Ce qui n’est pas dans le programme du lycée de physique-chimie

Ce qui n’est pas dans le programme du lycée de physique-chimie

Notions fondamentales

Préface

Le programme du lycée en section S[1] en France, concernant les deux matières physique et chimie, confondues en une seule discipline « physique-chimie », est parfois un cauchemar pour ces élèves qui essayent de *comprendre* ce qui y est raconté. Ce programme fort ambitieux à première vue touche effectivement à une si grande multitude d'aspects de la physique et de la chimie, qu'il ne permet malheureusement pas, dans le nombre d'heures de cours allouées, de pouvoir mettre les bases *conceptuelles* nécessaires à tous ces éléments. L'approche préconisée, « par manipulation et observation » et l'organisation des thèmes par application commerciale ou idéologique, n'aident pas non plus à la conceptualisation claire et structurée de la matière abordée.

Ainsi, la meilleure façon de « survivre » au cours de physique-chimie, c'est d'acquérir les bons réflexes de laborantin et de s'entraîner à reconnaître les exercices-types avec leur schémas de calcul (souvent relativement simple) pour arriver à une solution qui plaît au correcteur.

Cependant, si on veut vraiment *comprendre* le cours, il faut essayer de mettre les bases conceptuelles manquantes de façon structurée sous ce programme très chargé. C'est le but de ce texte. Il ne remplace pas le cours du lycée.

Patrick Van Esch

1 Ou de spécialité depuis la réforme Blanquer

Table des matières

Le cadre général

Dans cette introduction, nous allons essayer d'indiquer quelle est l'idée générale des domaines d'étude de la physique et de la chimie : pourquoi on en fait ? On peut avoir l'impression que ce chapitre est plein de pédanteries sans beaucoup d'intérêt. Cependant, il est judicieux de s'arrêter un peu sur ces points plutôt philosophiques car il conditionnera *l'état d'esprit* dans lequel il faudra lire le reste du texte.

La physique : c'est quoi ?

Traditionnellement, la physique est un ensemble de domaines d'étude, dont l'optique, la mécanique, l'électromagnétisme etc... qui sont historiquement associés à *l'activité de physiciens*. Il y a d'autres domaines d'étude qui n'en font pas partie, dont la chimie, la biologie, la géologie etc... Mais cela ne nous apprend pas ce qui distingue *fondamentalement* la physique de toute autre forme d'étude scientifique. Nous allons donc donner notre propre définition de la physique. **La physique est la science expérimentale qui prend comme hypothèse fondamentale que le monde observable est représenté par une structure mathématique.**

Il faut bien se rendre compte du sens profond de cela : autant on utilise des mathématiques dans d'autres domaines d'étude pour « calculer » des résultats concernant des notions non-mathématiques, autant, dans la physique, **la nature même est considérée comme étant faite de notions mathématiques**.

Quand on « compte des vaches dans le pré », on utilise des mathématiques, mais on ne considère pas que les vaches sont des structures mathématiques. Cependant, quand on parle de l’espace-temps, on considère cet « élément de la nature » comme une notion mathématique elle-même.

Comme la physique est une science expérimentale, qui adhère donc au principe de **la méthode scientifique**, elle accepte l’idée que l’observation expérimentale est juge final de toute hypothèse : *si une observation est en contradiction avec les conséquences logiques d’un jeu d’hypothèses, alors (certaines de) ces hypothèses doivent être rejetées*. Il n’y a pas de « vérités gravées dans le marbre » en physique. Tout peut être mis en doute par une observation expérimentale.

Par contre, ce qui est tout à fait particulier à la physique, et ce qu’on ne trouve dans aucune autre science expérimentale, c’est que **la physique doit aussi présenter, parmi ces hypothèses, comment une observation apparaît comme le résultat d’une expérience, dans le cadre postulé du modèle mathématique de la nature**. On n’observe pas *directement* les éléments mathématiques de la nature, mais l’observation même est un phénomène souvent complexe qui découle des éléments fondamentaux de la nature. La physique qui postule la nature mathématique de ces éléments fondamentaux, doit aussi décrire *le phénomène d’observation*. **Les objets mathématiques dont la nature est faite ne sont pas directement observables**, surtout en physique moderne, mais aussi en physique classique. Nous y reviendrons, mais « l'espace » et « le temps » sont deux structures mathématiques en physique classique qui ne sont pas observables directement. Les forces de Newton ne sont pas observables directement non plus. L'essentiel des objets mathématiques dont est faite la nature selon la mécanique classique n'est donc pas observable directement. De la même façon, un champs électrique n'est pas directement observable. Un champs magnétique non plus. On peut continuer ainsi.

Ceci met complètement en doute l'approche purement empiriste de la physique, car sans théorie de l'observation même, on ne peut quasiment rien affirmer concernant les éléments de la nature en faisant des observations. Ainsi, il faut se méfier totalement de l'observation empirique comme indicateur *direct* de « ce qui est là » en physique. L'observation sert seulement comme *vérification* d'une théorie, y compris sa théorie d'observation, dans la méthode scientifique comme appliquée à la physique, mais l'observation n'est pas une « fenêtre directe » sur la nature.

