.....	10
Figure 4 : Le phénomène de lévitation magnétique.....	12
Figure 5 : Le train à lévitation magnétique.....	13
Figure 6 : Principe du microscope à effet tunnel	15
Figure 7 : Atomes d'or vus au microscope à effet tunnel.....	15
Figure 8 : Logo IBM réalisé avec 35 atomes de xénon sur une surface en Nickel.....	16
Figure 9 : Idéogramme japonais réalisé avec des atomes de fer sur une surface de cuivre.....	16
Figure 10 : L'IRM (vue de l'appareil) et une neuroanatomie de l'encéphale.....	17
Figure 11 : Une horloge atomique.....	18
Figure 12 : Principe du système de positionnement GPS.....	19
Figure 13 : L'ordinateur, produit de la mécanique quantique.....	21
Figure 14 : Un pointeur laser	22
Figure 15 : Principe d'un lecteur CD	24
Figure 16 : Réflexion d'un rayon laser à l'intérieur d'une fibre optique.....	25
Figure 17 : Une onde électromagnétique plane	34
Figure 18 : Le spectre électromagnétique.....	39
Figure 19 : L'effet photoélectrique	42

Figure 20 : Diffraction des électrons sur une surface de Nickel.....	49
Figure 21 : Expérience des fentes d'Yong avec des noyaux d'hélium.....	51
Figure 22 : Décomposition de la lumière blanche par un prisme	52
Figure 23 : Spectre de la lumière blanche.....	52
Figure 24 : Spectre d'émission d'un atome de sodium.....	53
Figure 25 : Spectre d'absorption d'un atome de sodium.....	54
Figure 26 : Comparaison entre le spectre d'émission et d'absorption d'un atome de sodium	54
Figure 27 : Diagramme d'énergie d'un atome.....	56
Figure 28 : Emission d'un photon.....	57
Figure 29 : Absorption d'un photon.....	58
Figure 30 : Diagramme d'énergie de l'atome d'hydrogène.....	59
Figure 31 : Un pointeur laser.....	60
Figure 32 : Propriétés d'une lumière laser.....	61
Figure 33 : Principe de l'émission stimulée.....	62
Figure 34 : Diagramme d'énergie de l'atome d'hydrogène.....	69
Figure 35 : Principe de l'expérience de Michelson et Morley.....	88
Figure 36 : Horloge de lumière dans deux référentiels (R) et (R').....	90

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Longueurs d'onde et couleurs.....	38
Tableau 2 : Les huit premiers niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène.....	58
Tableau 3 : Grille d'évaluation N ⁰ 1	72
Tableau 4 : Grille d'évaluation N ⁰ 2	74

Tableau 5 : Grille d'évaluation N^o3..... 76

Tableau 6 : Le nouveau programme de physique atomique et nucléaire..... 79

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : L'expérience de Michelson et Morley..... 88

Annexe 2 : Dilatation des durées..... 89

INTRODUCTION

Le domaine de la physique moderne embrasse des sujets qui ont évolué depuis la fin du XIX^e siècle et au début du siècle dernier. Des développements qui confondent souvent l'esprit car la physique moderne implique une révision radicale des concepts habituels sur lesquelles reposait toute la physique avant son avènement. Elle a conduit à de nombreuses applications dans le domaine de la technologie. Electronique, informatique, communication, énergie, et dans bien d'autres domaines. Les connaissances apportées par la physique moderne nous ont amené des progrès significatifs, et ces progrès ont contribué grandement à faire de la société moderne celle qu'elle est aujourd'hui, une société d'information et de technologie.

Le rôle de l'école est de former, d'éduquer nos enfants pour être les citoyens modèles d'aujourd'hui et de demain. Par le biais des connaissances nouvelles qu'ils ont acquises, les élèves pourront mieux comprendre le monde qui les entourent. Ce qu'on enseigne à l'école doit donc faire de paire avec ce qui est vraiment d'actualité. Si nous examinons le programme d'enseignement de la physique actuellement en vigueur à Madagascar, et plus particulièrement aux lycées, un sérieux retard est constaté comparé à ceux des autres pays développés de part le monde. Ce programme qui n'a pas été revu depuis plus d'une dizaine d'années n'est plus adapté à la situation mondiale actuelle, vu le progrès de la science et le degré de connaissance dont l'homme dispose à présent. Le fait est que presque toute la physique qu'on enseigne encore aujourd'hui dans nos classes, la physique dite « classique », aurait pratiquement pu être enseignée au XIX^e siècle.

Pas que la physique classique est devenue « inutile », loin de là, mais il a été maintenant prouvé que cette physique est limitée, et qu'au delà de ces limites il faut impérativement faire appel à la physique moderne pour décrire correctement les phénomènes physiques.

L'éducation est à la base du développement économique d'une nation. Pour cette raison, nous avons voulu par ce présent mémoire apporté les argumentations pour la nécessité d'une réforme du programme d'enseignement de la physique à Madagascar, notamment en classe terminale de la série scientifique, par l'introduction de la physique moderne, avec un contenu de cours jugé et évalué par un groupe de personnes qualifiées.

Les questions qui se posent alors, et auxquelles nous allons répondre sont les suivantes : Pourquoi vouloir introduire la physique moderne au programme? Et si on se décide à l'introduire, comment s'y prendre ? Et quoi enseigner exactement ?

Première partie :

L'impact de la physique moderne

1. Historique de la physique moderne :

La fin du XIX^e siècle fut marquée par le succès de la physique classique, dont les branches principales sont **la mécanique de Newton, la mécanique statistique, la thermodynamique et l'électromagnétisme**. On était alors en mesure de donner une explication satisfaisante à presque toutes les phénomènes physiques observées jusque là. Sir **William Thomson**, célèbre physicien anglais, anobli sous le titre de **Lord kelvin**, reflète bien l'opinion de nombreux physiciens de la fin du XIX^e siècle lorsqu'il annonça en Avril 1900 que : « **La physique est définitivement constituée dans ses concepts fondamentaux, tout ce qu'elle peut désormais apporter, c'est la détermination précise de quelques décimales supplémentaires. Il y a bien deux petits problèmes...mais ils seront rapidement résolus et n'altéreront en rien notre confiance.** »

Ces « deux petits problèmes » à résoudre étaient les résultats de deux expériences qui laissaient perplexes les physiciens de l'époque car la physique classique n'arrivait pas à les expliquer. Mais elles seront les germes de la physique moderne. L'une de ses expériences dont l'interprétation qu'en fit **Albert Einstein** le conduira en 1905 à formuler « **la théorie de la relativité restreinte** » qui explique de manière simple des idées ou résultats qui existaient déjà dans les travaux antérieurs d'autres physiciens : **Fitzgerald** (contraction des longueurs), **Lorentz** (contraction des longueurs, dilatation temporelle, transformations de Lorentz, etc.), **Poincaré** (variation de l'inertie avec la vitesse, structure de groupe des transformations de Lorentz, etc.), et **l'expérience de Michelson et Morley** (Voir annexe1) qui démontre l'invariance de la vitesse de la lumière.

Mais alors que certains accusent Einstein de n'avoir été qu'un vulgaire plagiaire, il est indéniable qu'il eut le mérite d'être le premier à proposer une théorie claire et précise

permettant de rendre compte de ces résultats disparates de manière unifiée, tout en la faisant avant tout reposer sur des observations expérimentales et en prédisant de nouveaux effets alors inconnus.

L'autre expérience : **le rayonnement du corps noir** trouve son interprétation le 14 décembre 1900, jour où **Max Planck** propose devant la société de physique de Berlin une vision radicalement nouvelle du rayonnement des corps portés à haute température: **La mécanique quantique** est née. Toute la physique moderne repose essentiellement sur ces deux théories de physique : **la théorie de la relativité** et **la mécanique quantique**.

La théorie de la relativité dans son développement complet comporte deux volets bien distincts : la théorie de la relativité restreinte et la théorie de **la relativité générale** qui sera exposée par Albert Einstein en 1916. La théorie de la relativité restreinte, s'applique à des systèmes de référence (référentiels) se déplaçant les uns par rapport aux autres par des mouvements de translation uniforme (vecteur vitesse constant), tandis que la relativité générale, concerne des systèmes de référence en mouvement accéléré les uns par rapport aux autres. La théorie de la relativité restreinte permet entre autre d'établir que la durée d'un événement donné (un phénomène physique observable comme un flash de lumière, le battement d'une horloge, ...) dépend du choix du référentiel dans lequel la mesure est faite. La durée de ce phénomène est plus grande s'il est mesuré par une horloge fixe dans un référentiel donné que par l'horloge d'un autre référentiel en mouvement relatif au premier. On dit qu'il y a **dilatation des durées** (Voir annexe 2). Mais la dilatation des durées prévus par la théorie de la relativité restreinte n'est significatif que pour des vitesses proches de celle de la lumière ($c=3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$).

Pour illustrer ceci, prenons un exemple, une expérience de pensée de **Paul Langevin** et l'une des plus célèbre de l'histoire de la théorie de la relativité:

Deux frères jumeaux sont nés sur Terre. L'un fait un voyage aller-retour dans l'espace en fusée à une vitesse proche de celle de la lumière vers une planète lointaine hors du système solaire. D'après le phénomène de dilatation des durées prévu par la théorie de la relativité restreinte, pour celui qui est resté sur Terre la durée du voyage est plus grande que pour celui qui est envoyé dans l'espace. Ce dernier rentrera donc plus jeune que son frère jumeau resté sur Terre.

Une expérience fort similaire au cas des jumeaux voyageurs a été faite en 1972. Deux horloges atomiques (page 18) parfaitement synchronisées ont été séparées ; l'une est restée sur terre et l'autre embarquée dans un avion. Au retour, l'horloge voyageuse retardait bien de la quantité désirée sur celle restée sur terre. Le phénomène de dilatation des durées est donc bien un fait vérifié par l'expérience.

Une autre conséquence des plus importantes de la théorie de la relativité restreinte est l'équivalence entre masse et énergie, ou en d'autre terme que la masse peut être convertie intégralement en énergie et vis versa, ceci peut se traduire par la célèbre formule d'Einstein : **$E=mc^2$** , où m désigne la masse, c la célérité de la lumière et E l'énergie équivalente.

Encore plus étrange que la théorie de la relativité : **la mécanique quantique**. Albert Einstein contribua aussi dans la conception originale de la théorie quantique. Il poussa plus loin la « **théorie des quanta** » de Max Planck et émit une hypothèse selon laquelle le « rayonnement électromagnétique » ou en d'autre termes la lumière, avait une structure granulaire, qu'elle est formé d'accumulation de petites et discrètes quantité d'énergie, qu'on appela plus tard « **photons** ». Avec cette hypothèse révolutionnaire, on pouvait enfin donner une interprétation satisfaisante à tous les résultats expérimentaux observés lors de l'étude de **l'effet photoélectrique** qui se traduit par l'émission d'électrons par un

métal sous l'action de radiations lumineuses et qui valut à Einstein le prix Nobel de physique en l'an 1921.

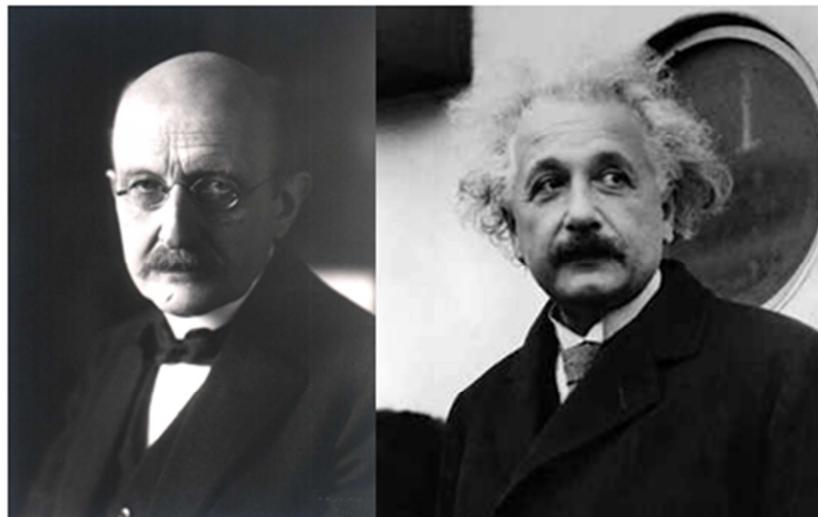


Figure 1. Max Planck et Albert Einstein

C'est à partir de là que commence une véritable aventure intellectuelle avec comme acteurs principaux le physicien danois **Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Fermi Dirac, Louis de Broglie...** et les formalismes généraux de la mécanique quantique seront finalement établies vers l'an 1930, soit presque 30ans plus tard.

C'est un fait qu'il n'est pas aisé de comprendre la mécanique quantique, citons le physicien américain **Richard Feynman** (1918-1988), lauréat du prix Nobel en 1965 pour ses travaux sur le photon, un grand nom de la mécanique quantique : « **Personne ne comprend vraiment la physique quantique** » :

- Premièrement parce que la mécanique quantique utilise un langage mathématique très complexe, et encore les objets mathématiques qu'on manipule ne sont pas directement connectés à une réalité observable.

-
- Deuxièmement parce que la mécanique quantique est basée sur des concepts très différents de ceux de la physique classique, des concepts qui le plus souvent défient la logique commune.

Le formalisme de la mécanique quantique, élaboré par **Niels Bohr** et l' « école de Copenhague », permet de calculer **non pas le résultat d'une mesure mais seulement la « probabilité » de trouver un résultat pour cette mesure**. En effet, quand on réalise une expérience quantique, rien ne permet jamais de prédire le résultat obtenu, tout au plus on peut produire la probabilité d'occurrence des différents résultats. Ainsi la mécanique quantique renonce au déterminisme qui est le fondement de la physique classique avant elle. Cet aspect intrinsèquement probabiliste de la mécanique quantique laissait sceptiques Einstein et d'autres physiciens célèbres qui continuaient à penser que la mécanique quantique était en quelque sorte une théorie incomplète.

En 1927, invité au cinquième congrès Solvay de Bruxelles, Einstein interpelle Niels Bohr pour marquer son opposition à l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique et au **Principe d'incertitude de W. Heisenberg** qui nous dit qu'il est impossible de connaître avec une infinie précision la position et la « quantité de mouvement » d'une particule.

« Gott würfelt nicht » (« Dieu ne joue pas aux dés ») disait alors Einstein, ce à quoi Niels Bohr répondit : **« Qui êtes-vous Albert Einstein pour dire à Dieu ce qu'Il doit faire ? »!** Le débat entre ces deux grands physiciens marqua l'histoire de la physique moderne et ne prendra fin qu'à la mort d'Albert Einstein en 1955.

Mais les physiciens plutôt retissant au début se sont finalement ralliés aux « idées nouvelles » de Bohr, d'Heisenberg, De Broglie, … c'est néanmoins le verdict de l'expérience et qui fit le succès de cette mécanique.

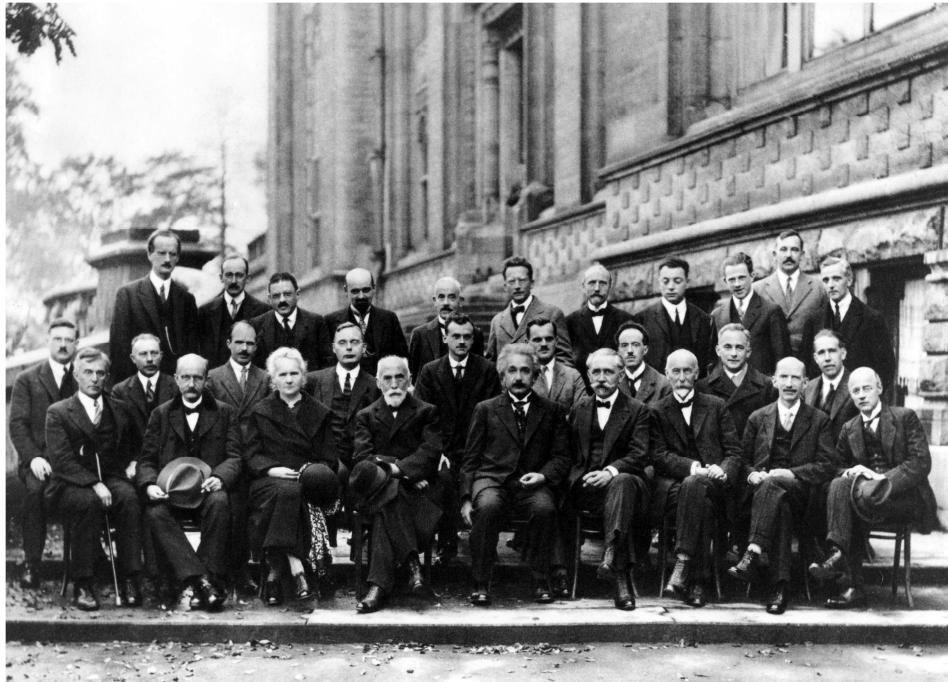


Figure 2.Les participants au congrès Solvay de Bruxelles en 1927

La mécanique quantique devient depuis un outil indispensable pour explorer le monde de l'infiniment petit, celui des atomes, des molécules, des électrons et des autres particules élémentaires. Alors qu'une description classique serait toute à fait inadéquate. Avec la théorie de la relativité d'Einstein, la mécanique quantique constitue les fondations même sur lesquelles repose toute la physique moderne.

Et malgré leurs étrangetés apparentes, la théorie de la relativité et la mécanique quantique restent l'une des théories de physiques les mieux vérifiées expérimentalement : La physique du XX^e siècle est à la fois quantique et relativiste.

Le champ d'application de la physique moderne est très vaste, que ce soit dans le domaine de l'électronique, de la communication, de l'énergie, de l'informatique, de la recherche scientifiques, ou encore de la médecine

2. Les succès de la physique moderne :

Le succès de la physique moderne s'est fait par le nombre de phénomènes physiques auxquels il faut impérativement faire appel à elle pour pouvoir être interprétés. Et surtout, il en découle de nombreuses applications pratiques, et ceux dans différents domaines.

2.1 La radioactivité et l'énergie nucléaire :

Des noyaux atomiques « instables » peuvent se casser spontanément, ils se désintègrent en émettant des particules et parfois même des « rayonnements électromagnétiques »: ce phénomène constitue la « **radioactivité** ». C'est le seul phénomène « quantique », qui à notre échelle, met en évidence l'un des aspects remarquables de la mécanique quantique : son aspect « probabiliste ». En effet la radioactivité est un phénomène aléatoire, on ne peut prévoir avec certitude quand un noyau radioactif va se désintégrer.