Il n'est donc pas possible de « commencer » la physique par des observations expérimentales[2] : **il faut « commencer » la physique par le coté théorique, y compris par une théorie**

2 Bien sûr, l'Homme a commencé la physique par l'observation, qui l'a inspiré à inventer des objets mathématiques qui pourraient expliquer ces observations. Mais cela lui a pris des millénaires avant de deviner un jeu cohérent d'objets mathématiques. Il y a mille et une façons d'inventer des structures suggérées par les observations qui ne mènent nulle part. Le ciel qui est une grande sphère qui tourne autour de la terre immobile et plate est sans doute la déduction la plus évidente, tenace et inutile dans l'histoire. Les structures mathématiques des théories utiles sont hautement improbables à partir des observations brutes faites sans connaissance théorique ; il y a peu d'espoir de les deviner à partir de rien, et c'est ce qui est arrivé à l'Homme pendant des millénaires.

d’observation. En suite il devient possible de faire des expériences et des observations, comprises dans le cadre de cette théorie de l’observation.

Illustrons cela avec une « observation » simple : mesurer le poids d’un petit bloc de fer avec une balance à ressort. L’expérience est simple : nous prenons un ressort détendu, et nous en attachons une extrémité à une règle graduée. Nous tenons l’ensemble à la verticale. Nous observons où arrive le bout libre du ressort. Maintenant, nous attachons le bloc de fer au bout libre du ressort. Nous constatons que le ressort se rallonge sous l’effet du poids du bloc de fer, et que le bout libre du ressort se trouve maintenant plus bas le long de la règle.

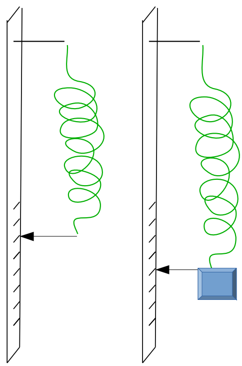

Illustration 1: L'observation de la force de gravitation sur un petit poids.

L’observation proprement dite est le constat que le ressort plus le bloc de fer sont vues de se trouver en face d’un autre endroit de la règle que le ressort sans ce bloc. Mais est-ce que cela veut dire que le ressort est devenu plus long, ou que la règle est devenue plus courte, ou que nous « voyons de travers » ? Si on pense que là, on dépasse les bornes du raisonnable, et que *évidemment*, la règle n'est pas devenue plus courte, c'est justement ce qui va nous bloquer pour comprendre la relativité restreinte, où la règle peut réellement devenir plus courte ! Donc, oui, dans le cadre postulé de la physique classique et la théorie d'observation qui va avec, la règle garde sa longueur, et le ressort devient plus long. Mais en physique moderne, il faudra mettre cela en cause !

En suite, est-ce que le déplacement du ressort est une « observation empirique » de la force de gravitation par le poids du bloc de fer ? Il y a aussi beaucoup d'hypothèses qui sont nécessaires pour aller de ce qui est observé, vers le constat d'une « force », ici, le poids du bloc. Le système « règle plus ressort » est un système physique qui fonctionne comme un appareil de mesure seulement sous un certain nombre d'hypothèses théoriques, dont, justement, l'existence de forces !

Imaginons maintenant que nous « faisons confiance » à la personne qui a construit « l'appareil de mesure de force » avec un ressort. Tout déplacement du bout du ressort est donc « l'observation empirique d'une force », n'est-ce pas ? Supposons qu'il fasse chaud, et que sous l'effet de la chaleur, le ressort et la règle ont une dilatation différente. Nous observons donc, sous l'effet de la chaleur, que le bout libre du ressort se retrouve ailleurs en face de la règle. Est-ce que cela veut dire que « la chaleur exerce une force, comme mesurée empiriquement par notre appareil de mesure » ? Non, pas du tout. Notre « appareil de mesure » ne fonctionne pas bien comme appareil de mesure de forces quand on change la température, c'est tout. Mais pour comprendre cela, il faut comprendre la théorie complète du système physique qui est notre « appareil de mesure ».

Nous constatons qu'une « observation empirique » en physique a besoin de beaucoup de notions théoriques pour transformer l'observation de base (nous voyons avec nos yeux que le ressort se trouve ailleurs en face de la règle) en « observation physique » (mesure de force). Le domaine de la physique qui s'occupe de cela, c'est **l'instrumentation**[3]. La maîtrise de l'instrumentation est nécessaire avant de pouvoir faire des observations en physique qui ont un sens, et l'instrumentation est basée sur beaucoup de physique théorique. C'est pourquoi on peut seulement commencer la physique par la théorie, et non par l'observation : **avant de pouvoir comprendre une observation, il faut maîtriser l'instrumentation de l'expérience, et il faut donc maîtriser la théorie derrière cette instrumentation**.