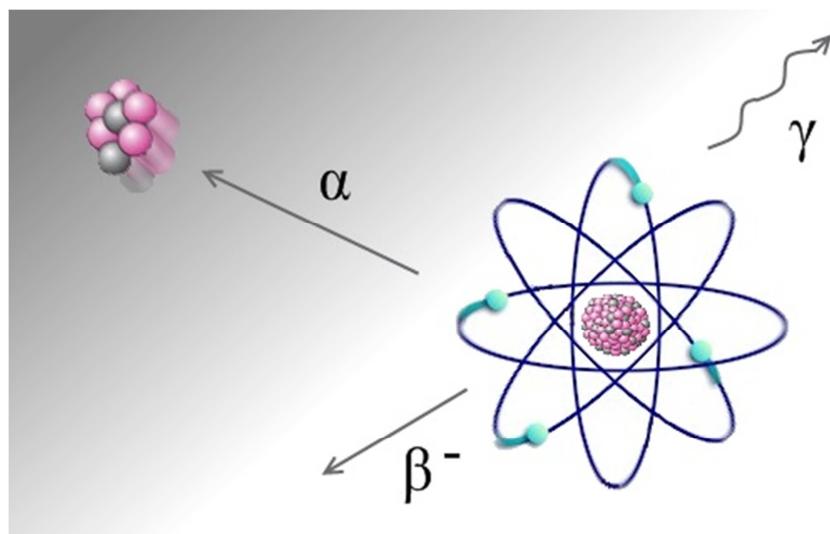


Figure 3. La radioactivité

D'autre part, les réactions nucléaires s'accompagnent d'une émission d'énergie considérable. En effet, lors d'une réaction nucléaire, et contrairement aux réactions chimiques qu'on a l'habitude de réaliser dans nos laboratoires de chimie, il n'y a pas conservation de la masse. La somme des masses des particules régissant entre eux est toujours différente de la somme des masses des particules nouvellement formées, et d'après le principe d'équivalence masse-énergie tiré de la théorie de la relativité d'Einstein, ce défaut de masse est intégralement transformée en énergie, selon l'équation $E=m.c^2$. C'est le principe de fonctionnement des étoiles tel que notre soleil : chaque seconde, le soleil transforme 4 millions de tonnes de matière en énergie qui est émise sous forme de lumière. On estime que le soleil épuisera ainsi ses réserves dans 5 milliards d'années. Dans une bombe atomique ou dans les centrales nucléaires on provoque ces réactions nucléaires afin de produire de l'électricité. La civilisation moderne tend de plus en plus à délaisser l'énergie fauchille pour utiliser cette forme d'énergie. L'énergie nucléaire fournit environ 16 pour cent de l'électricité produite dans le monde, près de 20 pour cent aux États-Unis, de 32 pour cent en Europe (hors ex-U.R.S.S.) et de 80 pour cent en France.

2.2 La supraconductivité:

Il y a plus de 100ans, le 08 avril 1911, la « **supraconductivité** » à été mise en évidence pour la première fois par le physicien **Heike Kamerlingh Onnes**. La supraconductivité est un phénomène physique lié à la mécanique quantique.

Refroidi à une température extrêmement basse (de l'ordre de -270°C), un matériau n'oppose aucune résistance au passage d'un courant électrique, le matériau est devenu « supraconducteur »

Et ce n'est que le premier phénomène lié à la supraconductivité. On découvrit ensuite en 1933 le second effet surprenant lié à la supraconductivité, un supraconducteur est imperméable à un « champ magnétique » qui le traverse, c'est l'« effet Meissner ».

Ceci peut se traduire par les phénomènes spectaculaires de « lévitation magnétique »: un aimant flotte littéralement au dessus d'un matériau devenu supraconducteur.

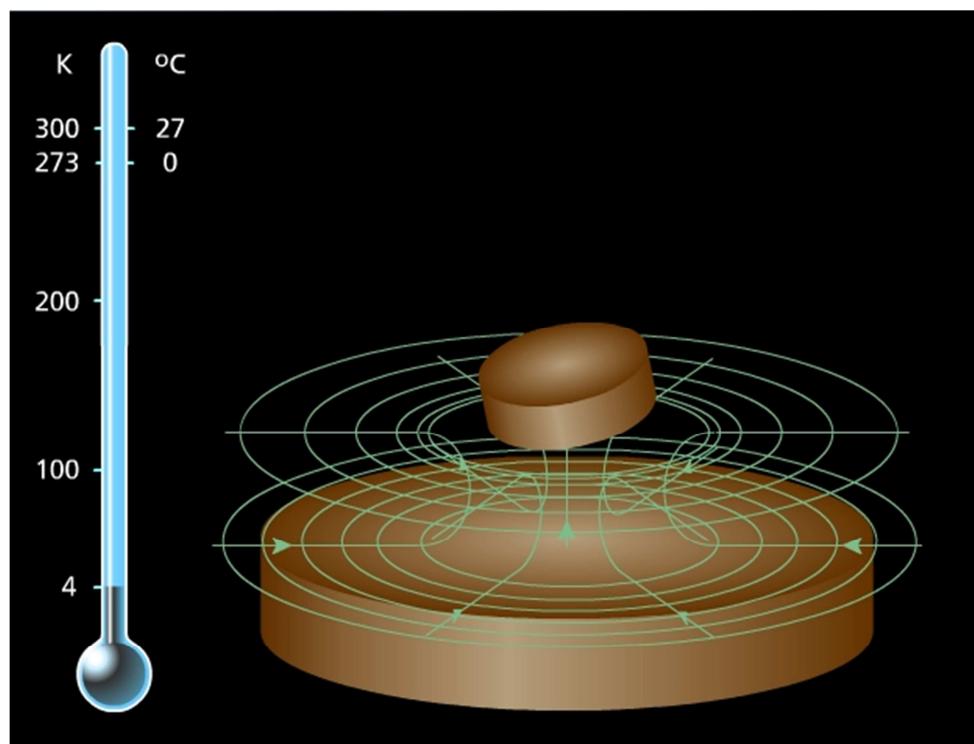


Figure 4. Le phénomène de lévitation magnétique

La supraconductivité fait l'objet d'un vaste champ de recherche qui s'étale sur tout le XXe siècle, et qui continue encore de nos jours. On lui doit de nombreuses inventions à la pointe de la technologie, avec l'attribution de pas moins de quatre prix Nobel.

A titre d'exemple, les scientifiques ont eu l'idée d'utiliser les propriétés remarquables des supraconducteurs pour construire un train à lévitation magnétique.

Contrairement aux trains traditionnels, ce train flotte sur les rails (10cm environ au dessus de la voie) ce qui supprime les frictions, lui permettant d'être quasi-silencieux, d'atteindre une plus grande vitesse. Le prototype allemand de la figure ci-dessous peut atteindre une vitesse de 435 km/h.

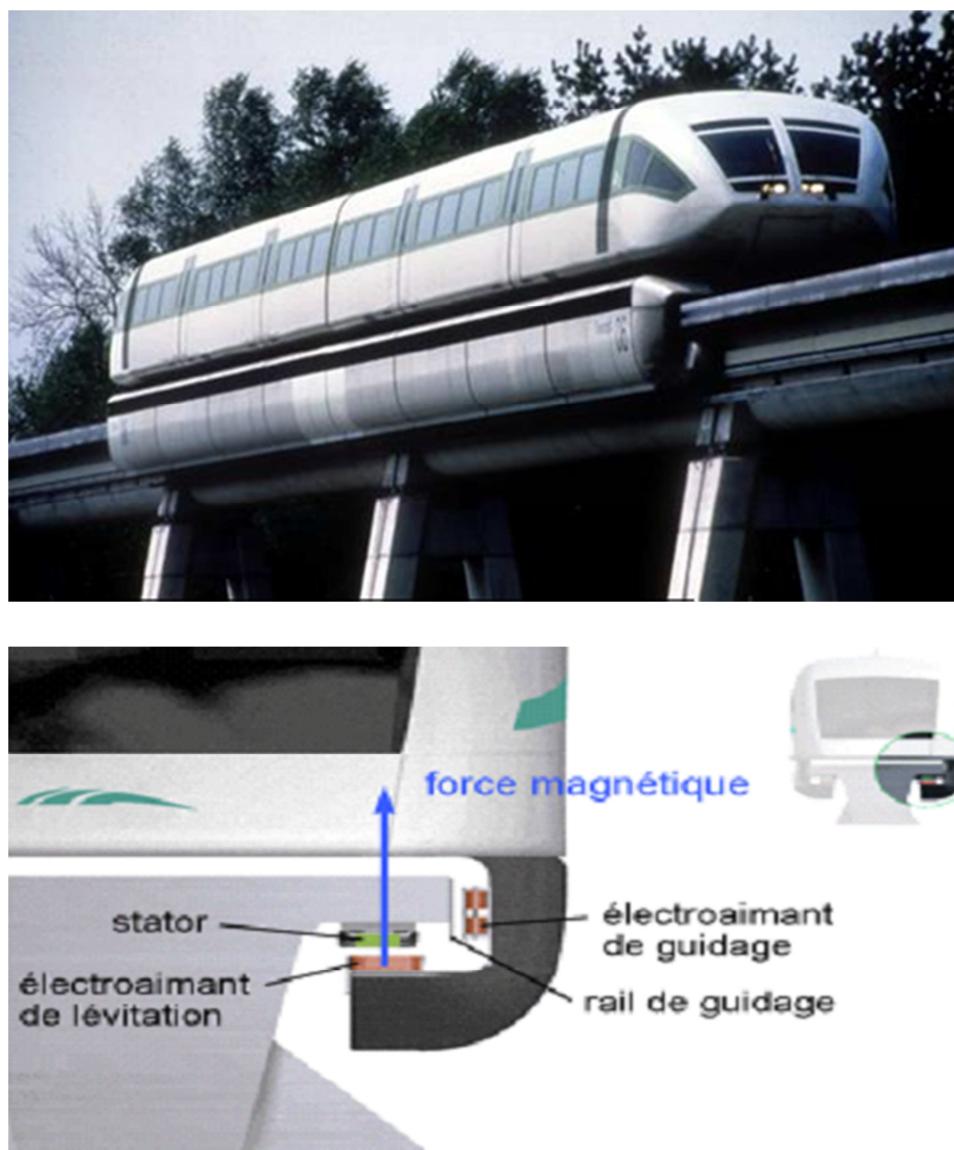


Figure 5. Le train à lévitation magnétique

Les supraconducteurs sont aussi utilisés dans les accélérateurs de particules pour minimiser la consommation électrique.

2.3 Le microscope à effet tunnel:

Grace à un effet quantique spécial « **l'effet tunnel** » : un microscope à très grand pouvoir de résolution voit le jour en 1981 : « le microscope à effet tunnel » ou STM (Acronyme anglais : STM= Scanning Tunneling Microscopy).

On doit cette invention à des chercheurs d'IBM (International Business Machines Corporation) **Gerd Binnig** et **Heinrich Rohrer**. Et en raison de l'intérêt scientifique et technologique de leur invention, ils reçurent en 1986 le prix Nobel de physique.

L'effet tunnel se traduit par un courant d'électrons qui s'établit entre deux conducteurs métalliques reliés à un générateur (électrodes) séparées d'une distance de l'ordre de quelques nanomètres ($1 \text{ nm} = 10^{-9}\text{m}$). L'intensité de ce « courant tunnel » dépend directement la distance qui sépare les deux électrodes.

Pour simplifier, un microscope à effet tunnel est constitué de deux électrodes, dont l'un à la forme d'une pointe et l'autre n'est autre que la surface de l'échantillon à étudier. La distance pointe-échantillon est de l'ordre de quelques nanomètres. Une tension électrique (différence de potentiel) est alors appliquée entre la pointe et l'échantillon, et par effet tunnel un courant d'électrons va apparaître entre les deux électrodes.

Le principe de l'expérience consiste à faire déplacer la pointe au dessus de la surface de l'échantillon, tout en évitant le contact de la pointe avec la surface de l'échantillon. Au cours du déplacement, un ordinateur ajuste en temps réel la hauteur de la pointe pour maintenir constante l'intensité du courant tunnel, et enregistre les déplacements verticaux de la pointe qui permet alors de reproduire fidèlement la topographie de la surface. Le relief observé peut avoir la résolution atomique.

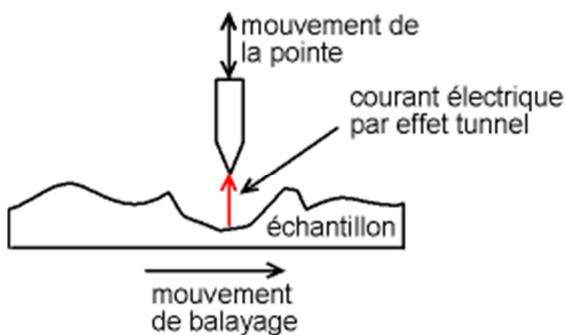


Figure 6. Principe du microscope à effet tunnel

Le microscope à effet tunnel permet de sonder la surface d'un matériau atome par atome, un progrès significatif dans l'histoire de la science.

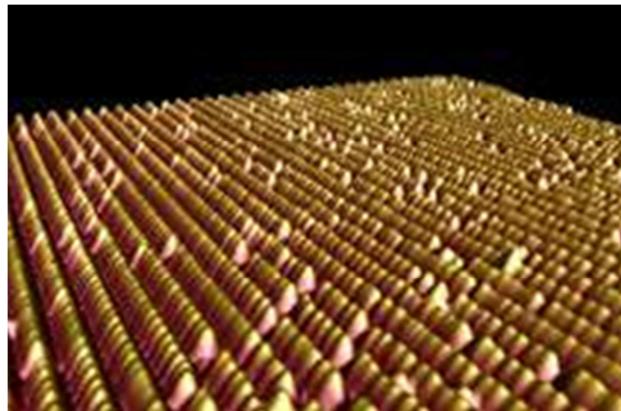


Figure 7. Atomes d'or vus au microscope à effet tunnel

Le microscope à effet tunnel permet non seulement d'observer la surface d'un matériau, mais aussi de déplacer des atomes « un par un » comme une sorte de pince à atome. C'est ainsi qu'en 1990, le microscope à effet tunnel a permis à des chercheurs d'IBM d'écrire les trois lettres I, B et M en disposant 35 atomes de xénon sur une surface de nickel. Ce logo mesure 17 nanomètres ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$) de long.

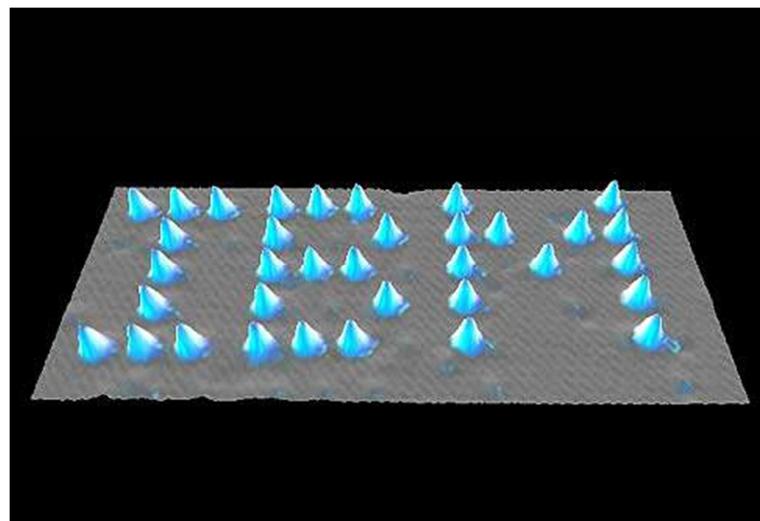


Figure 8.Logo IBM réalisé avec 35 atomes de xénon sur une surface de Nickel

Ou encore, cet idéogramme japonais (kanji) signifiant « atome ». (Figure.9) réalisés par des chercheurs d'IBM en disposant des 97 atomes de fer sur une surface de cuivre à l'aide d'un microscope à effet tunnel.

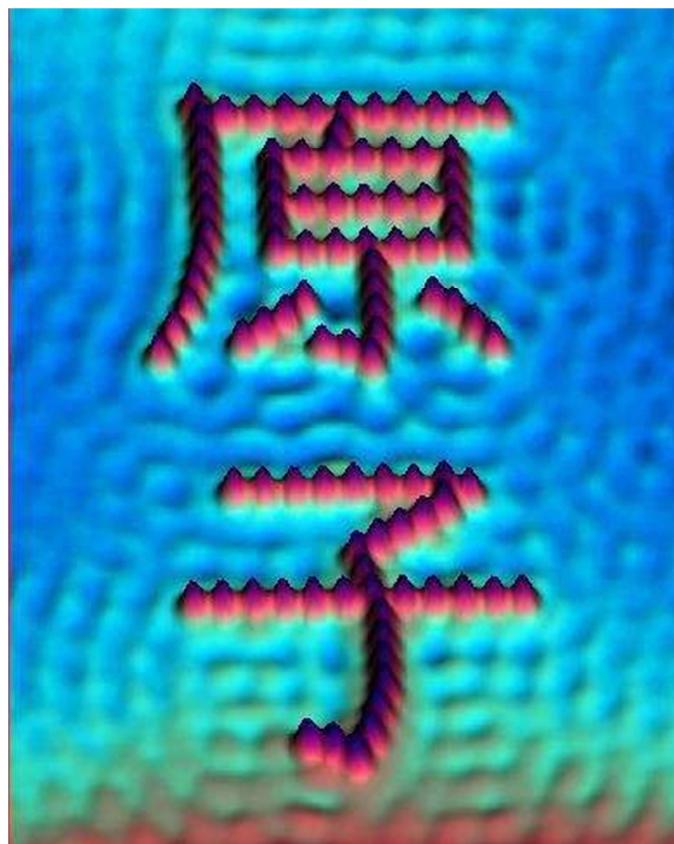


Figure 9.Idéogramme japonais (kanji) réalisé avec des atomes de fer sur une surface de cuivre

2.4 L'imagerie par résonnance magnétique:

La mécanique quantique trouve aussi son application en médecine avec l'IRM ou « Imagerie par Résonnance Magnétique ». C'est une combinaison de technologies à base quantique. Elle permet d'étudier avec une grande précision de nombreux organes tels que le cerveau, la colonne vertébrale, les articulations et les tissus mous

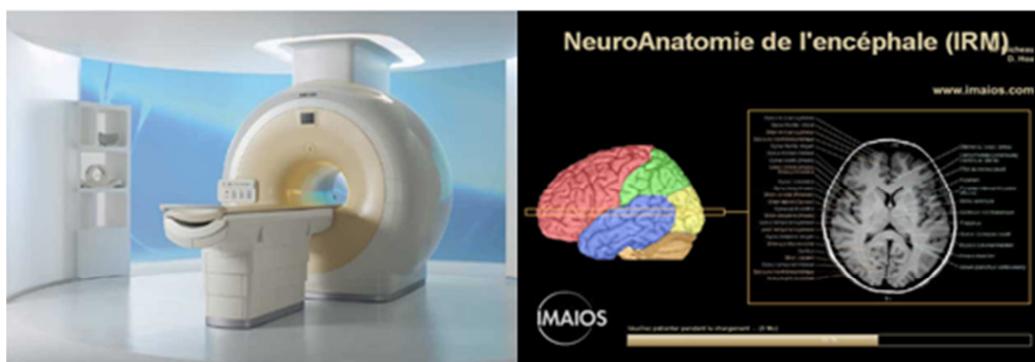


Figure 10.L'IRM (vue de l'appareil) et une neuroanatomie de l'encéphale

L'IRM est d'une grande utilité lorsqu'une analyse très fine est nécessaire et que certaines lésions ne sont pas visibles sur les radiographies standards, l'échographie ou le scanner. Elle permet de faire des images en coupes dans différents plans et de reconstruire en trois dimensions la structure analysée. Par exemple, l'IRM peut rechercher au niveau du cerveau des lésions infectieuses ou inflammatoires, des anomalies des vaisseaux, ainsi que des tumeurs de même que des anomalies au niveau de la colonne vertébrale et des articulations

2.5 L'horloge atomique, le GPS et la théorie de la relativité:

Sans la mécanique quantique, il n'y aurait pas d'horloges atomiques. Ces horloges permettent de mesurer le temps avec une précision impressionnante. Avec l'arrivée des horloges atomiques, et notamment la mise au point, en 1955, d'une horloge atomique de haute précision au césium, il fut alors possible d'établir des mesures bien plus précises de l'unité scientifique de temps : **la seconde**.