3 Nous élargissons la définition courante du mot « instrumentation » ici : l' instrumentation dans son usage normal, se limite à l'art et la science de construire des instruments scientifiques ; nous ajoutons ici la notion épistémologique qui ne fait normalement pas partie de la signification du mot, en considérant la théorie physique de l'observation comme part de l'art et la science de construire un instrument scientifique. Nous n'avons pas trouvé le mot français adéquat qui pourrait désigner la partie théorique de l'observation, mais elle est implicite dans les écrits de Thomas Kuhn, quand il parle de « theory-laden observation ».

Bien sûr, avec des appareils de mesure modernes, électroniques, qui affichent le résultat final de la mesure sur un écran numérique, on peut faire semblant de faire fi de l'instrumentation proprement dite. Mais alors, *on n'a pas fait une observation empirique non plus* ! On a lu des informations affichées sur un écran. On aurait pu lire un article de Wikipédia au même titre : on n'a rien observé du tout. Qu'on fasse confiance aux ingénieurs qui ont fabriqué l'appareil de mesure sans savoir sur quelles hypothèses ces ingénieurs ont basé cet appareil, ou qu'on fasse confiance aux auteurs de l'article de Wikipédia, revient, finalement, à la même chose : on se base sur beaucoup d'hypothèses théoriques, comprises, ou cachées dans l'utilisation d'un appareil d'observation.

La chimie, c'est quoi ?

La chimie est historiquement séparée de la physique. C'est **le domaine d'étude qui s'occupe des transformations de la matière** quand on la mélange, chauffe, comprime,... La chimie était une science empirique, c'est à dire, sans à priori mathématique sur la nature profonde de la matière, mais en faisant des observations directs empiriques, et éventuellement en construisant des modèles théoriques derrière, jusqu'au moment où la physique a refondé les bases de la chimie dans la première moitié du 20ième siècle. **La tâche principale de la chimie est d'établir un énorme catalogue de phénomènes chimiques connues** du genre : « quand on mélange une solution de carbonate de potassium avec une solution de chlorure de calcium, on obtient un précipité de carbonate de calcium » avec toutes les données quantitatives qui vont avec. **Les modèles théoriques, mais non mathématiques, de la chimie consistaient à postuler l'existence d'unités de matière, les « atomes » qui se ré-organisent** selon des règles empiriques, non fondamentales et non-strictes, mais qui aidaient à mettre un peu d'ordre parmi le catalogue gigantesque d'observations de phénomènes chimiques qu'on avait établi et qu'on continuait à agrandir. **La physique a envahi la chimie en étudiant la structure fondamentale des atomes** avec ses hypothèses, cette fois, strictes et mathématiques. Ainsi, l'état de la chimie est maintenant un mélange de physique « stricte » concernant le comportement mathématique des atomes, d'un coté, et d'un tas de règles semi-empiriques et non-strictes, hérité de sa démarche historique, de l'autre coté. La chimie d'aujourd'hui est le jeu des atomes et de leurs combinaisons, dont on comprend la structure de base « comme un physicien » mais dont on apprend le comportement avec des règles semi-empiriques « comme un chimiste ».

La difficulté de l'apprentissage de la chimie, c'est que la physique de l'atome même est trop difficile au niveau du lycée pour être abordée de façon mathématique. Mais il est judicieux, quand-même, de faire une description verbale de cette physique, pour permettre de comprendre, au moins de façon intuitive et qualitative, le comportement plausible d'atomes dans leur jeu de combinaisons chimiques. Cela permet de faire le lien intuitif avec les règles semi-empiriques « chimiques ». Pour comprendre les fondamentaux de la chimie, il faut donc faire de la physique.

La physique théorique, donc

Ainsi, **les fondamentaux de la physique et de la chimie sont donc réduits à des notions de physique théorique, y compris la physique théorique derrière toute observation**, ce qu'on appelle l'instrumentation. On peut se poser la question pourquoi la physique a besoin d'une « théorie d'observation » là où les autres sciences expérimentales n'en ont pas besoin. La réponse est double : d'abord, souvent, les autres sciences expérimentales empruntent l'instrumentation à la physique : **la physique est donc aussi la science de base de l'instrumentation pour toute observation expérimentale**, y compris, les observations dans les autres sciences. En suite, l'hypothèse de base de la physique, que « le monde » est représenté par une structure mathématique, nécessite une description précise comment des objets mathématiques abstraits et donc, par définition, non observables concrètement, peuvent générer des observations. L'état mathématique d'un atome, en physique moderne, sera représenté par un vecteur dans un espace vectoriel à dimension infinie (son « état quantique »). Il va de soi qu'on ne peut pas « observer » directement « un vecteur dans un espace vectoriel à dimension infinie ». Il faut une règle qui dit comment on déduit des observations de cet objet mathématique.

L'univers entiers est donc une structure mathématique qu'on étudie en physique ? C'est le rêve de tout physicien, et même Isaac Newton pensait avoir établi une telle description de la nature : il pensait que la gravitation décrivait tout. L'hypothèse philosophique de la physique est, quelque part, que cette « théorie de tout » doit « exister ». **Mais nous savons, maintenant, que nous ne la connaissons pas.** Historiquement, des physiciens ont construit des jolies théories qui semblaient marcher très bien (qui prédisaient donc des observations qui s'avéraient en accord avec des expériences) et pour lesquelles leurs auteurs avaient l'espoir qu'ils avaient, finalement, trouvé la théorie finale, jusqu'au moment où des observations plus poussées montraient qu'il y avaient des différences entre ce que la théorie prévoyait, et l'observation expérimentale faite. **Toutes ces théories décrivent donc « des univers imaginés différents du nôtre », mais certains de ces univers imaginés ressemblent beaucoup au nôtre dans certains aspects.** Dans la mesure où cette ressemblance est suffisamment bonne pour prédire des résultats d'observation suffisamment proches des vraies observations pour être utile concernant ces aspects, **nous pouvons continuer à utiliser ces théories, même si nous savons que sur le plan conceptuel, elles sont complètement fausses.** En réalité, nous savons donc que, sur le plan conceptuel, toutes nos théories physiques sont totalement fausses, car nous savons que nous ne connaissons pas « la théorie physique de l'univers entiers ». Mais dans la pratique, nous avons des théories qui marchent sacrément bien pour beaucoup d'aspects de l'univers. Ces aspects qui sont suffisamment bien décrits sont **le domaine d'application de la théorie** en question.

Alors, naïvement, on pourrait dire : apprenez-nous alors les meilleures théories que l'on connaît à ce jour. Mais malheureusement, les théories les plus avancées sont non seulement très compliquées à apprendre, elles sont aussi extrêmement difficiles à mettre en œuvre dans des situations concrètes (les calculs sont trop difficiles) car les objets mathématiques y sont d'une très, très grande complexité. C’est pour cela qu’on apprend encore des « anciennes théories » historiques, mathématiquement beaucoup plus simples, même si on connaît, aujourd’hui, des théories en principe plus performantes que ces anciennes théories dans tous leurs domaines d’application.

Pourquoi peut-on dire que les anciennes théories sont « *totalement* fausses » sur le plan conceptuel, alors qu’elles semblent quand-même décrire beaucoup d’aspects de la réalité de l’univers avec une bonne approximation, la raison pour laquelle nous les utilisons toujours ? C’est parce que *les structures mathématiques des nouvelles théories sont totalement différentes*, même si les calculs pour des observations donnent des résultats proches. Par exemple, dans la théorie de gravitation de Newton, la Terre tourne autour du Soleil dans un espace Euclidien, et son orbite vient du fait que le Soleil exerce une force sur la Terre. Dans la théorie de gravitation d’Einstein qui la remplace, il n’y a pas de force de gravitation du tout. La présence du Soleil déforme l’espace et la Terre suit « une ligne droite » dans cet espace courbé sans savoir qu’il y a un Soleil. Mais à cause de la déformation de l’espace, cette « ligne droite » ressemble beaucoup à une ellipse si on ignorait que l'espace était courbé, et cette ellipse est pratiquement la même que celle que Newton avait calculée. Mais on voit bien que ce sont deux visions du monde *totalement* différentes. La notion de « force » qui est une notion centrale chez Newton, n’existe pas chez Einstein et est impossible de définir chez lui, car en contradiction avec certaines hypothèses postulées par Einstein. Mais dans ces deux univers imaginés totalement différents, les *observations* concernant la Terre sont quasi-identiques. Nous constatons aussi que l’observation est un phénomène qui ne donne pas accès aux éléments (mathématiques) postulés de la nature même : nous ne pouvons pas observer « la force », ni « l’espace courbé ». Dans l’univers imaginé de Newton, la force « existe » (et joue un rôle fondamental) comme objet mathématique qui fait partie des hypothèses de la modélisation de son univers, mais il n’y a pas d’espace courbé ; dans l’univers imaginé d’Einstein, l’espace courbé « existe » (et joue un rôle fondamental) comme objet mathématique qui fait partie des hypothèses de la modélisation de son univers, mais il n’y a pas de force. Les deux univers prédisent des observations quasi-identiques concernant le « mouvement de la Terre » ; dans un cadre, on dira qu’on a « confirmé l’existence de la force de gravitation », dans l’autre cadre, on dira qu’on a « confirmé la courbure de l’espace » par cette observation.

Alors, quel est l’état d’esprit dans lequel il faut se mettre pour apprendre la physique ? **Il faut voir la physique comme un amalgame d’univers imaginés.** Chaque univers imaginé est basé sur une théorie physique, qui postule une structure mathématique, et une façon de mettre en relation les éléments de la structure mathématique et les observations faites par « les habitants de cet univers imaginé ». Ce n'est pas si différent que cela de la littérature fantastique ou certains jeux vidéos, avec cette différence que c'est la logique mathématique qui dicte les conséquences des postulats, et non (seulement) la fantaisie de l'auteur.