Cette horloge atomique utilise « la fréquence d'une raie spectrale » de l'atome de césium 133 et en 1967, la seconde du Système international d'unités fut officiellement définie comme « **la durée de 9 192 631 770 périodes du rayonnement correspondant à la transition entre deux niveaux d'énergie de l'atome de césium 133 dans son état fondamental.** »



Figure 11.Une horloge atomique

L'horloge atomique de la figure ci dessus, du National Institute of Standards and Technology (États-Unis) avance ou retarde d'une seconde tous les 200 000 ans.

Les systèmes de navigation par satellites tels que le **GPS (Global Positioning System)** américain, ou le système européen **Galileo** qui fonctionne selon les mêmes principes que le GPS font également appel à des horloges atomiques. C'est aussi une manifestation dans la vie courante de la dilatation du temps prévue par la théorie de la relativité d'Einstein.

Le GPS américain est le système de positionnement par satellite qui permet de se positionner partout sur la planète avec une très grande précision. Le récepteur GPS (embarqué dans une voiture par exemple) fonctionne en captant simultanément des signaux provenant des satellites en orbite autour de la Terre. Il procède à des calculs permettant de déterminer les trois coordonnées (la latitude, la longitude et l'altitude) qui déterminent sa position. Comment le récepteur GPS effectue-t'il ces calculs ? A partir du temps que prennent les différents signaux émis par les satellites pour l'atteindre. Connaissant la vitesse du signal, égale à celle de la lumière ($c \approx 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$), il peut alors calculer le temps mis en jeu et évaluer les distances qui le séparent des différents satellites et ainsi déterminer sa position.

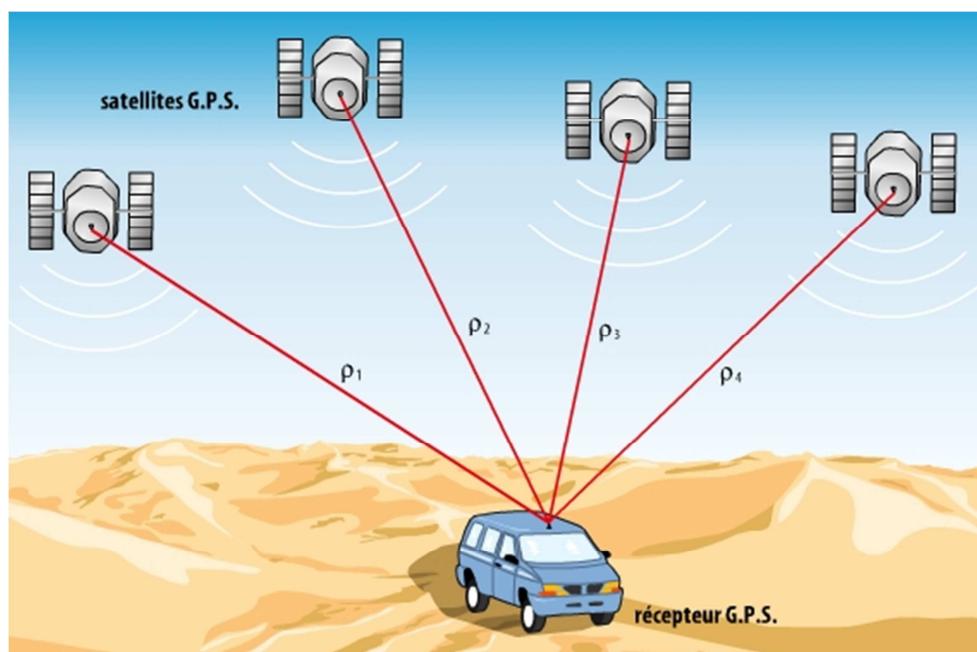


Figure 12. Principe du système de positionnement GPS

Comme le signal se propage à la vitesse de la lumière, et comme cette dernière est extraordinairement élevée, il faut connaître le temps avec une précision phénoménale, de l'ordre du millionième de seconde. En effet, en un millionième de seconde, la lumière parcourt 1/3 de kilomètre, donc une erreur de quelques millionièmes de seconde dans la mesure du temps et le GPS se trompe d'un ou deux kilomètres dans son calcul de distance et donc dans son positionnement, ce qui ne serait pas très pratique. D'où l'utilité des horloges atomiques.

Il faut aussi tenir compte aussi des effets de la théorie de la relativité, aussi bien la théorie de la relativité restreinte que générale sur le temps. Les satellites voyagent autour de la Terre avec une vitesse voisinant les 14 000 km/h (soit 4km/s) c'est une grande vitesse pour nous mais pas si grande comparée à celle de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m/s), l'effet de ralentissement du temps des satellites est donc moindre mais comme le GPS est très sensible, et il faut quand même en tenir compte. Quand à la théorie de la relativité générale, elle nous dit entre autre qu'il n'y a pas que la vitesse qui peut influencer sur la durée des évènements mais aussi la « gravitation ». Plus la force de gravitation est intense et plus le temps est « ralenti », et comme l'intensité de la force attraction gravitationnelle terrestre diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du sol, le temps des satellites qui gravitent à 24 000 km d'altitude prend de l'avance sur celui de la Terre. Cet effet plus important de la gravitation sur l'écoulement du temps est donc l'inverse de l'effet que produit la vitesse. Les satellites prennent 12 heures pour faire le tour de la Terre, leurs horloges sont resynchronisées à chaque passage aux dessus des stations terrestres américains. Et si on ne tenait pas compte de ce décalage temporel dû à la relativité, les GPS deviendraient complètement inutilisables.

2.6 Révolution de l'information et de la communication :

L'invention du « transistor » en décembre 1947 dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone, John Bardeen et Walter Brattain est sûrement l'une des impacts majeur de la mécanique quantique sur notre civilisation. Ils l'appelèrent **transfer resistor** (résistance à transfert), ce qui sera abrégé en « transistor ». Cette invention fut rendue possible grâce des progrès significatifs dans la compréhension du fonctionnement des matériaux « semi-conducteurs », compréhension qui s'est faite grâce à la mécanique quantique. Le transistor est une sorte de valve électronique. Il peut remplir deux fonctions : d'abord amplifier un signal, ensuite on l'utilise comme interrupteur à deux positions, ouvert ou fermé. Le transistor est la brique élémentaire de tout ordinateur, machine à calculer, montre électronique….

L'invention du « transistor » a ouvert la voie à la microélectronique, par la réalisation de circuits électroniques de plus en plus petits. Les circuits intégrés et les microprocesseurs contiennent des millions de transistors. On est même arrivé à réaliser des microcircuits de taille de l'ordre de $0,1\mu\text{m}$ (soit 10 millionième de mètre). L'ordinateur moderne est un résultat de l'industrie du « transistor intégré »



Figure 13.L'ordinateur moderne, produit de la mécanique quantique

Le New York Times explique que des physiciens australiens et américains, ont récemment construit un transistor à partir d'un seul atome de phosphore incorporé dans un cristal de silicium. Une prouesse de précision et de technologie.

Actuellement des chercheurs se penchent sur la conception d'une toute nouvelle génération d'ordinateurs: l'ordinateur quantique. Un ordinateur fondé sur la mécanique quantique. Cet ordinateur révolutionnaire sera capable de résoudre des problèmes et de faire des calculs qui s'avèrent être impossibles avec les ordinateurs classiques.

2.7 Le laser:

Le LASER est aussi un produit de la mécanique quantique, c'est l'acronyme anglais de : « **L**ight **A**mplification **b**y **S**timulated **E**mission **o**f **R**adiation » qui signifie amplification de la lumière par émission stimulée de radiation.



Figure 14.Un pointeur laser

Le principe du laser remonte aux travaux d'*Albert Einstein* sur l' « **émission stimulée** » en 1917, et ce n'est qu'en 1960, soit presque quarante ans plus tard en Californie que **Théodore Maiman** réalise le premier laser, et depuis, plus de dix prix Nobel furent attribués dans le domaine du laser et ses applications

Il existe différents types de lasers, comme les lasers à solide, les lasers à gaz, lasers à liquide, laser à électron libre, le laser à semi-conducteurs ou « diode laser » que l'on peut par exemple trouver dans nos imprimantes et nos lecteurs/graveurs CD et DVD.

Selon la puissance du rayon laser, on peut distinguer des applications aussi nombreuses que diverses des lasers:

Un Compact Disc (CD) est un disque de 12 cm de diamètre et de 1 mm d'épaisseur, constitué de matière plastique rigide et recouvert d'une couche métallique sur une de ses faces. Ce type de disque est capable de stocker jusqu'à 78 min d'enregistrement sonore sous forme numérique. Lors de la gravure, un puissant laser grave l'information en séquence binaire (succession de 0 et de 1) sur le métal le long de pistes concentriques sous forme d'alvéoles de longueur variable, profondes de 0,83 µm et espacées de 1,6 µm.

La tête de lecture d'un lecteur CD ou DVD est en fait une diode laser. Durant la lecture du CD, un laser, cette fois ci de faible puissance parcourt ces pistes, se réfléchissant de diverses manières au passage des niches. Ces variations sont alors détectées par une « cellule photoélectrique », la séquence binaire étant ainsi lue, puis transformée en sons à l'aide d'un convertisseur numérique-analogique

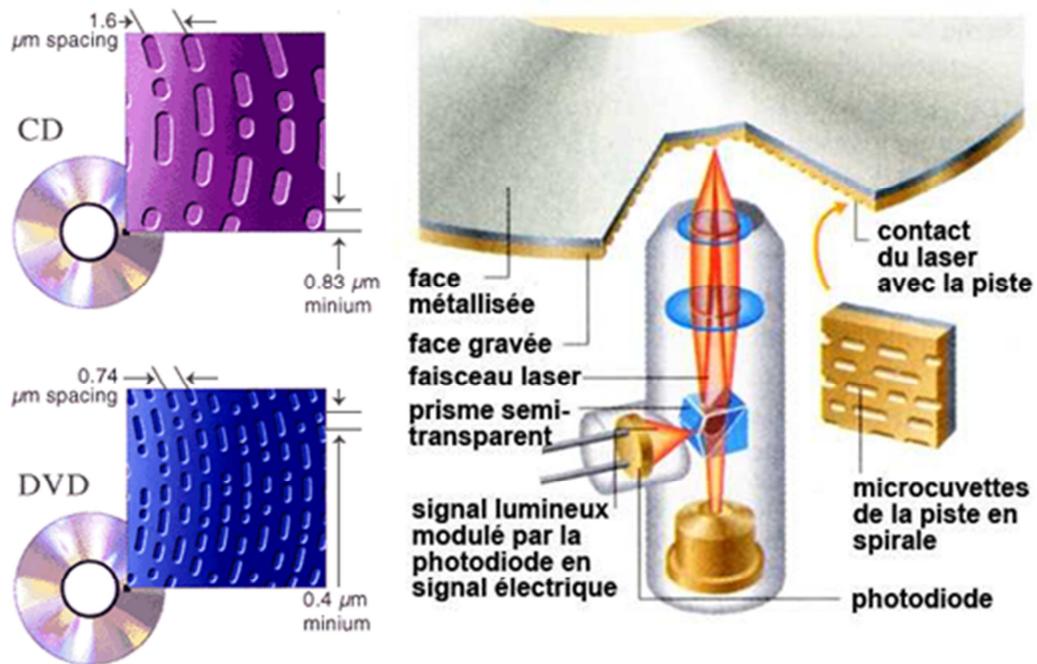


Figure 15. Principe d'un lecteur CD

Dans l'industrie à partir des années 1980, le laser sert à la découpe des plaques, des tubes, pièces métalliques, de bois, et des matières en plastiques. Le laser sert aussi pour faire des soudures.

L'utilisation des lasers permet aussi d'augmenter la précision et la diversité des mesures. Le laser permet de matérialiser des lignes parfaitement droites, et est ainsi utilisé dans le bâtiment, pour l'alignement dans les chantiers (laser de canalisation).

La mesure des distances peut aussi se faire au moyen d'un rayon laser (télémètre laser), par exemple la mesure de la distance Terre-Lune : un rayon laser est émis depuis la Terre en direction de la Lune, les rayons réfléchis sont détectés au moyen d'un télescope, et l'intervalle de temps mesuré avec une grande précision fournit la distance Terre-Lune.

Un LIDAR (Light Détection and ranging), un radar optique, obéit au même principe et permet de situer la position d'une cible en approche, et donc de faire un balayage de toute une zone

On peut aussi coupler les lasers avec les « fibres optiques ». Une fibre optique est un guide diélectrique à l'intérieur de laquelle la lumière (l'information) peut être acheminée sur des milliers de kilomètres. Le cœur de la fibre, qui a un indice de réfraction plus fort que la gaine, piège la lumière. Un rayon laser introduit à l'intérieur de la fibre subit des milliers de réflexion avant d'arriver jusqu'à destination. Il existe un réseau mondial de fibres optiques tel que plus de la moitié des communications à longue distance se fait grâce à ce réseau.

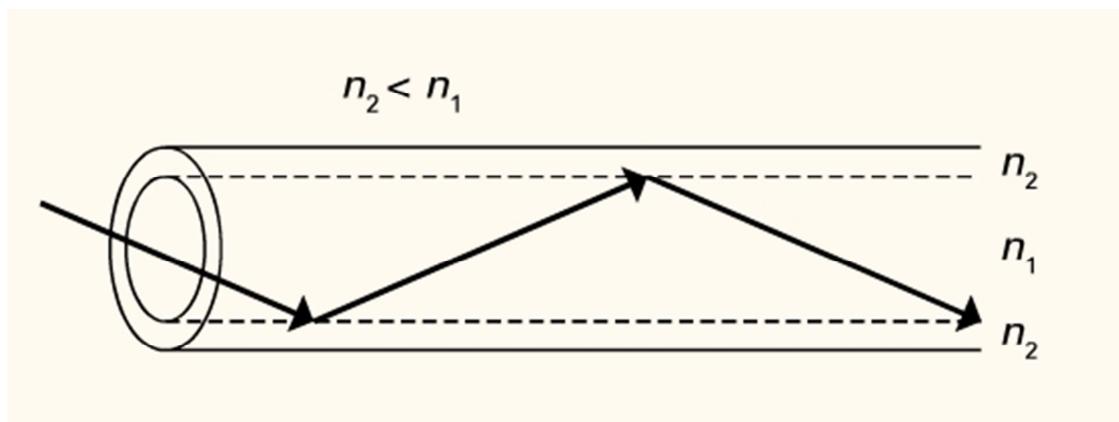


Figure 16. Reflexion totale d'un rayon laser à l'intérieur d'une fibre optique

En raison de leur précision directionnelle, les rayons laser servent à couper et à cautériser les tissus organiques, sans endommager les tissus sains environnants (Chirurgie laser). Ils sont utilisés notamment dans les opérations de décollement de la rétine, pour ressouder les tissus, ainsi que pour cautériser les vaisseaux sanguins et vaporiser les lésions.

Résumons:

Pendant le XX^e siècle, d'importants développements furent apportés à la physique. Deux théories majeures voient le jour : La théorie quantique et la théorie de la relativité. Ces deux théories, permettent alors d'expliquer les découvertes précédentes et de conduire à de nouvelles découvertes, modifiant en profondeur les concepts de base de la physique et notre perception du monde. La physique moderne ne cesse d'impressionner notre esprit, comme la dilatation des durées prévus par la théorie de la relativité et qui sont pourtant vérifiés par l'expérience. La physique moderne a aussi révolutionné le monde de la technologie. Comme la compréhension qu'elle nous donne de la conduction dans les matériaux semi-conducteurs par la mécanique quantique, et sans quoi il n'y aurait pas d'ordinateurs ni de société de l'information. Sans mécanique quantique il n'y aurait pas de lasers. La mécanique quantique nous a aussi permis de développer d'avantage internet avec l'apparition des fibres optiques. Sans mécanique quantique, il n'y a pas d'horloge atomique, pas de GPS, il n'y a pas d'imagerie par résonnance magnétique (IRM) qui est une combinaison de technologie à base quantique, il n'y aurait pas de microscope à effet tunnel, qui permet de « voir » pour la première fois les atomes et de les manipuler, sans mécanique quantique il n'y a pas de rêve d'ordinateur quantique. Les recherches continuent et des progrès sont encore à venir. En ce début de XXI^e siècle, un grand nombre de physiciens tentent d'élaborer une théorie unifiée conciliant la théorie de la relativité généralisée et la théorie quantique de manière à pouvoir intégrer la gravitation dans la description quantique des interactions – qui a permis jusqu'ici de réunir les trois autres interactions (l'interaction électromagnétique, l'interaction forte et l'interaction faible)

Mais malgré l'impact qu'a pu avoir l'ensemble de toute la physique moderne sur notre civilisation, elle ne figure pratiquement pas dans les programmes de physique des classes secondaires ici à Madagascar, contrairement aux cas de nombreux pays de part le monde. Pour ces raisons, une réforme s'impose. Et comme un cours de physique moderne nécessiterait évidemment quelques prérequis, et qu'elle exige aussi une certaine maturité de la capacité de réflexion, nous avons choisi la classe terminale de la série scientifique pour faire une introduction de la physique moderne.

Deuxième partie : Le contenu à enseigner

En introduisant la physique moderne dans le programme de physique de la classe terminale de la série scientifique, on réduit déjà l'écart qu'il y a entre le niveau de connaissance de nos élèves et ceux des autres pays avancés, tel la France, les Etats Unis d'Amérique ou le Japon.

La physique moderne est écrite dans un langage mathématique bien plus complexe que celle de la physique classique et connaissant le niveau en mathématique d'un élève de la classe terminale, nous nous limiterons à des notions qui ne seront pas trop difficile à comprendre, mais toutes fois essentielles.