Il y a un autre niveau où il faut se rendre compte qu’on « joue dans un univers imaginé », même à l’intérieur d’une théorie physique, quand on fait la relation avec le monde réel : c’est **la simplification et l’idéalisation de la situation dans laquelle nous allons faire une observation**. Même si on accepte le cadre d’une théorie spécifique, il est souvent impossible de tenir compte de *tous* les éléments de cette théorie en l’appliquant à une situation réelle, car **il y a simplement trop de choses dans notre univers**, même si elles seraient potentiellement correctement décrites par la théorie en question. Pour calculer la trajectoire de la Terre, il faudrait tenir compte, en principe, de *tous* les objets célestes, *toutes* les étoiles, *tous* les astéroïdes, tous les mouvements de *tous* les objets à la surface de la Terre,... Ce n’est pas envisageable. Donc, nous allons simplifier la situation dans l’univers imaginé : nous prendrons la Terre comme une boule parfaite, le Soleil comme une boule parfaite, et ce sera tout. L’observation calculée dans cette simplification sera forcément légèrement différente de l’observation faite, mais on ne peut pas faire autrement. A l’intérieur d’un univers imaginé, il faut donc aussi simplifier et idéaliser les choses, car nous ne pouvons pas, dans la pratique, « importer » tout ce qu’il y a dans l’univers réel, même si en principe, la théorie le prévoit : aucun calcul ne serait faisable, et il nous manquerait de toute façon les données pour le faire. **Le bon physicien développe une intuition efficace de ce qu'il convient d'importer, et de ce qu'on peut négliger.** Si on néglige trop d'éléments, les observations calculées seront peu précises (correspondront peu aux les observations faites en réalité) – sans que ce soit la faute de la théorie physique en question ! Si on importe trop d'éléments, les calculs deviendront laborieux ou infaisables, pour aucune amélioration du résultat.

Il y a donc deux niveaux où le physicien « joue l'habitant d'un univers imaginé » :

1. Le choix de la théorie physique, qui postule les éléments mathématiques dont est fait l'univers imaginé, et les règles d'observation de ces objets mathématiques.
2. Les quelques éléments de l'univers réel du problème à résoudre qu'il convient d'importer dans cet univers imaginé particulièrement « vide » comparé à l'univers réel, pour permettre une bonne approximation dans le calcul des observations.

La mécanique (de Newton)

Introduction

La mécanique est l'étude du mouvement de la matière dans l'espace.

Cette phrase même contient déjà plusieurs hypothèses, qui semblent évidentes, et qui s'avéreront fausses en physique moderne, mais dans « l'univers imaginé de la mécanique », sont supposées vraies. Les hypothèses sont :

- il existe un espace géométrique physique
- la matière prend place dans cet espace
- il existe un temps
- en fonction du temps, la matière change de place dans l'espace
- on peut observer « directement » la place de la matière dans l'espace à un instant donné.

Pendant des millénaires, ces hypothèses ont semblé tellement évidentes qu'on ne les a jamais énoncées explicitement. La première personne à avoir considéré qu'elles pouvaient être non-triviales, était, paradoxalement, Isaac Newton, qui les acceptait, qui a bâti l'édifice de ses travaux sur ces hypothèses, mais qui, en même temps, se rendait compte qu'elles n'étaient pas évidentes. Au début du 20ième siècle, finalement, on a dû renoncer à presque toutes ces hypothèses. Mais pour l'instant, dans notre conception de l'univers imaginé de la mécanique, nous les acceptons comme vrai.

Il y a trois niveaux de sophistication dans la mécanique :

1. **La géométrie.** On décrit l'endroit des objets matériels dans l'espace. La géométrie est classiquement considérée comme une partie des mathématiques, mais quand on l'utilise pour décrire l'emplacement des objets matériels dans l'espace physique, on fait, en réalité, de la physique.
2. **La cinétique**. La cinétique décrit le mouvement des objets matériels dans l'espace en fonction du temps, mais n'explique pas la raison du mouvement. La cinétique étudie les notions de vitesse, accélération et trajectoire.
3. **La dynamique.** La dynamique explique et prédit le mouvement des objets matériels dans l'espace, en fonction des forces que subissent les objets.

La géométrie physique

Il semble tellement évident que l'espace physique est un espace Euclidien tri-dimensionnel, que cette théorie s'est développée comme théorie *mathématique*, et n'a pas été considérée comme « théorie de la nature » pendant des siècles : on ne pouvait pas s'imaginer qu'il pouvait en être autrement.