Vous remarquerez que le cours dispensé ne renferme pas encore de nouvelles notions relatives à la théorie de la relativité mais seulement des notions de base de la mécanique quantique. La raison est simple, c'est pour ne pas trop charger le cours. En effet, beaucoup de professeurs de physiques aux lycées s'accordent à dire que le programme est déjà assez chargé, et déjà assez difficile que certains élèves n'arrivent pas à suivre. Peut être que l'importance du taux d'échec au baccalauréat scientifique est la preuve qu'ils n'ont pas tout à fait tors. On a donc revu ce programme afin d'y inclure le strictement nécessaire.

Le programme de physique actuellement en vigueur se divise en quatre grandes parties, à savoir :

- **La mécanique classique** (pour une durée de 47heures)
- **L'électromagnétisme** (42 heures)
- **L'optique géométrique** (12 heures)
- **Physique atomique et nucléaire** (07 heures)

Il faut aussi tenir compte du fait que bon nombre d'enseignants du lycée ont déjà du mal à finir le programme dans les temps, alors l'idée de tout simplement « ajouter » n'est pas raisonnable du tout.

Après mures réflexions, et après les entretiens passés avec plusieurs professeurs au lycée, qui ont bien voulu nous faire part de leurs avis, avis qui diffèrent d'ailleurs, on est finalement arrivé à trouver une solution, enlever du programme de physique de la classe terminale de la série scientifique « l'optique géométrique », nous aurons donc déjà 12 heures de libres, ce qui est suffisant pour introduire de nouvelles notions relatives à la physique moderne.

Dans cette vision des choses, on est forcément amener à se poser les questions suivantes : pourquoi l'optique ? Quels en seront les impacts culturels et scientifiques sur nos élèves si jamais on l'ôtait du programme ?

L'optique géométrique en classe terminale (consacré à l'étude des lentilles minces) – faut le reconnaître- n'est pas aussi fondamentale que la mécanique, l'électromagnétique ou encore la physique nucléaire. On a donc opté pour cette solution. Toute fois, par sa simplicité, l'optique géométrique n'a jamais causé de soucis réels de compréhension aux élèves, de ce fait, elle peut toujours être rajoutée au programme de physique des classes de niveaux inférieures, de la classe première par exemple.

A l'origine, la mécanique quantique est née du principe de **quantification**, d'où son nom d'ailleurs, quantification de l'électricité, de la lumière et de l'énergie, il y aussi **la dualité onde corpuscule** qui est un concept des plus basiques de cette mécanique. Et c'est justement ce que nous voulons faire, remonter à la source et donner des bases solides à nos élèves pour qu'ils puissent se frayer une voie sûr dans le monde de la physique moderne.

L'optique géométrique n'étant plus au programme, on va pouvoir introduire **trois** nouveaux chapitres au programme, dans la partie physique atomique et nucléaire.

D'abord un premier chapitre sur « **les ondes électromagnétiques** », qui vise à faire connaître aux élèves ce qu'est une onde électromagnétique, ses propriétés, et les différents types d'onde électromagnétiques dont la lumière visible. Ce court chapitre qui est à la fois un rappel des acquis en classe de première sur les ondes est aussi essentiel pour la suite.

Le deuxième chapitre concerne « **la dualité onde corpuscule** » aussi bien la dualité onde corpuscule de la lumière que la dualité onde corpuscule de la matière, et donc les ondes de de Broglie. L'étude de l'effet photoélectrique qui est actuellement au programme physique de la classe terminale de la série littéraire n'est pas au programme, par contre on peut le retrouver dans les exercices.

Le troisième chapitre est la « **quantification de l'énergie** », où seront exposés l'émission et l'absorption de la lumière par les atomes, la quantification de l'énergie atomique, l'émission stimulée et le principe du laser dont on a déjà mentionné l'intérêt.

Les chapitres intitulés « **le noyau atomique** », « **les réactions nucléaires spontanées** » et « **les réactions nucléaires provoquées** » qui figurent dans le programme actuel, sont une suite logique de ces trois nouveaux chapitres.

Les réformes apportées au programme se résument donc ainsi : ôter du programme l'optique géométrique et introduire trois nouveaux chapitres dans la partie **physique atomique et nucléaire**, qui aura dorénavant une durée totale de 12+7, soient 19 heures.

Le cours

NIVEAU : Terminale S

DUREE : 12 Heures

OBJECTIFS SPECIFIQUES: L'élève doit être capable de (d') :

- o **Objectif 1** : Définir une onde électromagnétique et donner ses propriétés, associer une onde électromagnétique de fréquence ou de longueur d'onde donnée à un domaine de longueurs d'onde du spectre électromagnétique.
- o **Objectif 2** : Définir la nature corpusculaire de la lumière. Utiliser la relation $E = h.v$, préciser la signification de chaque terme et leurs unités. Evaluer le nombre de photons émis par une source lumineuse ou reçus par un détecteur.
- o **Objectif 3** : Enoncer et appliquer les hypothèses de De Broglie : $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m.v}$ identifier les situations où le caractère ondulatoire de la matière est significatif.
- o **Objectif 4** : Enoncer et appliquer les postulats de Bohr
- o **Objectif 5** : Calculer les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène.
- o **Objectif 6** : Définir les différents types de spectres et les interpréter.
- o **Objectif 7** : Expliquer le principe de l'émission stimulée, donner les propriétés du laser.

PREREQUIS:

- o Nature ondulatoire de la lumière, les phénomènes de diffraction et d'interférence.
- o Définitions et propriétés du champ électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} .
- o Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme \vec{E}

SOMMAIRE :

[Chapitre 1] Les ondes électromagnétiques (Durée : 2Heures)

[Chapitre 2] La dualité onde-corpuscule (Durée : 5Heures)

[Chapitre 3] Quantification de l'énergie. (Durée : 5Heures)

CHAPITRES SUIVANTS AU PROGRAMME:

[Chapitre 4] Le noyau atomique.

[Chapitre 5] Les réactions nucléaires spontanées.

[Chapitre 6] Les réactions nucléaires provoquées.

Chapitre I : Les ondes électromagnétiques

(Durée : 2 Heures)

1. Définition :

Une onde électromagnétique est constituée d'un champ électrique \vec{E} et d'un champ magnétique \vec{B} d'intensités variables, l'un perpendiculaire à l'autre, et qui oscillent tout les deux à la même fréquence. L'onde se propage de façon ondulatoire dans une direction perpendiculaire à la fois aux lignes de champ électrique et magnétique.

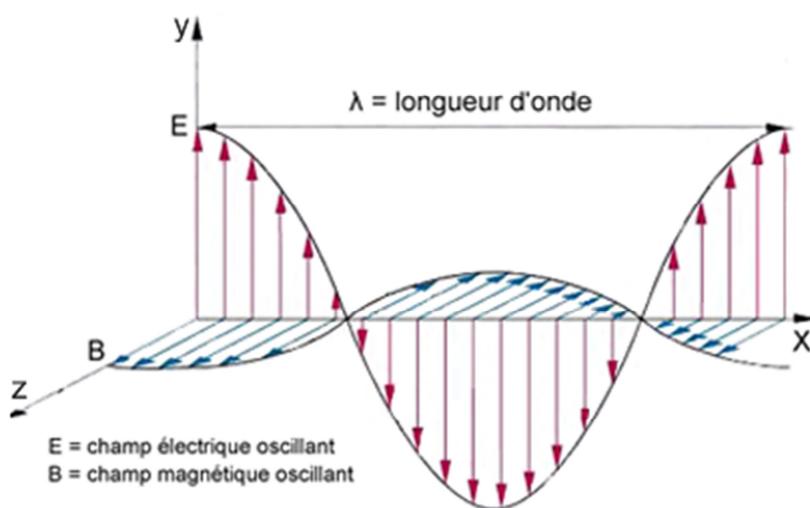


Figure 17.Une onde électromagnétique plane

2. Propriétés :

A la différence des autres types d'ondes, les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide, et ce à la vitesse de la lumière : $c \approx 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$. La norme du champ électrique \vec{E} et du champ magnétique \vec{B} sont reliées elles par :

$$B = \frac{E}{c}$$

Dans un milieu d'indice de réfraction n , la vitesse de propagation devient :

$$v = \frac{c}{n}$$

Une onde électromagnétique peut être caractérisée par plusieurs grandeurs physiques :

■ Sa période (T) :

La période représente la durée nécessaire pour que l'onde effectue une oscillation complète. L'unité est la seconde (s)

■ Sa longueur d'onde (λ) :

La longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde pendant une période.

$$\lambda = c.T$$

Ainsi, la longueur d'onde et la période sont reliées par la relation :

$$\lambda = \frac{c}{v}$$

λ : Longueurs d'onde exprimée (en m).

c : vitesse de propagation de l'onde dans le milieu considéré (en m.s^{-1})

T : Période de l'onde (en s)

Le plus souvent, la longueur d'onde λ est exprimée en l'un des sous multiples du mètre :

- Le nanomètre : $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$
- Le micromètre : $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$

■ La fréquence (ν):

Inverse de la période, la fréquence ν traduit le nombre d'oscillations effectuées par l'onde en une seconde.

$$\nu = \frac{1}{T}$$

La période étant exprimée en seconde et la fréquence exprimée en Hertz (Hz)

La fréquence est le plus souvent exprimée en l'un des multiples du Hertz :

- Le kilohertz : $1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$
- Le mégahertz : $1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$
- Le gigahertz : $1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$

De la relation : $\lambda = c \cdot T$, et d'après la définition de la fréquence, la fréquence et la longueur d'onde sont donc inversement proportionnelle et unies par la relation :

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

λ : Longueurs d'onde (en m)

c : vitesse de propagation de l'onde dans le milieu considéré (en m.s^{-1})

ν : Fréquence de l'onde (en Hertz)

Remarque :

Quand une onde électromagnétique se propage d'un milieu d'indice de réfraction n à un autre, sa fréquence reste inchangée, ce sont la longueur d'onde et la vitesse de propagation de l'onde qui varient en fonction du milieu.

3. Nature électromagnétique de la lumière :

En 1803, le physicien britannique Thomas Young mit en évidence la nature ondulatoire de la lumière par l'expérience dite « **expérience des fentes d'Young** » la figure d'interférence obtenu est une preuve que **lumière est une onde**.

C'est le physicien écossais **James Maxwell**, qui mit au point une théorie unifiée de l'électromagnétisme qui a établit ensuite que la lumière est un phénomène électromagnétique, autrement dit que **la lumière est une onde électromagnétique**, un membre parmi d'autre de la grande famille des ondes électromagnétiques : un grand tournant dans l'histoire de la physique.

Seules les radiations électromagnétiques de longueurs d'onde comprise entre 400 nm et environ 780 nm sont visibles: c'est la lumière visible.

A chaque longueur d'onde est associée une couleur. Une onde électromagnétique à 400 nm est perçue par notre œil comme une lumière violette ; à 780 nm cette lumière est rouge. Les longueurs d'onde intermédiaires sont perçues comme le bleu, le vert, le jaune et l'orange.

Voici un tableau qui regroupe les différentes longueurs d'onde de la lumière visibles et les couleurs associées.

Longueurs d'onde (nm)	Couleurs
400	Violet extrême
420	Violet moyen
440	Violet-bleu
470	Bleu moyen
500	Bleu vert
530	Vert moyen
560	Vert jaune
580	Jaune moyen
590	Jaune orangée
600	Orangé moyen
610	Orangé rouge
650	Rouge moyen
780	Rouge extrême

Tableau 1. Longueurs d'onde et couleurs

4. Le spectre électromagnétique :

Selon leurs longueurs d'onde, on distingue plusieurs types d'ondes électromagnétiques. Le **spectre électromagnétique** représente la répartition des ces ondes en fonction de leurs longueurs d'onde ou de leurs fréquences.

Dans l'ordre croissant des longueurs d'onde, les ondes électromagnétiques comprennent successivement :

- **Les rayons gamma** ($\lambda < 0,1\text{nm}$)
- **Les rayons X** ($0,1\text{nm} < \lambda < 0,1\mu\text{m}$)
- **Les rayons ultraviolets (UV)** ($0,1\mu\text{m} < \lambda < 0,4\mu\text{m}$)
- **La lumière visible** ($0,4\mu\text{m} < \lambda < 0,7\mu\text{m}$)
- **Les rayons infrarouges (IR)** ($0,7\mu\text{m} < \lambda < \text{mm}$)
- **Les micro-ondes** ($\text{mm} < \lambda < \text{m}$)
- **Les ondes hertziennes ou ondes radio** ($\text{m} < \lambda$)

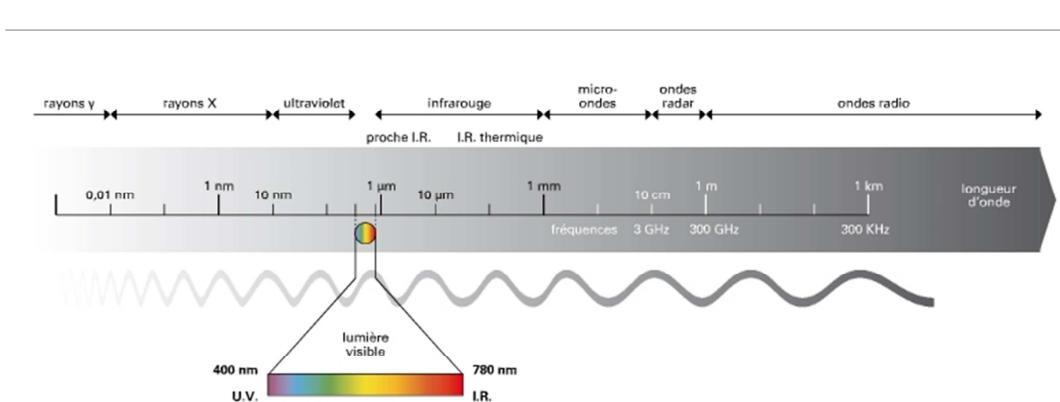


Figure 18. Le spectre électromagnétique

Une radiation électromagnétique est dite **monochromatique** lorsqu'elle est composée d'une seule radiation de longueur d'onde déterminée

Exemple : la lumière laser (Chapitre III)

Une radiation électromagnétique est dite **polychromatique** lorsqu'elle est composée de plusieurs radiations de longueurs d'onde différentes.

Exemple : La lumière émise par le soleil

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Une **onde électromagnétique** est constituée d'un champ électrique \vec{E} et d'un champ magnétique \vec{B} , perpendiculaire l'un par rapport à l'autre, d'intensités variables et oscillant à la même fréquence. L'onde se propage de façon ondulatoire dans une direction perpendiculaire à la fois aux lignes de champ électrique et magnétique.
- A la différence des autres types d'ondes, les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide, et ce à la vitesse de la lumière : $c \approx 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$. Dans un milieu d'indice de réfraction n sa vitesse devient $v = \frac{c}{n}$
- Une onde électromagnétique peut être caractérisée par la donnée de sa fréquence ν (exprimée en Hz) ou de sa longueur λ (exprimée en m). La fréquence et la longueur d'onde étant inversement proportionnelles et unies par la relation : $\lambda = \frac{c}{\nu}$
- Quand une onde électromagnétique se propage d'un milieu d'indice de réfraction n à un autre, sa fréquence reste inchangée, ce sont la longueur d'onde et la vitesse qui varient.
- **La lumière est une onde électromagnétique.** Seules les radiations électromagnétiques de longueurs d'onde comprise entre **400nm et 780nm** sont visibles par l'œil humain.
- Dans l'ordre croissant des longueurs d'onde, les ondes électromagnétiques comprennent successivement : **Les rayons gamma, les rayons X, les rayons ultraviolets, la lumière visible, les rayons infrarouges, les micro-ondes, et les ondes hertziennes.**
- Une radiation électromagnétique est dite **monochromatique** lorsqu'elle est composée d'une seule radiation de longueur d'onde déterminée. (ex : le laser)
- Une radiation électromagnétique est dite **polychromatique** lorsqu'elle est composée de plusieurs radiations de longueurs d'onde différentes. (ex : la lumière du soleil)

EXERCICES

- 1) Définir une onde électromagnétique.
- 2) Une radiation électromagnétique a une longueur d'onde $\lambda_0 = 240,0 \text{ nm}$ dans le vide.
Cette radiation est elle visible ? A quel domaine (...UV, visible, IR...) du spectre électromagnétique appartient-elle ? Calculer sa fréquence.
- 3) Une radiation lumineuse a pour longueur d'onde dans le vide : $\lambda_0 = 656,3 \text{ nm}$ Quelle est sa couleur ? Que devient sa longueur d'onde dans le quartz d'indice $n=1,525$? Sa fréquence change t'elle ? Quelle est la vitesse de propagation de l'onde dans le quartz ?

Chapitre 2 : La dualité onde- corpuscule

(Durée : 5 heures)

1. La théorie du photon :

En 1887, **Heinrich Hertz** découvre **l'effet photoélectrique** (émission d'électrons par un métal sous l'action de radiations lumineuses) (Figure 18) lors de ses travaux sur l'électromagnétisme. L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus dans l'étude de l'effet photoélectrique ne pouvaient s'expliquer avec la **physique classique** qui considérait la lumière comme une onde.

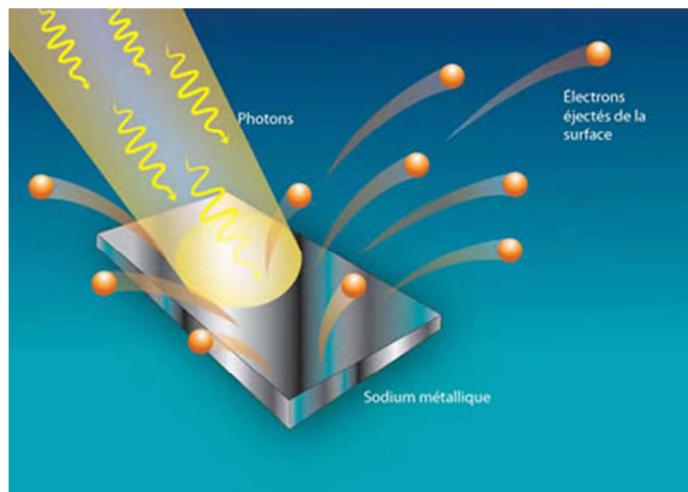


Figure 19.L'effet photoélectrique

Mais en 1905, **Albert Einstein** parvint à interpréter ces résultats grâce à **la théorie des quanta**, introduite quelques années plus tôt par **Max Planck**. Il proposa en effet de concevoir la lumière comme un flux de particules (**les photons**), dotées d'une énergie dépendant uniquement de la fréquence de la lumière.

Ainsi Einstein posa les postulats suivants :

- o La lumière est constituée de particules indivisibles, de charge nulle se déplaçant à la vitesse de la lumière : **les photons**
- o L'énergie d'un photon d'une onde électromagnétique monochromatique de fréquence ν est donnée par: $E = h.\nu$
 h est la constante de Planck ; $h = 6,626 \cdot 10^{-34} J.s$
 ν la fréquence exprimée en Hertz
Et E l'énergie exprimée en Joules.

Ainsi la lumière est constituée d'accumulation de petites et discrètes quantités d'énergie, les photons. On dit aussi que la lumière est **quantifiée**

EXERCICE:

Calculer en Joules puis en électronvolt (eV) d'un photon du rayonnement gamma de longueur d'onde $\lambda = 10^{-13} m$ et d'un photon d'une onde radio de fréquence $\nu = 100 MHz$

On donne : $1 eV = 1,60 \cdot 10^{-19} J$ et $c \approx 3 \cdot 10^8 m.s^{-1}$

Solution :

Pour le rayon gamma : $\lambda = 10^{-13} m$ et on sait que $E = h.\nu$ avec $\nu = \frac{c}{\lambda}$. D'où :

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$$E = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{10^{-13}} \quad \text{Soit : } E = 19,86 \cdot 10^{-13} J = 12,41 \cdot 10^6 eV$$

Pour l'onde radio : $\nu = 100 MHz = 10^8 Hz$, $E = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 10^8$

$$\text{Soit : } E = 6,62 \cdot 10^{-26} J = 6,62 \cdot 10^{-7} eV$$

La « puissance P » ou l'énergie rayonnée par unité de temps (seconde) par une source de lumière monochromatique de fréquence ν s'exprimera en **Watt** par:

$$P = \frac{(Nombre\ de\ photon) \times (Energie\ d'un\ photon)}{Temps}$$

$$\text{Soit } P = \frac{N.h\nu}{\Delta t}$$

L'« intensité I » ou l'énergie rayonnée par unité de surface (m^2) et de temps sur une surface normale à la direction de propagation s'exprimera en **Watt/m²** par :

$$I = (Nombre\ de\ photons) \times \frac{(énergie\ d'un\ photon)}{Surface \times Temps}$$

$$\text{Soit } I = \frac{N.h\nu}{S.\Delta t}$$

EXERCICE 1:

Une station radio émet une onde radio à la fréquence de 103,7MHz et sous la puissance de 200kW. Déterminer le nombre de photons émis par seconde.

Solution :

L'énergie de chaque photon est $E = h.\nu = 6.62.10^{-34} \times 103,7.10^6 = 6,88.10^{-26} J$

Sachant que : $P = \frac{N.h\nu}{\Delta t}$ le nombre de photon émis par seconde est donné

$$\text{par : } \frac{N}{\Delta t} = \frac{P}{h.\nu}$$

$$\frac{N}{\Delta t} = \frac{200.10^3}{6,88.10^{-26}} \quad \text{Soit : } \frac{N}{\Delta t} = 2,91.10^{30} \text{ Photons / s}$$

EXERCICE 2 :

Une lumière monochromatique de longueur d'onde 300 \AA^0 ($1\text{ \AA}^0 = 10^{-10}\text{ m}$) tombe normalement sur une surface de 4 cm^2 . Si l'intensité de la lumière est de 15.10^{-2} W/m^2 . Déterminer le nombre de photons qui frappe la surface par unité de temps

Solution :

L'énergie de chaque photon est :

$$E = h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^{-7}} = 6,62 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Sachant que : $I = \frac{N \cdot h\nu}{S \cdot \Delta t}$ le nombre de photons temps qui frappe la surface par unité de temps est donnée par : $\frac{N}{\Delta t} = \frac{I \cdot S}{h\nu} = \frac{15 \cdot 10^{-2} \times 4 \cdot 10^{-4}}{6,62 \cdot 10^{-19}}$ soit :

$$\frac{N}{\Delta t} = 9,06 \cdot 10^{13} \text{ Photons / s}$$

CE QU'IL FAUT RETENIR

- La lumière est constituée de particules indivisibles, de charge nulle se déplaçant à la vitesse de la lumière : **les photons**. On dit que la lumière est **quantifiée**.
- L'énergie d'un photon d'une onde électromagnétique monochromatique de fréquence ν est donnée par: $E = h\nu$; h étant la constante de Planck : $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
- La « puissance P » ou l'énergie rayonnée par unité de temps (seconde) par une source de lumière monochromatique de fréquence ν s'exprimera en **Watt** par:

$$P = \frac{N \cdot h\nu}{\Delta t}$$

- L'« intensité I » ou l'énergie rayonnée par unité de surface (m^2) et de temps sur une surface S normale à la direction de propagation s'exprimera en **Watt/m²** par :

$$I = \frac{N \cdot h\nu}{S \cdot \Delta t}$$

EXERCICES

- 1) Quelle est la longueur d'onde des rayons X dont les photons ont l'énergie $E=40000\text{eV}$?

On donne : Constante de Planck : $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

$$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

- 2) Une lumière violette a une longueur d'onde de $0,420 \mu\text{m}$. Calculer sa fréquence. Calculer en joule et en électronvolt l'énergie d'un photon de cette lumière
- 3) Calculer l'énergie des photons des ondes électromagnétiques suivantes :
- a) Ondes hertziennes : $\lambda = 1829 \text{ m}$
 - b) Onde UHF de télévision : $\lambda = 0,4 \text{ m}$
 - c) Rayonnement cosmique : $\lambda = 10^{-14} \text{ m}$
- 4) Calculer combien de photons pénètrent dans l'œil lorsque celui ci est placé à 5 m devant une source de lumière monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ émettant une puissance lumineuse de 1 W. Le diamètre de la pupille est 2mm
- 5) La puissance d'émission d'une station radio est 150kW à 101,1 MHz. En supposant que l'émission est uniforme dans toutes les directions, trouver le nombre de photons qui traversent une surface unité à 1 Km de la station par unité de temps

2. La dualité onde-corpuscule de la lumière :

Il a été mis en évidence que pour interpréter certaines observations expérimentales avec la lumière (effet photoélectrique, ...) il fallait attribuer à la lumière et donc aux ondes électromagnétiques les caractéristiques de particules : les photons. Cependant des phénomènes tels que les interférences ou la diffraction montre que la lumière se comporte comme une onde. Dans ces conditions, la lumière présente un double aspect, à la fois ondulatoire et corpusculaire. On parle de la **dualité onde-corpuscule de la lumière**

3. La dualité onde-corpuscule de la matière : Les ondes de Broglie :

En 1924, **Louis de Broglie** émit l'hypothèse que si la lumière se comporte soit comme une onde, soit comme une particule, c'est que peut être certains objets matériels tels que les électrons peuvent parfois se comporter comme des ondes. En d'autre terme, de Broglie émit l'hypothèse que si certains objets passent à travers des fentes dont la largeur est comparable à une certaine longueur d'onde qui leurs serait associé, on pourrait observer avec ces objets une figure **d'interférence** ou de **diffraction** exactement semblable à celle que subit la lumière au cours de son passage à travers des fentes dont les dimensions sont du même ordre de grandeur que sa longueur d'onde.

Louis de Broglie postula donc :

A tout objet matériel, de quantité de mouvement $p = m.v$, est associée une onde dont la longueur d'onde est donnée par l'expression : $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m.v}$
 h étant la constante de Planck

Les expériences de diffraction et d'interférence réalisées avec différents faisceaux de particules (électrons, atomes, neutrons, ...) confirment de manière irréfutable les hypothèses de de Broglie.

Au regard de la grandeur de la constante de Planck qui conditionne la valeur de la longueur d'onde, le caractère ondulatoire associé à une particule ne peut se manifester pour des objets macroscopiques. Par contre, à l'échelle atomique ou subatomique, le caractère ondulatoire des particules matérielles (électrons, nucléons) peut se manifester si leurs longueurs d'onde sont comparables aux échelles de longueur qui caractérisent leur mouvement

EXERCICE 1:

Trouver la longueur d'onde de Broglie associée à une bille de masse 10g ayant une vitesse de 10m/s.

Solution :

$$\lambda = \frac{h}{m.v} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{0,01 \times 10} \text{ Soit } \lambda = 6,62 \cdot 10^{-33} m$$

Pour observer les ondes de de Broglie, les expériences de d'interférences ou de diffraction doivent être réalisées avec des fentes de dimensions comparables à celle des ondes de Broglie associées. La longueur d'onde de Broglie qui vient d'être déterminée est inférieure de plusieurs grandeurs à la dimension des plus petites fentes que l'on peut réaliser actuellement.

EXERCICE 2 :

Calculer la longueur d'onde de Broglie associé à un électron de masse $m = 0,91 \cdot 10^{-30} \text{ Kg}$ initialement au repos et accéléré à travers une différence de potentiel constante $U=100\text{V}$. On donne : charge élémentaire $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Solution :

D'après le Théorème de l'énergie cinétique appliquée à l'électron: $\frac{1}{2}mv^2 - 0 = e.U$

D'où l'expression de la vitesse de l'électron : $v = \sqrt{\frac{2.e.U}{m}}$

$$\text{Soit : } v = \sqrt{\frac{1,60 \cdot 10^{-19} \times 10^2}{0,91 \cdot 10^{-30}}} = 4,19 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

La longueur d'onde de Broglie associé est donnée par :

$$\lambda = \frac{h}{m.v} = \frac{6.625 \cdot 10^{-34}}{0,91 \cdot 10^{-30} \times 4,19 \cdot 10^6} = 1,73 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 1,73 \text{ \AA}$$

C'est le même ordre de grandeur que la distance interatomique dans les cristaux. Pour cette raison on peut observer une figure de diffraction d'un faisceau électrons dotés d'une certaine énergie venant frapper un matériau cristallin. (Fig 20)

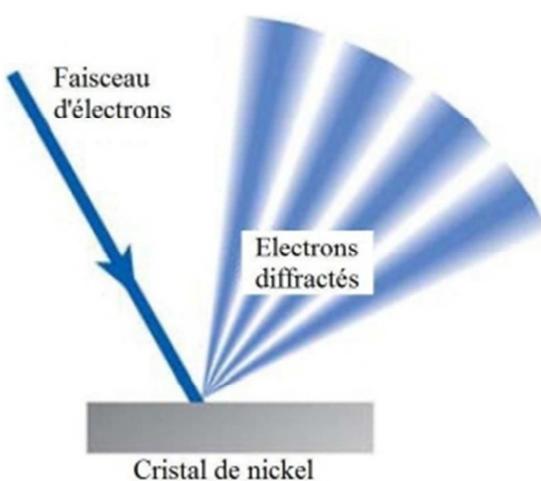


Figure 20. Diffraction des électrons sur une surface de Nickel

CE QU'IL FAUT RETENIR

- o La lumière présente à la fois un aspect ondulatoire que corpusculaire (les photons). On parle de dualité onde -corpuscule de la lumière.
- o Les objets matériels peuvent aussi se comporter comme des ondes. C'est la dualité onde corpuscule de la matière.
- o D'après Louis de Broglie, à tout objet matériel, de masse m , animée d'une vitesse v , il est possible d'associer une onde dont la longueur d'onde est donnée par l'expression :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$$

- o Le caractère ondulatoire de la matière ne peut se manifester pour des objets macroscopiques. Par contre, à l'échelle atomique ou subatomique, le caractère ondulatoire des particules matérielles (électrons, nucléons) peut se manifester si leurs longueurs d'onde sont comparables aux échelles de longueur qui caractérisent leur mouvement. Par exemple lorsqu'un faisceau d'électrons passe à travers une fente de dimensions comparable à la longueur d'onde de Broglie qui leur sera associé.

EXERCICES

- 1) Calculer la longueur d'onde de de Broglie pour :

- a) Une balle de tennis ($m = 60\text{g}$; $v = 10\text{m/s}$)
- b) Un projectile ($m = 1\text{g}$; $v = 90\text{m/s}$)
- c) Un proton ($m = 1,67 \cdot 10^{-27}\text{Kg}$; $U = 2,5 \cdot 10^5\text{V}$)
- d) Un électron ($m = 9,1 \cdot 10^{-31}\text{Kg}$; $U = 250\text{V}$)

U est la différence de potentiel que l'électron ou le proton doit franchir pour atteindre la vitesse nécessaire

2) Comme la lumière, des particules matériels tels que les électrons, les protons, les neutrons, les atomes,... passant à travers une fente double donnent une figure d'interférence sur un écran. On réalise une expérience des fentes d'Young avec des atomes d'Hélium. Le principe de l'expérience est représenté par la figure ci-dessous :

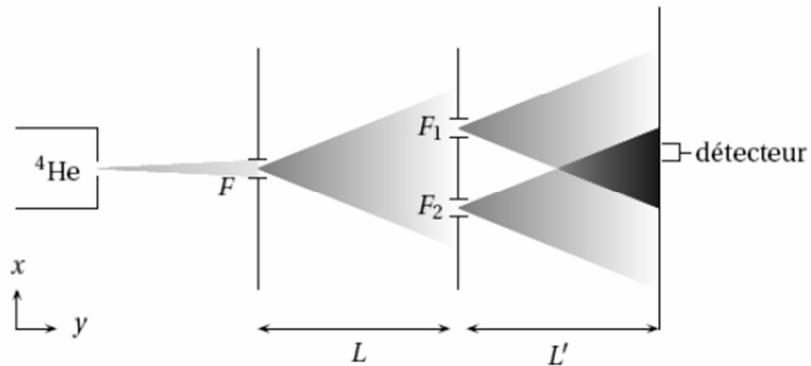


Figure 21. Expérience des fentes d'Young avec des noyaux d'hélium

Les atomes rencontrent une première fente F de largeur $S_1 = 2\mu m$ et de hauteur égale à 4 mm réalisée dans une feuille d'or. Puis comme l'indique la figure ils rencontrent un dispositif à deux fentes de largeur $1\mu m$, de hauteur 2 mm et de distance $a = 8\mu m$ réalisée également avec une feuille d'or. Les distances L et L' valent 64 cm. Comme dans le cas des ondes lumineuses, la valeur de l'interfrange i observée sur l'écran est donnée par la même relation: $i = \frac{\lambda L'}{a}$; λ étant cette fois ci la longueur d'onde de Broglie associée aux électrons. Lors de l'expérience, une mesure de la valeur de l'interfrange donne : $i = 4,5\mu m$

- Déterminer la valeur de la longueur d'onde de Broglie λ en μm .
- En déduire la vitesse des électrons à l'entrée des fentes F_1 et F_2 .

Chapitre 3: Quantification de l'énergie

(Durée : 5 Heures)

1) Les spectres atomiques :

1.1 Le spectre de la lumière blanche

Rappelons que lorsque l'on décompose la lumière blanche du Soleil à l'aide d'un prisme ou d'un réseau, on observe un éventail de couleurs appelé **spectre**. On dit que la lumière blanche possède un **spectre continu**, car on passe d'une couleur à une autre sans interruption dans la succession des couleurs.

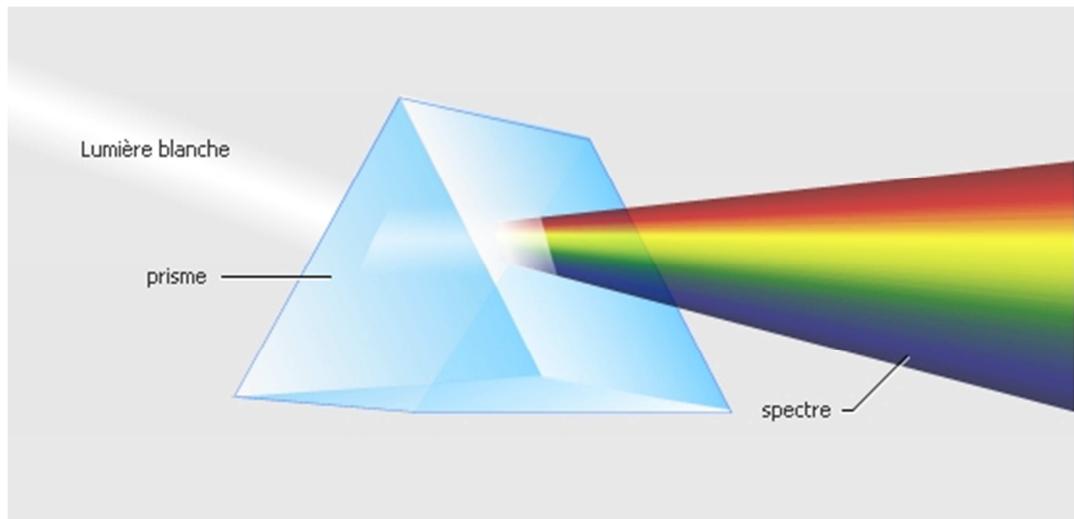


Figure 22. Décomposition de la lumière blanche par un prisme



Figure 23. Spectre de la lumière blanche

Expérimentalement on constate que tout corps (gazeux ou solide) sous haute pression et à haute température, donne naissance à un spectre continu de lumière.

1.2 Les spectres d'émission :

Convenablement excité (sous forme thermique ou électrique) les atomes d'un gaz sous faible pression émettent une lumière dont le spectre est constitué de raies alternées brillantes. On parle de **spectre d'émission**. La configuration d'une suite de raies est spécifique à un élément chimique donné ; elle constitue sa « signature » spectrale

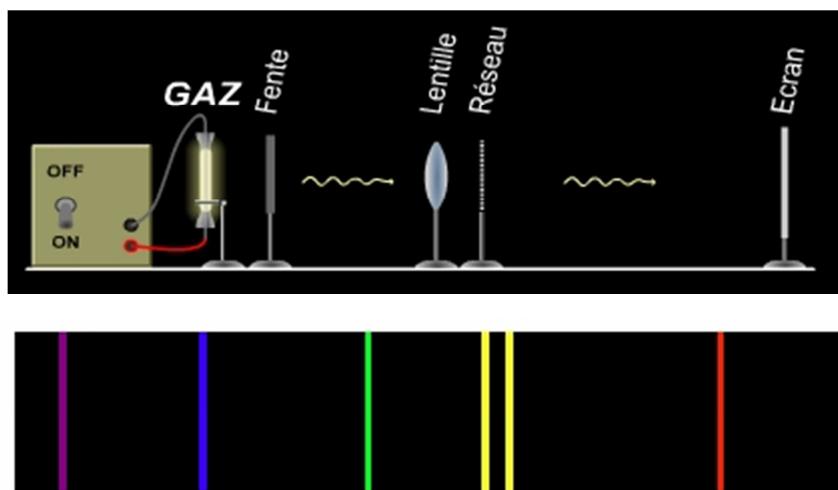


Figure 24. Spectre d'émission d'un atome de sodium

1.3 Les spectres d'absorption :

L'analyse d'une lumière traversant un gaz monoatomique froid à basse pression montre une extinction sélective de certaines longueurs d'ondes. Ces spectres présentent des raies sombres qui montrent que la lumière a été sélectivement absorbée. C'est le **spectre d'absorption**.

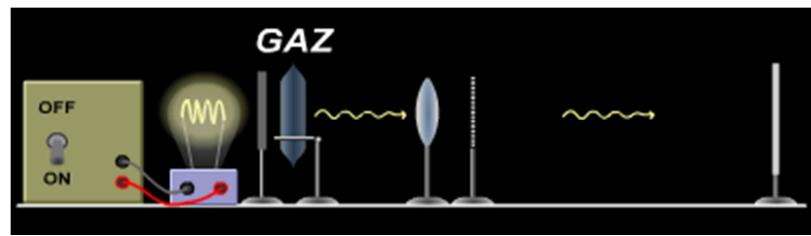


Figure 25.Spectre d'absorption d'un atome de sodium

Il s'agit du spectre de la lumière blanche barré de quelques raies noir.