Notre cerveau et notre interprétation naturelle des phénomènes visuels ont intégré, quelque part, que notre corps est présent dans un espace tri-dimensionnel, et que tout ce qui existe matériellement (on exclut donc les esprits, les spectres, les fantômes, et autres choses sur-naturelles) trouve « une place » dans cet espace Euclidien, et que deux objets matériels ne peuvent pas exister au même endroit. Au mieux, ils peuvent se toucher (leurs surfaces extérieures se confondent). Il existe aussi des « objets matériels solides » qui ne changent pas de forme ou de taille quand on les « déplace ou tourne » dans l'espace. Se déplacer et tourner sont des notions associées à un espace Euclidien, justement. Un objet solide très important sera la règle graduée, qui formera la base de l'instrumentation dans l'espace physique.

Il est postulé, comme « théorie d'observation » que les « lignes de vue sont des demi-droites qui commencent à un endroit du corps de l'observateur (son œil) » et qui permettent d'observer les autres objets matériels par intersection avec cette demi-droite. L'autre partie de la « théorie d'observation » consistera à postuler que nous pouvons, avec notre corps, toucher des objets quand on déplace une partie de notre corps (notre main, par exemple), à l'endroit de l'objet touché. « Voir et toucher » ont souvent été considéré comme « preuve finale d'existence ou de présence ».

Mais tout cela semble tellement intuitif et évident, qu'on ne l'énonce jamais. Personne n'a jamais considéré qu'une ligne de vue était un arc de cercle, par exemple. On a toujours associé « droite Euclidienne » avec « ligne de vue ». On a seulement commencé à prêter attention à ces questions, quand il s'est avéré qu'il fallait abandonner ces idées en physique moderne.

Les exercices de physique dans l'espace géométrique physique sont faits dans les cours de mathématiques. La différence entre un exercice de mathématique et un exercice de physique ressemble à ceci :

- exercice de mathématique : « un cercle de rayon de 3 et centre (-1,0) croise une droite qui passe par l'origine, et qui a comme coefficient directeur : 5/3. Quels sont les points d'intersection de la droite et du cercle ? »
- Exercice de physique : « Jean a creusé une piscine ronde de rayon 3 mètres. Quand Jean se trouve au centre de sa piscine, il se déplace d'un mètre en direction de son voisin et, en creusant, il tombe sur un tuyau droit. La direction de ce tuyau est tel, que chaque fois que Jean se rapproche de 3 cm dans la direction du voisin, le tuyau se trouve 5 cm plus à gauche de Jean (qui regarde dans la direction du voisin). Où se trouvent les deux endroits où le tuyau va passer dans la paroi de la piscine de Jean ?

L'exercice de physique est le même que l'exercice de mathématiques, sauf que l'exercice de physique fait appel à une mise en relation de « choses dans l'univers physique » et des objets mathématiques, tandis que l'exercice de mathématique se limite, justement, à des objets mathématiques proprement dits. Pour transformer l'exercice de physique en un exercice de mathématiques, il faut justement, une théorie physique, ici, la théorie de la géométrie physique de la mécanique de Newton. Ce que les professeurs de mathématiques appellent « la contextualisation » d'un exercice de géométrie, est en fait, de la physique !

Dans un exercice de mathématique, il n'y a pas d'unités comme « mètre ». La théorie de la géométrie physique postule l'existence d'objets solides qui ne changent pas de forme ou de taille quand ils se déplacent ou sont tournés : un de ces objets sera donc **la règle graduée**, un objet physique existant qui va définir ce que c'est : **le mètre**. Pendant longtemps, cet objet unique se trouvait à Paris. Le mètre est maintenant défini autrement, mais **pendant plusieurs décennies, l'unique objet physique qui définissait « le mètre » était bel et bien un objet existant se trouvant à Paris** : une règle graduée faite d'un alliage de platine et iridium. Toutes les « distances » dans l'espace physique Euclidien sont comparées à cette règle graduée (ou à une copie faite sur place et en suite déplacée ailleurs) et le rapport est exprimé en mètres.

Comme nous le savons, il y a beaucoup d'isomorphismes[4] entre un espace Euclidien, et un espace de coordonnées Euclidien. Mathématiquement, ces structures sont « les mêmes », mais il faut bien sûr choisir un isomorphisme spécifique entre l'espace Euclidien physique, et un système de coordonnées. **Comme nous n'avons aucune « prise » sur l'espace physique**

4 Un isomorphisme est une relation mathématique 1 sur 1 entre deux structures mathématiques tel que les propriétés importantes sont les mêmes avant et après qu'on applique la relation. Ici, on parle d'un isomorphisme entre des points géométriques et des coordonnées (des triplets de nombres réels). Il y a différentes façons de faire correspondre 3 nombres à des points géométriques. Chaque choix différent de référentiel correspond à une façon différente. Toutes ces façons sont des isomorphismes différents.

« vide », il faut des objets matériels (et leur position dans l'espace physique) pour pouvoir définir un système de coordonnées (un isomorphisme). Souvent, on prend la place de l'observateur (son œil) comme origine du système de coordonnées, mais il faut encore deux autres objets physiques (deux autres positions dans l'espace). Dans l'exercice ci-dessus, nous avions pris « le voisin » comme un des objets, et implicitement, le centre de la Terre, comme l'autre. La position de Jean et le voisin définissaient l'axe *X* (coté positif). La position de Jean et le centre de la Terre définissaient l'axe *Z* (coté négatif). Cela fixait le troisième axe, *Y*, par perpendicularité. Comme le problème était un problème de géométrie plane, on pouvait se limiter au plan *XY*. Ainsi, l'observateur (Jean), le voisin et le centre de la Terre fixaient totalement un système de coordonnées dans l'espace physique : un isomorphisme entre l'objet mathématique postulé correspondant à un élément de l'univers (« l'espace physique ») et une structure mathématique plus commode pour faire des calculs (un espace de coordonnées réels de dimension 3). Quand cette correspondance est faite, on peut « placer des objets physiques » dans l'espace, et utiliser tout ce que permet un espace Euclidien comme structure mathématique pour faire des calculs. Cela permettra de parler d'angles de vue, de distances, etc... concernant les emplacements des objets physiques : c'est la théorie d'observation, et l'instrumentation, qui va avec la théorie de la géométrie physique.

Dans notre discussion de la géométrie physique, on conclut sur un aspect qui pose question philosophique depuis longtemps :

autant que la « géométrie Euclidienne de l'espace » semble être l'évidence même, il y a une question qui reste sans réponse : pourquoi 3 dimensions et non, 2, 4, 9, ou 753 dimensions ? On peut s'imaginer un univers avec une « géométrie physique » à 9 dimensions, mais elle ne correspond pas (du tout) aux observations. Seulement 3 marche.

La cinétique

Le temps

La cinétique décrit le mouvement des objets matériels dans l'espace. **Le « mouvement » veut dire qu'un objet change de position, en fonction du temps. Le temps, en mécanique, est pris comme un nombre réel, qui augmente « de façon régulière » et irréversible**.

À chaque observation correspondra donc un « temps », qui est la valeur de ce nombre réel, et dont nous ne pouvons faire autrement que de constater qu'il augmente. **La mesure du temps écoulé consistera de compter le nombre de fois qu'un « processus cyclique et régulier » se produit.** Cela peut être le mouvement d'une pendule. Un certain processus sera pris comme référence, et son cycle définira une unité de temps. On peut alors définir des fractions de cette unité de temps, ou des multiples. Historiquement, **la rotation de la Terre sur elle-même** qui résulte en un mouvement apparent du Soleil (nous y reviendrons) était prise comme référence : le jour. Des fractions du jour, comme 1/24ième (l'heure) ont été définie, pour finir sur 1/3600 d'une heure, qu'on appelle une **seconde**.

On ne peut pas observer le temps même directement, mais il y a donc un moyen d'observer l'écoulement du temps entre deux observations – si on fait l'hypothèse que le processus cyclique régulier est, justement, « régulier » dans le temps et que ce temps, ce nombre réel, est universel.

Il se pourrait que le temps absolu existe, mais nous ne savons pas comment y accéder par observation : nous pouvons seulement mesurer des *différences* de ce temps hypothétique absolu entre deux observations. Nous ne savons pas si le temps absolu a un début ou si le passé est aussi éternel que le futur ; ou si le temps aura une fin. Le plus souvent, il est *postulé* en mécanique Newtonienne que le temps est tout l'axe réel, sans début, ni fin. En tout cas, **nous avons, expérimentalement, seulement accès à des intervalles de temps et non à sa valeur absolue**. Ainsi, nous pouvons **choisir notre « référence de temps zéro » par une observation spécifique**. Ce choix sera arbitraire, de la même façon que le choix du système de coordonnées pour décrire l'espace physique, est arbitraire. Comme il fallait un observateur et deux autres objets matériels pour définir un système de coordonnées, il faut une observation pour définir notre « temps zéro ».

Mouvement dans l'espace, naïvement

Les objets matériels sont postulés d'être pérenne : ils existent « tout le temps » dans l'espace. Un objet matériel, en mécanique, est sensé d'exister dans l'espace physique pour toutes les valeurs du temps. Il ne peut pas disparaître ou apparaître. Bien sûr, des objets solides peuvent se casser, mais l'hypothèse est alors que cet objet solide était un assemblage de plus petits objets solides qui, eux, ne font que se déplacer. **Au plus petit, nous allons donc retrouver des « atomes »** , des points matériels indestructibles qui ne font que se déplacer dans l'espace, mais qui ne sont ni créés ni détruits.