Comparons le spectre d'émission du sodium à son spectre d'absorption.

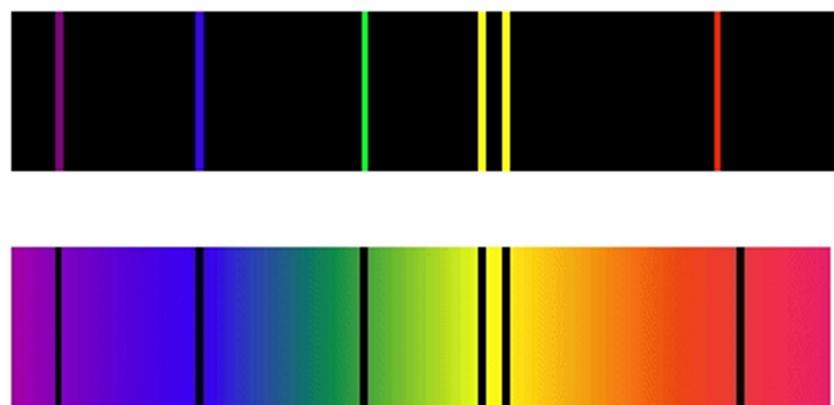


Figure 26.Comparaison entre le spectre d'émission et d'absorption d'un atome de sodium

Nous constatons que les raies d'émission du sodium correspondent exactement aux raies noires de son spectre d'absorption. Ce résultat est général :

Les atomes d'un élément donné ne sont capables d'absorber que les radiations qu'ils sont capables d'émettre

2) Quantification de l'énergie :

2.1 Les postulats de Bohr :

Pour expliquer l'existence des spectres des raies d'émission et d'absorption bien définies pour un atome, **Niels Bohr** introduit l'hypothèse de la quantification de l'énergie :

L'énergie d'un atome ne peut prendre qu'un certains nombre de valeurs discontinues croissantes : $E_1, E_2, \dots E_p, E_n\dots$ bien définis appelés niveaux d'énergie. On ne peut jamais observer d'atome possédant une énergie intermédiaire entre deux niveaux d'énergie.

Les expériences réalisées par Franck et Hertz en 1914 confirment cette hypothèse.

La quantification de l'énergie de l'atome introduit par Bohr permet de rendre compte de la stabilité des atomes. En effet, toutes les valeurs de l'énergie n'étant pas permises, il existe pour chaque atome un état d'énergie minimale appelée **état fondamentale** : c'est état est stable.

Pour qu'un atome quitte l'état fondamental, il faut lui fournir de l'énergie, les autres états de l'atome sont appelés **états excités**.

L'excitation d'un atome peut être le résultat de l'agitation thermique (flamme), d'un choc avec une autre particule ou de l'absorption d'un photon

On peut représenter sur un axe vertical les différents niveaux d'énergie d'un atome.

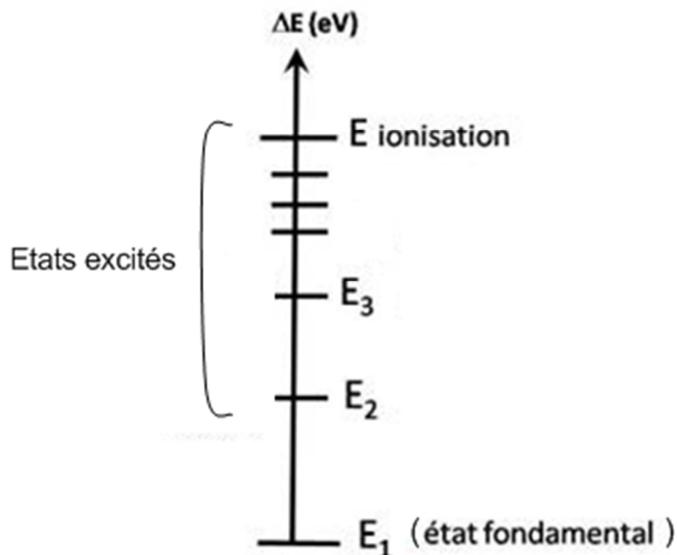


Figure 27. Diagramme d'énergie d'un atome

Les postulats de **Bohr** s'énoncent comme suit:

- L'énergie d'un atome ne peut prendre qu'un certain nombre de valeurs discontinues croissantes : $E_1, E_2, \dots E_m, E_n \dots$ bien définis appelés niveaux d'énergie : L'énergie est quantifiée.
- L'émission d'un photon d'énergie $h\nu_{nm}$ correspond au passage de l'atome d'un niveau d'énergie E_n à un niveau d'énergie inférieur E_m tel que : $E_n - E_m = h\nu_{nm}$

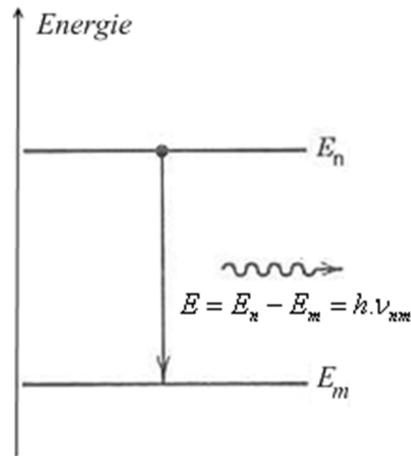


Figure 28. Emission d'un photon

- L'absorption d'un photon d'énergie $h\nu_{nm}$ correspond au passage de l'atome d'un niveau d'énergie E_m à un niveau d'énergie supérieur E_n tel que : $E_n - E_m = h\nu_{nm}$

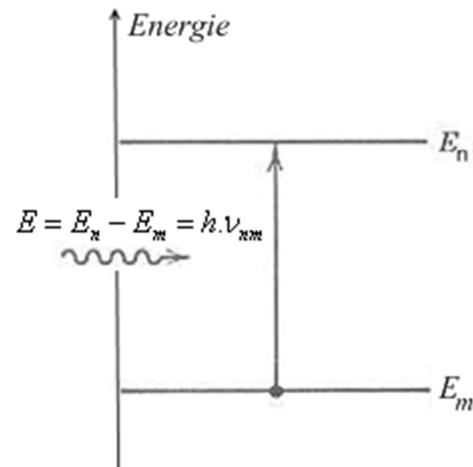


Figure 29. Absorption d'un photon

2.2 Interprétation des spectres de raies :

Seuls peuvent être émis ou absorbés des photons dont l'énergie est égale à la différence de deux valeurs possibles de l'énergie de l'atome. Il s'ensuit que :

Seules quelques longueurs d'onde sont émises. Les spectres sont **discontinus**.

Les longueurs d'onde des raies d'émissions et des raies d'absorption sont égales et sont parfaitement définies pour un atome.

2.3 Cas particulier de l'atome d'hydrogène :

Les niveaux d'énergie d'un atome sont difficiles à établir par le calcul, sauf ceux du plus simple des atomes : l'atome d'hydrogène.

Admettons :

L'énergie E_n du $n^{\text{ième}}$ niveau d'énergie de l'atome d'hydrogène est donnée en électrons-volt par :

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2}$$

Ainsi $n=1$, correspond à l'état fondamental, le niveau d'énergie correspondant est pour l'atome d'hydrogène égale à $E_1=-13,6\text{eV}$. Calculons les huit premiers niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène :

n	1	2	3	4	5	6	7	8
$E_n(\text{eV})$	-13,6	-3,4	-1,51	-0,85	-0,54	-0,38	-0,28	-0,21

Tableau 2. Les huit premiers niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène

L'état fondamental d'un atome correspond à un arrangement donné des électrons qu'il contient (Vu en classe de seconde). On remarquera que tous les niveaux d'énergie sont négatifs. Cela vient de la convention (comme dans toute relation énergétique), choisi ici à ce que $E=0$ quand l'électron n'est plus lié au noyau.

On appelle **énergie d'ionisation** l'énergie qu'il faut fournir à l'atome pour lui enlever son électron. Cette énergie d'ionisation est égale à où E_1 est l'énergie à l'état fondamental.

L'énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène est donc égale à 13,6 eV

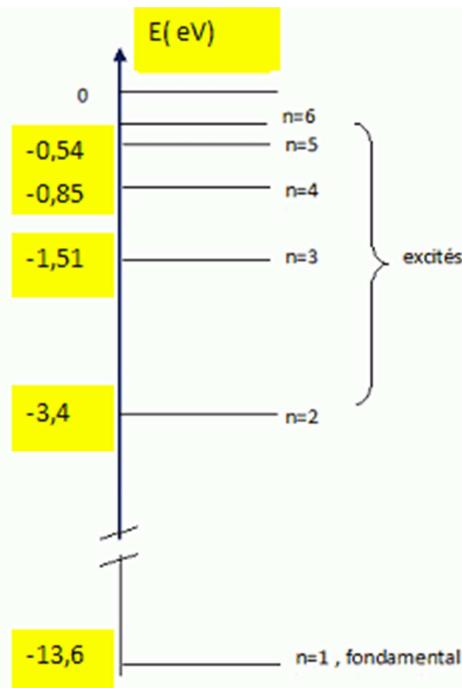


Figure 30. Diagramme d'énergie de l'atome d'hydrogène

Exercice : Interpréter l'absorption d'un photon d'énergie 15 eV par un atome d'hydrogène.

Solution :

L'énergie E du photon est supérieure à l'énergie d'ionisation puisque l'énergie à l'état fondamental est $E_1 = -13,6 \text{ eV}$

L'atome est donc ionisé. Il faut 13,6 eV pour libérer l'électron qui aura une énergie cinétique : $E_C = 15 - 13,6$ soit 1,4 eV

Remarque : Dans le cas d'un atome à plusieurs électrons, l'**énergie de première ionisation** correspond à l'énergie qu'il faut fournir à l'atome pour lui arracher l'électron le moins lié.

3) Le laser :

3.1 Définition et caractéristiques :

Le mot « **LASER** » est l'acronyme de l'anglais **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** (« amplification de la lumière par émission stimulée de radiations »).



Figure 31. Un pointeur laser

Contrairement aux lumières émises par les différentes sources habituelles (soleil, lampe...) une lumière laser a l'avantage d'être:

- Monochromatique (Constituée d'une seule radiation)
- Unidirectionnelle (se propage dans une seule direction)
- Cohérente (Toutes les ondes de lumière sont en phases)

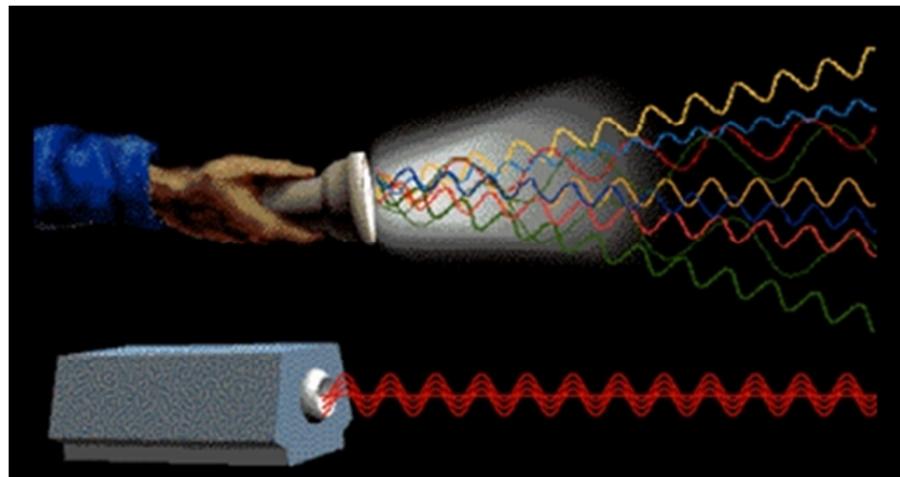


Figure 32. Propriétés d'une lumière laser

3.2 Principe du laser : l'émission stimulée

Lorsqu'un atome absorbe un photon d'énergie $h\nu$ nous avons vu qu'il passe de l'état fondamental E_1 à un état excité E_2 (Figure 33.a). De même lorsqu'un atome excité passe spontanément de l'état d'énergie à l'état fondamental , il ya émission d'un photon $h\nu$ tel que : $E_2 - E_1 = h\nu$ (Figure 33.b).

Einstein a prévue dès 1917 le phénomène d'émission stimulée : un photon d'énergie $h\nu$ interagissant avec un atome excité peut induire l'émission d'un deuxième photon aux propriétés très particulières (Figure 33.c). La lumière émise a en effet même fréquence, même phase, même direction de propagation et même polarisation que la lumière incidente.

Le rayonnement issu d'un grand nombre de ces processus d'émission est un rayon laser

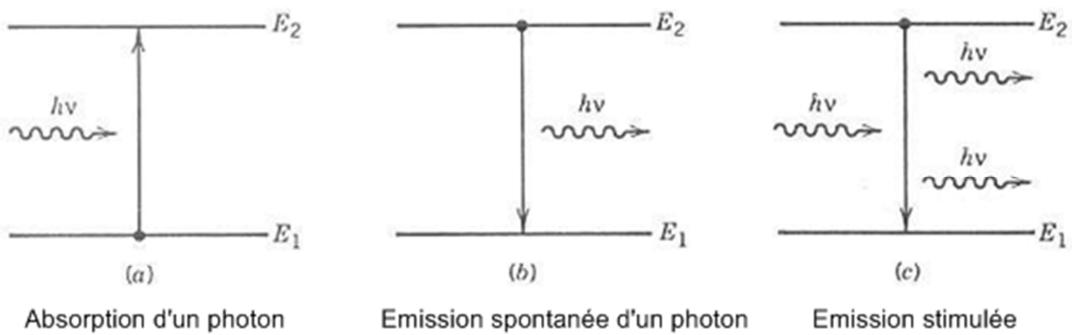


Figure 33. Principe de l'émission stimulée

Pour émettre un rayon laser, il faut donc disposer d'une collection d'atomes se trouvant dans un état excité E_2 : C'est le but du « pompage optique » qui provoque l'inversion de populations, réalisée lorsque le nombre d'atomes se trouvant dans l'état excité est supérieur au nombre d'atomes dans l'état fondamental.

Il faut pour cela fournir l'énergie par un dispositif annexe, par exemple à l'aide d'une décharge électrique provoquée dans le milieu ou d'un autre laser.

Lorsque l'inversion de population a été réalisée, certains atomes excités reviennent à l'état fondamental en émettant des photons $h\nu$ susceptible de provoquer l'émission stimulée d'autres atomes excités : l'émission laser démarre

3.3 Les applications du laser :

Le laser est un outil précieux dans l'industrie, la géodésie, la recherche scientifique, les télécommunications, la médecine, la technologie militaire…

- Les rayons laser permettent de focaliser une forte puissance rayonnante sur une petite surface. Ils sont ainsi utilisés pour chauffer, fusionner ou vaporiser la matière. On les emploie ainsi dans l'industrie pour percer les matières les plus dures, comme le diamant, polir les composants microélectroniques, traiter à chaud les puces à semi-conducteurs, ou encore élaborer de nouvelles matières synthétiques.
- La faible dispersion spatiale des rayons laser et leur grande précision temporelle permettent de les utiliser pour mesurer des distances, à la manière des ondes radar. Par exemple si on émet un rayon laser depuis la Terre en direction de la lune, le temps du trajet aller-retour du rayon laser permet de mesurer cette distance au centimètre près.
- En raison de leur précision directionnelle, les rayons laser servent à couper et à cautériser les tissus organiques, sans endommager les tissus sains environnants (chirurgie laser). Ils sont utilisés notamment dans les opérations de décollement de la rétine, pour ressouder les tissus, ainsi que pour cautériser les vaisseaux sanguins et vaporiser les lésions. Le laser est également utilisé en laboratoire dans les analyses d'échantillons biochimiques.
- Le laser est aussi un outil précieux pour véhiculer l'information. En raison de sa fréquence élevée, le rayonnement laser est capable de véhiculer 1 000 fois plus de canaux de télévision que les ondes micrométriques et est préconisé pour les futures générations de satellites de télécommunications.

Au sol, les fibres optiques véhiculent également des signaux laser porteurs d'une riche densité d'informations (chaînes de radio et de télévision, données informatiques) sur des réseaux en pleine expansion.

- Enfin, le succès du laser est aussi dû à ses applications spectaculaires dans les arts scéniques : ballets et arabesques de pinceaux lumineux dans le ciel, éclairages de concerts et spectacles son et lumière ont propulsé la technique laser aux avant-postes de l'art contemporain. Notons également que l'on utilise parfois les rayons laser pour nettoyer la façade de certains monuments historiques.

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Convenablement excité (sous forme thermique ou électrique) les atomes d'un gaz à basse pression émettent une lumière dont le spectre est constitué de raies alternées brillantes. C'est le spectre d'émission.
- Lorsqu'on lumière blanche passe à travers un gaz monoatomique à basse pression, certaines des radiations de la lumière incidente seront absorbées par les atomes du gaz. Des raies noires figurent sur le spectre de la lumière sortante: c'est le spectre d'absorption.
- La configuration d'une suite de raies est spécifique à un élément chimique donné ; elle constitue sa « signature » spectrale
- Les atomes d'un élément chimique donné absorbent uniquement les radiations qu'ils sont capables d'émettre
- Les postulats de Bohr :

- L'énergie d'un atome ne peut prendre qu'un certain nombre de valeurs discontinues croissantes : $E_1, E_2, \dots E_m, E_n\dots$ bien définis appelés niveaux d'énergie : L'énergie est quantifiée.
- L'émission d'un photon d'énergie $h.\nu_{nm}$ correspond au passage de l'atome d'un niveau d'énergie E_n à un niveau d'énergie inférieur E_m tel que :

$$E_n - E_m = h.\nu_{nm}$$

- L'absorption d'un photon d'énergie $h.\nu_{nm}$ correspond au passage de l'atome d'un niveau d'énergie E_m à un niveau d'énergie supérieur E_n tel que :

$$E_n - E_m = h.\nu_{nm}$$

- Le niveau d'énergie de plus faible énergie de l'atome est appelé état fondamental, c'est l'état le plus stable, les autres niveaux d'énergie sont les états excités.
- L'énergie E_n du $n^{\text{ième}}$ niveau d'énergie de l'atome d'hydrogène est donné en electron-volt par : $E_n = -\frac{13,6}{n^2}$
- On appelle énergie d'ionisation l'énergie qu'il faut fournir à l'atome pour lui enlever son électron. Cette énergie d'ionisation est égale à $-E_1$ où E_1 est l'énergie à l'état fondamental.
- Le fonctionnement du LASER repose sur le principe de l'émission stimulée. Une lumière laser est une lumière monochromatique, unidirectionnelle et cohérente, elle est utilisée en industrie, en télécommunication, en médecine, ...

EXERCICES

Exercice 1 :

- 1) Définir le spectre d'émission et le spectre d'absorption d'un atome.
- 2) Enoncer les postulats de Bohr
- 3) Interpréter la formation des spectres de raies.

Exercice 2 :

- 1) Quels sont les particularités de la lumière émise par un laser ?
- 2) Expliquer brièvement le principe de fonctionnement d'un laser.
- 3) Citer quelques applications importantes des lasers.

Exercice 3 :

Quelle est l'énergie du photon émis par l'atome d'hydrogène quand celui-ci passe de l'état $n=3$ à $n=1$? Quelle est la longueur d'onde de ce photon ? La lumière correspondante est-elle visible ?

Exercice 4 :

Les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène vérifient la relation : $E_n = -\frac{13,6}{n^2}$

n étant un nombre entier supérieur ou égale à 1. L'origine des énergies ($E=0$) correspond à l'énergie de première ionisation.

- 1) Indiquer ce que l'on entend par état fondamental d'un atome
- 2) Quelle est l'énergie du niveau fondamental de l'hydrogène ?
- 3) Quelle énergie faut-il fournir à l'atome d'hydrogène pour provoquer son ionisation ?
- 4) Donner l'expression littérale de la variation d'énergie d'un atome d'un atome d'hydrogène qui passe d'un niveau excité $n>1$ au niveau $n=1$. Une telle transition correspond-elle à l'émission ou bien à l'absorption d'un photon ? Justifier la réponse.

-
- 5) Calculer la fréquence et la longueur d'onde de l'onde associée au photon pour une transition du niveau $n=2$ au niveau $n=1$.

On donne :

- o Constante de Planck : $h = 6,62 \cdot 10^{-34} J.s$
- o Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3 \cdot 10^8 m.s^{-1}$
- o Charge élémentaire : $e = 1,60 \cdot 10^{-19} C$

Exercice 5 :

- 1) Calculer l'énergie des cinq premiers niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène.
- 2) Représenter sous forme de diagramme ces cinq premiers niveaux d'énergie ainsi que le niveau correspondant à l'atome ionisé ($n \rightarrow \infty$)
- 3)
 - a) Calculer en électronvolt et en joule les énergies des photons émis par l'hydrogène lors des transitions suivantes :
 - Niveau 2 → niveau 1
 - Niveau 3 → niveau 2
 - Niveau 4 → niveau 3
 - b) Déterminer les longueurs d'onde des radiations correspondantes. A quelles parties du spectre électromagnétiques appartiennent-elles ?
(Les longueurs d'ondes des radiations visibles sont comprises entre $0,4\mu m$ et $0,8\mu m$)

On donne :

- o Constante de Planck : $h = 6,62 \cdot 10^{-34} J.s$
- o Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3 \cdot 10^8 m.s^{-1}$
- o Charge élémentaire : $e = 1,60 \cdot 10^{-19} C$

Exercice 4 :

Dans le spectre d'émission de l'atome on trouve les trois raies suivantes caractérisées par leurs longueurs d'onde

λ en nm ($10^{-9}m$)	λ_1 434,1	λ_2 486,1	λ_3 656,3

Le diagramme des niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène, simplifié, est donné ci-dessous.

- o Constante de Planck : $h = 6,62 \cdot 10^{-34} J.s$

- o Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3 \cdot 10^8 m.s^{-1}$

- o Charge élémentaire : $e = 1,60 \cdot 10^{-19} C$

1)

- a) Justifier la discontinuité du spectre d'émission

- b) A partir du diagramme, illustrer les termes :

- Etat fondamental
- Etat excité
- Energie d'ionisation

2)

- a) Exprimer la relation entre l'énergie d'un photon et la longueur d'onde associée

- b) Calculer, en eV, les énergies d'un photon de longueurs d'onde λ_1 , λ_2 et λ_3

- c) Montrer que ces trois raies étudiées correspondent à des transitions qui ramènent l'atome d'hydrogène au même niveau $n=2$

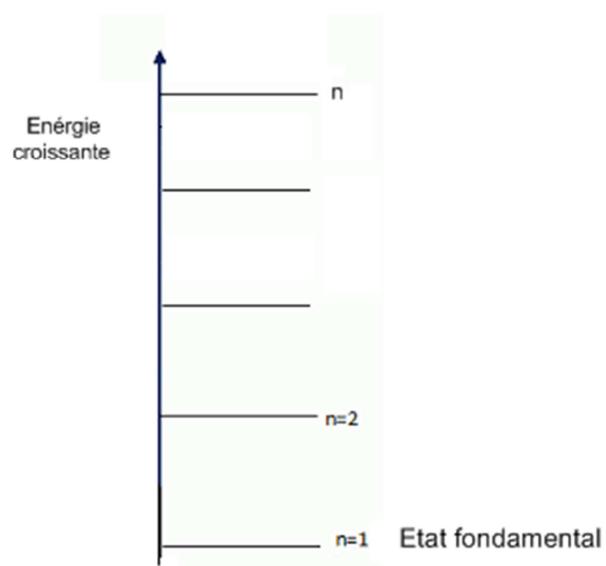


Figure 34. Diagramme d'énergie de l'atome d'hydrogène

L'évaluation

Nous partons de l'idée que les résultats scolaires ne sont pas imputables uniquement aux élèves mais bien souvent à l'enseignement dispensé, aux méthodes didactiques, aux conditions de travail, ou encore aux choix des objectifs pédagogiques. Alors, l'évaluation qu'on a fait s'est surtout portée sur les objectifs pédagogiques fixés dans le cours. On s'est demandé si aux yeux des évaluateurs, les objectifs valent la peine d'être poursuivis, si le contenu du cours dispensé est réellement conforme aux objectifs didactiquement souhaitables, et si ces objectifs sont atteints. On a donc pour cela soumis les différents éléments de ce cours à l'appréciation d'un certains nombres d'experts, notamment des professeurs certifiés en sciences physique dans différents lycées, accompagné d'une grille d'évaluation qu'ils ont du remplir. Trois grilles ont été remplis, et nous les présentons ici tour à tour. Rappelons d'abord les objectifs pédagogiques que nous avons fixés :

- **Objectif 1** : Définir une onde électromagnétique et donner ses propriétés, associer une onde électromagnétique de fréquence ou de longueur d'onde donnée à un domaine de longueurs d'onde du spectre électromagnétique.
- **Objectif 2** : Définir la nature corpusculaire de la lumière. Utiliser la relation $E = h\nu$, préciser la signification de chaque terme et leurs unités. Evaluer le nombre de photons émis par une source lumineuse ou reçus par un détecteur.
- **Objectif 3** : Enoncer et appliquer les hypothèses de De Broglie : $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m.v}$
identifier les situations où le caractère ondulatoire de la matière est significatif.
- **Objectif 4** : Enoncer et appliquer les postulats de Bohr
- **Objectif 5** : Calculer les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène.
- **Objectif 6** : Définir les différents types de spectres et les interpréter.
- **Objectif 7** : Expliquer le principe de l'émission stimulée, donner les propriétés du laser

GRILLE 1

En tant qu'évaluateur, vous êtes invités à mettre dans la dernière colonne du tableau ci-dessous les notes qui correspondent au mieux à votre jugement.

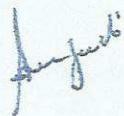
Appréciation	Excellent	Très bien	Bien	Passable	Insuffisant	
Importance de l'objectif 1	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	16 / 20
Dans le cours, l'objectif 1 est-il atteint ?	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	15 / 20
Importance de l'objectif 2	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	15 / 20
Dans le cours, l'objectif 2 est-il atteint ?	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	15 / 20
Importance de l'objectif 3	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	15 / 20
Dans le cours, l'objectif 3 est-il atteint ?	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	15 / 20
Importance de l'objectif 4	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	15 / 20
Dans le cours, l'objectif 4 est-il atteint ?	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	16 / 20
Importance de l'objectif 5	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	16 / 20
Dans le cours, l'objectif 5 est-il atteint ?	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	15 / 20
Importance de l'objectif 6	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	15 / 20
Dans le cours, l'objectif 6 est-il atteint ?	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	15 / 20
Importance de l'objectif 7	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	15 / 20
Dans le cours, l'objectif 7 est-il atteint ?	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	17 / 20
Adéquation entre le temps imparti et le contenu à enseigner du chapitre 1	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	6 / 10
Adéquation entre le temps imparti et le contenu à enseigner du chapitre 2	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	7 / 10
Adéquation entre le temps imparti et le contenu à enseigner du chapitre 3	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	7 / 10
Qualité de la démarche pédagogique adoptée dans le chapitre 1	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	7 / 10
Qualité de la démarche pédagogique adoptée dans le chapitre 2	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	7 / 10
Qualité de la démarche pédagogique adoptée dans le chapitre 3	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	7 / 10
Pertinence des exemples et illustrations Dans le chapitre 1	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	6 / 10
Pertinence des exemples et illustrations dans le chapitre 2	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	6 / 10
Pertinence des exemples et illustrations dans le chapitre 3	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	7 / 10
Pertinence des exercices proposés dans le chapitre 1	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	7 / 10
Pertinence des exercices proposés dans le chapitre 2		8 à 7	6	5	5 à 0	7 / 10
Pertinence des exercices proposés dans le chapitre 3	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	7 / 10
					Total	278 / 400 soit 69,5%

Commentaire sur le travail :

L'évaluateur : Monsieur ANDRAHANANIRÉDA Aujuste

Professeur certifié en sciences physiques au lycée... Maderia... Ambohibao

Signature de l'évaluateur



GRILLE 2

En tant qu'évaluateur, vous êtes invités à mettre dans la dernière colonne du tableau ci-dessous les notes qui correspondent au mieux à votre jugement.

Appréciation	Excellent	Très bien	Bien	Passable	Insuffisant	
Importance de l'objectif 1	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	14 /20
Dans le cours, l'objectif 1 est-il atteint ?	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	15 /20
Importance de l'objectif 2	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	15 /20
Dans le cours, l'objectif 2 est-il atteint ?	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	13 /20
Importance de l'objectif 3	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	16 /20
Dans le cours, l'objectif 3 est-il atteint ?	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	14 /20
Importance de l'objectif 4	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	17 /20
Dans le cours, l'objectif 4 est-il atteint ?	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	14 /20
Importance de l'objectif 5	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	16 /20
Dans le cours, l'objectif 5 est-il atteint ?	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	14 /20
Importance de l'objectif 6	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	17 /20
Dans le cours, l'objectif 6 est-il atteint ?	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	15 /20
Importance de l'objectif 7	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	17 /20
Dans le cours, l'objectif 7 est-il atteint ?	20 à 18	17 à 15	14 à 13	12 à 10	9 à 0	14 /20
Adéquation entre le temps imparti et le contenu à enseigner du chapitre 1	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	7 /10
Adéquation entre le temps imparti et le contenu à enseigner du chapitre 2	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	4 /10
Adéquation entre le temps imparti et le contenu à enseigner du chapitre 3	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	5 /10
Qualité de la démarche pédagogique adoptée dans le chapitre 1	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	7 /10
Qualité de la démarche pédagogique adoptée dans le chapitre 2	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	5 /10
Qualité de la démarche pédagogique adoptée dans le chapitre 3	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	6 /10
Pertinence des exemples et illustrations dans le chapitre 1	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	4 /10
Pertinence des exemples et illustrations dans le chapitre 2	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	6 /10
Pertinence des exemples et illustrations dans le chapitre 3	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	8 /10
Pertinence des exercices proposés dans le chapitre 1	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	4 /10
Pertinence des exercices proposés dans le chapitre 2		8 à 7	6	5	5 à 0	5 /10
Pertinence des exercices proposés dans le chapitre 3	10 à 9	8 à 7	6	5	5 à 0	8 /10
					Total	280/400 soit 70 %

Commentaire sur le travail :

L'évaluateur : RAKOTOARISOA Enile Clément

Professeur certifié en sciences physiques au lycée Jules Ferry FARAVOHITRA

Signature de l'évaluateur

gk

GRILLE 3

En tant qu'évaluateur, vous êtes invités à mettre dans la dernière colonne du tableau ci-dessous les notes qui correspondent au mieux à votre jugement.

Appréciation	Excellent	Très bien	Bien	Passable	Insuffisant	
<i>Importance de l'objectif 1</i>	<i>20 à 18</i>	<i>17 à 15</i>	<i>14 à 13</i>	<i>12 à 10</i>	<i>9 à 0</i>	<i>15/20</i>
<i>Dans le cours, l'objectif 1 est-il atteint ?</i>	<i>20 à 18</i>	<i>17 à 15</i>	<i>14 à 13</i>	<i>12 à 10</i>	<i>9 à 0</i>	<i>14/20</i>
<i>Importance de l'objectif 2</i>	<i>20 à 18</i>	<i>17 à 15</i>	<i>14 à 13</i>	<i>12 à 10</i>	<i>9 à 0</i>	<i>12/20</i>
<i>Dans le cours, l'objectif 2 est-il atteint ?</i>	<i>20 à 18</i>	<i>17 à 15</i>	<i>14 à 13</i>	<i>12 à 10</i>	<i>9 à 0</i>	<i>15/20</i>
<i>Importance de l'objectif 3</i>	<i>20 à 18</i>	<i>17 à 15</i>	<i>14 à 13</i>	<i>12 à 10</i>	<i>9 à 0</i>	<i>12/20</i>
<i>Dans le cours, l'objectif 3 est-il atteint ?</i>	<i>20 à 18</i>	<i>17 à 15</i>	<i>14 à 13</i>	<i>12 à 10</i>	<i>9 à 0</i>	<i>11/20</i>
<i>Importance de l'objectif 4</i>	<i>20 à 18</i>	<i>17 à 15</i>	<i>14 à 13</i>	<i>12 à 10</i>	<i>9 à 0</i>	<i>12/20</i>
<i>Dans le cours, l'objectif 4 est-il atteint ?</i>	<i>20 à 18</i>	<i>17 à 15</i>	<i>14 à 13</i>	<i>12 à 10</i>	<i>9 à 0</i>	<i>11/20</i>
<i>Importance de l'objectif 5</i>	<i>20 à 18</i>	<i>17 à 15</i>	<i>14 à 13</i>	<i>12 à 10</i>	<i>9 à 0</i>	<i>14/20</i>
<i>Dans le cours, l'objectif 5 est-il atteint ?</i>	<i>20 à 18</i>	<i>17 à 15</i>	<i>14 à 13</i>	<i>12 à 10</i>	<i>9 à 0</i>	<i>14/20</i>
<i>Importance de l'objectif 6</i>	<i>20 à 18</i>	<i>17 à 15</i>	<i>14 à 13</i>	<i>12 à 10</i>	<i>9 à 0</i>	<i>14/20</i>
<i>Dans le cours, l'objectif 6 est-il atteint ?</i>	<i>20 à 18</i>	<i>17 à 15</i>	<i>14 à 13</i>	<i>12 à 10</i>	<i>9 à 0</i>	<i>15/20</i>
<i>Importance de l'objectif 7</i>	<i>20 à 18</i>	<i>17 à 15</i>	<i>14 à 13</i>	<i>12 à 10</i>	<i>9 à 0</i>	<i>14/20</i>
<i>Dans le cours, l'objectif 7 est-il atteint ?</i>	<i>20 à 18</i>	<i>17 à 15</i>	<i>14 à 13</i>	<i>12 à 10</i>	<i>9 à 0</i>	<i>9/20</i>
<i>Adéquation entre le temps imparti et le contenu à enseigner du chapitre 1</i>	<i>10 à 9</i>	<i>8 à 7</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>5 à 0</i>	<i>6/10</i>
<i>Adéquation entre le temps imparti et le contenu à enseigner du chapitre 2</i>	<i>10 à 9</i>	<i>8 à 7</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>5 à 0</i>	<i>8/10</i>
<i>Adéquation entre le temps imparti et le contenu à enseigner du chapitre 3</i>	<i>10 à 9</i>	<i>8 à 7</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>5 à 0</i>	<i>5/10</i>
<i>Qualité de la démarche pédagogique adoptée dans le chapitre 1</i>	<i>10 à 9</i>	<i>8 à 7</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>5 à 0</i>	<i>8/10</i>
<i>Qualité de la démarche pédagogique adoptée dans le chapitre 2</i>	<i>10 à 9</i>	<i>8 à 7</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>5 à 0</i>	<i>5/10</i>
<i>Qualité de la démarche pédagogique adoptée dans le chapitre 3</i>	<i>10 à 9</i>	<i>8 à 7</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>5 à 0</i>	<i>5/10</i>
<i>Pertinence des exemples et illustrations dans le chapitre 1</i>	<i>10 à 9</i>	<i>8 à 7</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>5 à 0</i>	<i>6/10</i>
<i>Pertinence des exemples et illustrations dans le chapitre 2</i>	<i>10 à 9</i>	<i>8 à 7</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>5 à 0</i>	<i>5/10</i>
<i>Pertinence des exemples et illustrations dans le chapitre 3</i>	<i>10 à 9</i>	<i>8 à 7</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>5 à 0</i>	<i>5/10</i>
<i>Pertinence des exercices proposés dans le chapitre 1</i>	<i>10 à 9</i>	<i>8 à 7</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>5 à 0</i>	<i>5/10</i>
<i>Pertinence des exercices proposés dans le chapitre 2</i>		<i>8 à 7</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>5 à 0</i>	<i>6/10</i>
<i>Pertinence des exercices proposés dans le chapitre 3</i>	<i>10 à 9</i>	<i>8 à 7</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>5 à 0</i>	<i>6/10</i>
					<i>Total</i>	<i>248/400</i> <i>soit 62 %</i>

Commentaire sur le travail :

des classes de Terminale S sont des classes scientifiques.
Alors, les expériences sont importantes : donc dans le cas où on ne peut pas faire des expériences, donne des résultats de l'expérience pour qu'on puisse interpréter ... Les relations ne sont pas parachutées, elles sont à démontrer.

L'évaluateur : Réalisation François

Professeur certifié en sciences physiques au lycée d'Antibes

Signature de l'évaluateur

D'après ces résultats, le taux moyens de réussite est de **67,16 pour cent**. Ce qui est déjà acceptable. Des modifications ultérieures peuvent y être apportées pour obtenir un meilleur résultat. Il est temps maintenant de reformuler de façon plus précise les objectifs pédagogiques et présenter dans les normes le nouveau programme de physique atomique et nucléaire en classe terminale de la série scientifique à Madagascar.

Le nouveau programme de physique atomique et nucléaire de la classe terminale de la série scientifique Madagascar

PHYSIQUE ATOMIQUE ET NUCLEAIRE

Durée : 19 heures

Objectifs généraux: L'élève doit être capable de (d'):

- o Définir la nature corpusculaire de la lumière : le photon
- o Enoncer et appliquer les hypothèses de de Broglie : $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m.v}$
- o Enoncer et appliquer les postulats de Bohr
- o Calculer les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène : $E_n = -\frac{13,6}{n^2}$
- o Expliquer le principe de l'émission stimulée
- o Ecrire les équations bilans des réactions nucléaires.
- o Enumérer des applications pratiques de l'énergie nucléaire;

Objectifs spécifiques	Contenus	Observations
<p>L'élève doit être capable de (d') :</p> <p>Définir une onde électromagnétique</p> <p>Donner les propriétés d'une onde électromagnétique</p> <p>Citer les différents types d'ondes électromagnétiques (Rayon gamma, rayon UV, ...)</p> <p>Associer une radiation électromagnétique de fréquence ou de longueurs d'onde donnée à un domaine de longueurs d'onde du spectre électromagnétique</p>	<p>Les ondes électromagnétiques</p>	<p>Durée : 2 Heures</p> <p>On rappellera les définitions de la fréquence, de la longueur d'onde, de la période ainsi que la relation</p> $\lambda = \frac{c}{\nu}$ <p>Il est important de noter qu'à la différence des autres types d'onde, les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide à la vitesse de la lumière c</p> <p>On admettra la nature électromagnétique de la lumière et on donnera le domaine de longueur d'onde de la lumière visible</p>
<p>Définir la nature corpusculaire de la lumière : les photons</p> <p>Utiliser la relation : $E = h\nu$</p> <p>Préciser la signification de chaque terme et leurs unités respectives</p>	<p>La dualité onde-corpuscule</p> <p>La théorie des photons</p>	<p>Durée : 5 heures</p> <p>On introduira la théorie des photons par l'incapacité de la théorie ondulatoire à expliquer certains phénomènes physiques tels que l'effet photoélectrique</p> <p>On définira la puissance lumineuse exprimée en Watt par :</p> $P = \frac{N.h\nu}{\Delta t}$ <p>N : Nombre de photons</p> <p>Δt : temps</p>

<p>Définir dans le cadre de la théorie corpusculaire la puissance et l'intensité d'une lumière monochromatique</p> <p>Calculer le nombre de photons émis par une source ou reçu par un détecteur</p> <p>Enoncer et appliquer les hypothèses de Broglie :</p> $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ <p>Reconnaitre les situations où le caractère ondulatoire de la lumière est significatif</p>	<p>Les ondes de Broglie</p>	<p>On définira l'intensité lumineuse par :</p> $I = \frac{N.h\nu}{S.\Delta t}$ <p>S : Surface (m²)</p> <p>On peut raisonner à partir du fait d'expérience que si une onde lumineuse a parfois les propriétés d'une particule (le photon) ce que peut être certains objets matériels tels que les électrons peuvent se comporter comme des ondes.</p> <p>On fera remarquer qu'au regard de la valeur de la constante de Planck qui conditionne la longueur d'onde de Broglie, le caractère ondulatoire de la matière ne peut se manifester pour les objets macroscopiques</p> <p>Avec les acquis des élèves en classe de première sur les ondes, des exercices sur les interférences avec les électrons ou autre particules élémentaires peuvent avoir lieu.</p>
--	------------------------------------	--

<p>Enoncer et appliquer les postulats de Bohr</p> <p>Calculer la fréquence de la radiation émise ou absorbée par un atome de niveau d'énergie connue lors d'une transition atomique donnée et associer cette radiation à un domaine de longueurs d'ondes du spectre électromagnétique</p> <p>Calculer les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène</p> <p>Définir les termes suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Etat fondamental • Etat excité • Energie d'ionisation 	<p>Quantification de l'énergie</p> <p>Les postulats de Bohr</p>	<p>Durée : 5 Heures</p> <p>Il est important de bien spécifier la signification du mot « quantifié »</p> <p>On admettra les postulats de Bohr :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'énergie de l'atome est quantifiée • L'émission d'un photon d'énergie $h\nu$ correspond au passage de l'atome du niveau d'énergie E_2 au niveau d'énergie E_1 ($E_2 > E_1$) tel que : $E_2 - E_1 = h\nu$ <ul style="list-style-type: none"> • L'absorption d'un photon d'énergie $h\nu$ correspond au passage de l'atome d'un niveau d'énergie E_1 à n niveau d'énergie E_2 tel que : $E_2 - E_1 = h\nu$ <p>On admettra que l'énergie E_n du n^e niveau de l'atome d'hydrogène est donné en electronvolt par :</p> $E_n = -\frac{13,6}{n^2}$ <p>Ne pas oublier de donner l'équivalence de l'électronvolt en joules</p>
---	--	--

	<p>Expliquer le principe de l'émission stimulée</p> <p>Donner les propriétés du laser (directivité, monochromatique…)</p> <p>Définir les termes suivants : Eléments, nucléides, isotopes</p> <p>Donner la charge et la masse des nucléons</p> <p>Donner l'ordre de grandeur de la dimension des noyaux</p> <p>Appliquer la relation d'Einstein au défaut de masse</p>	<p>Le laser</p> <p>Le noyau atomique</p> <p>Durée : 2 heures</p> <p>On habituera les élèves à représenter les niveaux d'énergie de l'atome sous la forme d'un diagramme</p> <p>On n'oubliera pas de citer quelques applications importantes du laser</p> <p>On définira les termes suivants : éléments, nucléides, isotopes et on donnera les propriétés des nucléons et du noyau atomique</p> <p>On fera admettre la relation d'Einstein : $E = m.c^2$</p> <p>On définira le défaut de masse Δm à partir de la non conservation de la masse si l'on considère d'une part les nucléons séparés et sans interactions et d'autre part les nucléons liés entre eux pour former le noyau.</p> $\Delta m = (A - Z)m_n - Z.m_p$ <p>A ce défaut de masse constaté on indiquera qu'il correspond selon la relation d'Einstein l'énergie de liaison : $E_l = \Delta m.c^2$</p>
--	---	---

Identifier les noyaux stables		<p>On donnera les conditions de stabilité des noyaux : L'énergie de liaison par nucléon des noyaux stables sont supérieures à 8 MeV</p> <p>Les noyaux stables sont ceux dont le nombre de masse est compris entre 20 et 190</p> <p>Durée : 3 Heures</p> <p>On habituera les élèves à la représentation d'une réaction nucléaire par une équation</p> <p>On insistera sur les grandes lois de conservation valable dans toutes les réactions nucléaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conservation du nombre totale de nucléons • Conservation de la charge électrique • Conservation de l'énergie et quantité de mouvement <p>Toutefois, les bilans d'énergie et de quantité de mouvement dans une désintégration radioactive ne donneront lieu à aucun exercice</p>
Définir le phénomène de radioactivité	Réactions nucléaires spontanées	

<p>Etablir la loi de décroissance radioactive</p> $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ <p>Définir la période radioactive et l'activité d'une source</p>	<p>La loi de décroissance radioactive sera établie à partir de l'équation différentielle : $-dN = \lambda N dt$ par intégration on montrera que le nombre de noyaux radioactifs diminue exponentiellement en fonction du temps :</p> $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ <p>A partir de la loi de décroissance radioactive, on déduira les notions de période radioactive et d'activité d'une source. L'unité SI d'activité est le Becquerel (Bq)</p> <p>Les applications et les dangers de la radioactivité seront cités sans aucun détail technique</p> <p>Les réactions nucléaires provoquées : Fission et fusion nucléaires</p>	<p>Durée : 2 Heures</p> <p>On illustrera le cours par l'intérêt la réaction de fission pour produire de l'électricité</p> <p>C'est l'occasion d'expliquer le principe d'une centrale nucléaire</p>
--	---	---

Définir la réaction de fission nucléaire		On définira la réaction fusion et on donnera quelques exemples
Ecrire correctement les réactions de fission nucléaire.		Comme les réactions de fusion, on insistera sur le fait que les réactions de fusion sont fortement exoénergétiques.
Définir la réaction de fusion nucléaire		
Ecrire correctement les réactions de fusion nucléaire		

CONCLUSION

La physique moderne est un domaine extrêmement vaste, et elle tend toujours à se développée un peu plus. Vu l'impact qu'elle a sur la civilisation moderne et sur notre façon de voir le monde, il est tout à fait normale qu'elle figure au premier rang des connaissances indispensables qu'il faut transmettre à nos élèves. On s'est alors fixé des objectifs pédagogiques à atteindre et élaborer un cours conforme avec ses objectifs. D'après les résultats de l'évaluation qu'on a faite, on est arrivé en à la conclusion que l'introduction de la physique moderne en classe terminale de la série scientifique est tout à fait du domaine du possible. Ceci nécessitera bien évidemment quelques réarrangements dans l'actuel programme et le nouveau programme qu'on a élaboré correspond mieux à la vision que les scientifiques ont maintenant du monde physique.

Avec la physique moderne au programme, la physique qu'on enseigne au lycée à Madagascar fera un bon en avant. Et nous espérons que ces réformes dans le programme s'étendront aussi dans les hautes institutions universitaires qui enseignent la physique à Madagascar. Une bonne éducation, qui évolue au même rythme que la marche du progrès est plus qu'essentielle pour le développement économique de Madagascar. Nous ne devrions pas avoir peur de franchir le pas vers cette nouvelle ère.

ANNEXES

Annexe 1 : L'expérience de Michelson et Morley (1887)

Un des principes de la relativité restreinte et qu'Einstein énonce en 1905 est que la vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels dits « galiléens ».

L'expérience de Michelson et Morley, décrite dans de nombreux ouvrages, a été refaite maintes et maintes fois en utilisant des dispositifs toujours plus performants et dans des conditions très variées ; avec la précision atteinte actuellement, on peut déduire que la vitesse de la lumière reste bien identique dans toutes les directions de l'espace à 0,5 mm/s près.

On supposait à l'époque que la vitesse de la lumière par rapport à un milieu hypothétique support de l'onde lumineuse, appelé « éther » était égale à c . L'objectif de l'expérience était de mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à l'éther. Pour cela on utilisa le mouvement de la Terre sur son orbite autour du soleil dont la vitesse est de l'ordre de 30 km/s, ainsi selon une vision classique de la mécanique, la vitesse de la lumière devait être plus grande soit plus petite selon la manière dont s'effectue la composition des vitesses. Les variations relatives de la vitesse étant de l'ordre de 10^{-4} , Michelson eut l'idée de recourir à une méthode optique.

Schéma de principe :

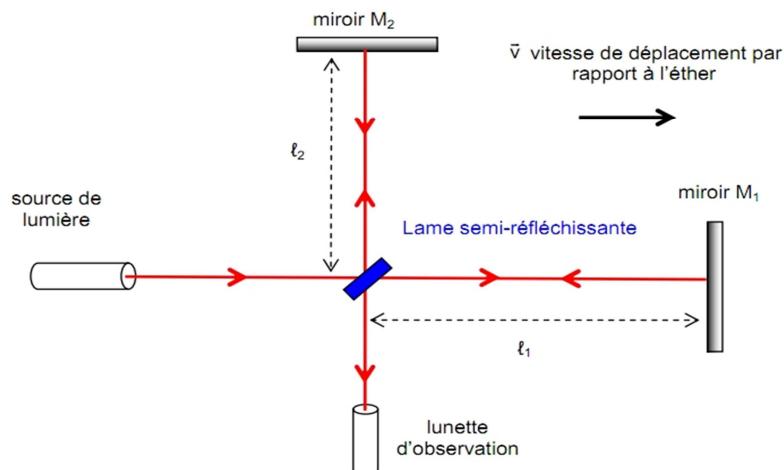


Figure 35. Principe de l'expérience de Michelson et Morley

La lumière émise par une source est partiellement transmise ou réfléchie par la lame semi-réfléchissante et peut emprunter ainsi deux chemins différents. Les deux ondes peuvent alors interférer au niveau de la lunette où l'on observe des franges d'interférence. Le dispositif placé, sur un bloc de pierre, repose sur une pièce en bois placée sur un bain de mercure. Ce dispositif dont la taille est de l'ordre du mètre permet de réduire les vibrations et de faire tourner lentement l'interféromètre autour d'un axe vertical.

Sans entrer dans le détail de calculs, si l'on note v la vitesse du laboratoire par rapport à l'éther et si on adopte la configuration décrite sur la figure ci-dessus, puis celle où l'appareil a effectué une rotation de 90^0 , ce qui permet d'échanger le rôle des deux voies de l'interféromètre, la différence Δt des différentes durées de parcours de la lumière entre le trajet utilisant M_1 et celui utilisant M_2 est donnée par l'expression :

$$\Delta t \approx \frac{v^2}{c^3} (l_1 + l_2)$$

En utilisant un repliement astucieux des rayons, la longueur des bras était de l'ordre 11 m et ainsi pour une longueur de 550 nm, on s'attendait à un déplacement de 0,4 frange, la sensibilité du dispositif permettait alors de détecter une variation de 0,01 frange.

Le résultat de l'expérience fut clairement négatif, ainsi, en prenant en compte d'autres arguments comme l'observation de l'aberration des étoiles, les physiciens ont commencé à douter sérieusement de l'existence de l'éther.

Annexe 2 : La dilatation des durées

La dilatation des durées est étroitement liée à l'invariance de la vitesse de la lumière, comme on va le voir dans l'exemple suivant. Une horloge est constituée d'un dispositif périodique. Une possibilité est d'utiliser deux miroirs parfaitement réfléchissants et un faisceau de lumière faisant l'aller retour entre les miroirs (Figure 36, partie de gauche). La durée d'un aller retour $\Delta t = \frac{2d}{c}$ fournit la base du temps.

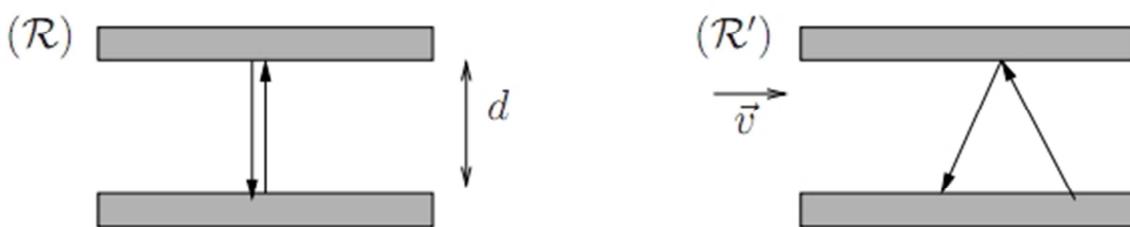


Figure 36. Horloge de lumière dans deux référentiels (R) et (R')

On considère ensuite la même situation dans un référentiel (R') en mouvement à la vitesse \vec{v} par rapport au référentiel (R) de l'horloge. Cette fois ci, le faisceau de lumière parcourt une distance plus importante (sa nouvelle trajectoire est en zig-zag dans (R'), Figure 36, partie de droite) On note $\Delta t'$ la durée d'un aller retour dans (R'). La distance parcourue par le faisceau de lumière pendant cette durée peut s'estimer en appliquant le théorème de Pythagore :

$$\left(\frac{c.\Delta t'}{2}\right)^2 = d^2 + \left(\frac{v.\Delta t'}{2}\right)^2 \text{ Ou } \frac{c^2 \Delta t'^2}{4} = d^2 + \frac{v^2 \Delta t'^2}{4}$$

$$\Delta t'^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \frac{4d^2}{c^2} = \left(\frac{2d}{c}\right)^2 \text{ Équivaut à : } \Delta t'^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \Delta t^2$$

$$\text{D'où : } \Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Puisque : $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$, donc $\Delta t' < \Delta t$, dans (R) la durée du phénomène est plus grande que dans (R')

BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE

- [1] R.GAUTREAU. (1986) *Physique Moderne*. Paris : Shaum
- [2] A.DEGURSE. (1983) *Physique terminale D*. Paris : Hatier
- [3] M.BERTIN. (1986) *Optique et physique ondulatoire*. Paris : Bordas
- [4] Microsoft encarta 2008-Etude
- [5] Encyclopédie Universalis 2011
- [5] http://sfp.in2p3.fr/Debat/debat_energie/E2PHY/balian.pdf
- [6] <http://www.supraconductivite.fr>
- [7] <http://www.unige.ch/sciences/physique/conferences/poster18october.pdf>
- [8] http://www.rosencher.com/Conferences/Transistor_Quantique.pdf
- [9] <http://www.lebardessciences.com/2010/02/lhorloge-la-plus-precise-du-monde/>
- [10] <http://www.techno-science.net/?onglet=news&news=11079>
- [11] <http://www.lemonde.fr/revision-du-bac/annales-bac/physique-terminale-s/index.html>
- [12] http://www-lpl.univ-paris13.fr:8090/Documents/Cours%20Laser_complet.pdf
- [13] <http://www.lkb.ens.fr/Promenade-dans-le-monde-quantique>
- [14] <http://www.astrosurf.com/luxorion/ordinateur-quantique3.htm>
- [15] <http://www.ici-asie.com/articles/le-train-a-sustentation-magnetique.php>
- [16] http://www.leuromag.com/La-chirurgie-des-yeux-au-laser-continue-d-evoluer-en-France_a1257.html
- [17] http://amp2005.blog.lemonde.fr/2005/10/19/2005_10__ondes_dans_not/
- [18] http://www.cea.fr/video/dossiers/le_laser_megajoule
- [19] http://www.futura-sciences.com/fr/question-reponse/t/matiere-5/d/mechanique-quantique-a-quoi-sert-elle_1604/

-
- [20] <http://www.linternaute.com/science/technologie/comment/06/lecteur-cd/lecteur-cd.shtml>
- [21] <http://www.commentcamarche.net/contents/pc/cdrom.php3>
- [22] http://www.sciencetech.technomuses.ca/francais/whatson/sudbury_neutrino_observatory_p
art03_f.cfm
- [23] http://fr.wikipedia.org/wiki/Microscope_%C3%A0_effet_tunnel
- [24] <http://www.maths-et-physique.net/article-3113016.html>
- [25] <http://www.les-ernest.fr/raimond>
- [26] <http://www.discip.ac-caen.fr/phch/culture/conference/CONF.HTM>
- [27] <http://www.unit.eu/ori-oai-search/notice/view/unit-ori-wf-1-3501>
- [28] <http://www.doctissimo.fr/html/sante/imagerie/irm.htm>
- [29] <http://www.astrosurf.com/luxorion/relativite-restreinte-ex4.htm>
- [30] <http://www.ac-nice.fr/clea/lunap/html/Relativite/RelatRestApprof2.html>

Titre : «INTRODUCTION DE LA PHYSIQUE MODERNE EN CLASSE TERMINALE DE LA SERIE SCIENTIFIQUE »

Nombre de pages : 91

Nombre de figures : 36

Nombre de tableaux : 6

Nombre d'annexes : 2

RESUME

Ce mémoire intitulé « Introduction à la physique moderne en classe terminale de la série scientifique » témoigne de la nécessité d'introduire la physique moderne au programme d'enseignement de la physique au lycée à Madagascar, notamment en classe terminale de la série scientifique. Y figurent une brève histoire de la physique moderne depuis sa naissance, les diverses applications de la physique moderne dans le domaine de la technologie, technologie qui nous entourent au quotidien, le contenu du cours conforme aux objectifs fixés, le compte rendu de l'évaluation de ce cours, et le nouveau programme de physique de la classe terminale de la série scientifique.

Mots clés : Physique moderne, théorie de la relativité, mécanique quantique, terminale S

Auteur : RAKOTONDRAZOA Kendrimalala

Rapporteur : Monsieur HERIMANDA A.RAMILISON, Maitres de conférences