On pourrait discuter si ces « atomes » sont des points mathématiques, ou s'ils sont des « petits objets solides », donc des petits volumes. On laissera cette question ouverte. Comme le terme « atome » prêtera à confusion avec la chimie, nous allons parler dans la suite de **point matériel** ou **particule** et non d'atome, car nous savons que les atomes de la chimie consistent de plusieurs particules, et donc l'atome de la chimie ne correspond pas à ce qu'on veut entendre par « atome » dans la mécanique – même si dans les applications de la mécanique, ce que nous prenons comme « particule » est souvent un objet matériel bien plus grand qu'un atome chimique (par exemple, il arrive de prendre la Terre entière comme « particule ») - et même si, au départ, en chimie on pensait que les atomes étaient des objets indivisibles, avant de découvrir qu'ils avaient une structure interne, d'où leur nom en premier lieu.

Bref, naïvement, nous pourrions croire que la cinétique est simple : nous avons donc un espace physique (la géométrie physique), et nous avons des points matériels qui s'y trouvent et qui ont une position dans l'espace pour toute valeur du temps : la cinétique d'un point matériel est donc donnée par la fonction qui donne la position dans l'espace physique en fonction du temps absolu.

Pour chaque valeur du temps, il y a un point dans l'espace physique qui correspond à la position de la particule à cet instant, et c'est la fonction qui nous donne le mouvement. N'est-ce pas ?

Espace relatif

Le premier physicien à se rendre compte que ce n'était pas aussi simple, était Galilée. Bien que nous ayons postulé « un espace physique absolu », nous n'y avons pas accès expérimentalement. Nous avions besoin d'un isomorphisme entre l'espace absolu et un espace de coordonnées pour pouvoir décrire quelque chose dans l'espace absolu en géométrie physique, et nous avions trouvé un moyen de le faire : il nous fallait justement nous-même comme observateur, et deux autres objets physiques, ce qui nous permettait (en utilisant une règle graduée), de définir une correspondance entre chaque point de l'espace physique et notre espace de coordonnées (l'isomorphisme en question).

Mais la question qui se pose, est : *comment savoir si c'est le même isomorphisme que nous obtenons quand nous appliquons la procédure à deux moments différents ?*

Est-ce que le point de l'espace physique absolu, que nous avons désigné par les coordonnées (3.3 ; -2.8 ; 7.1) a trois heures, est le même point dans l'espace que celui qu'on désigne par les coordonnées (3.3 ; -2.8 ; 7.1) à 6 heures ?

Il va de soi que deux observateurs peuvent arriver à des conclusions différentes s'ils bougent l'un par rapport à l'autre.

Illustration 2: Isomorphisme par deux observateurs de l'espace absolu à deux moments différents, appelés "avant" et "après".

Ce qui est « le même point de l'espace absolu » pour l'un, correspondra à deux points différents pour l'autre. **Il faudrait donc « un observateur qui ne bouge pas » vis-à-vis l'espace absolu.** Eh bien, il n'y a pas moyen de trouver, expérimentalement, quels sont les observateurs qui ne bougent pas. C'était la grande découverte de Galilée : que deux observateurs en mouvement l'un par rapport à l'autre, peuvent être tous les deux des « bons observateurs » et qu'**il n'y a pas de moyen expérimental pour distinguer « celui qui bouge » (l'isomorphisme qui change) et « celui qui ne bouge pas » (qui garde le même isomorphisme).**

De la même façon que nous n'avons pas accès au temps absolu, même si on postule qu'il « existe », nous n'avons pas accès, expérimentalement, à l'espace absolu, même si on postule qu'il existe.

Cela vient du fait que nous ne pouvons pas observer l'espace. Nous pouvons seulement observer des objets matériels *dans* l'espace, et nous en avons besoin pour définir un système de coordonnées (un isomorphisme entre l'espace absolu et un espace de coordonnées Euclidiens). Tant que nous avions un seul isomorphisme, à un instant donné (quand nous faisions de la géométrie physique), cela ne nous dérangeait pas : un isomorphisme est un isomorphisme. Mais quand nous voulons comparer les positions d'objets physiques à deux moments différents, il n'y a pas moyen de savoir si « c'est notre isomorphisme qui a changé, ou si c'est l'objet matériel qui a bougé ».

Ainsi, que l'espace absolu existe ou pas, **nous pouvons définir le mouvement d'un objet matériel seulement par rapport à un observateur avec un système de coordonnées** (donc aussi défini par des objets matériels de référence).

Le mouvement se décrit seulement par rapport à un observateur (nous y comprenons donc « et son système de coordonnées »). Ainsi, **un mouvement n'est pas une propriété d'un objet matériel seul, mais d'une relation entre un objet matériel et un observateur.** Un objet matériel peut très bien être en mouvement pour un observateur, et être immobile pour un autre observateur.

Ainsi, **le mouvement d'un point matériel, pour un observateur donné, sera donc une fonction du temps (de cet**

observateur, avec son choix du temps zéro) dans l'espace de coordonnées Euclidien que cet observateur a défini pour tous les temps.

C'est une courbe dans un espace de coordonnées en 3 dimensions, paramétrée en temps. Souvent, elle est notée :

[x(t), y(t), z(t)].

C'est une hypothèse fondamentale en mécanique que pour tout observateur réalisable, **ces fonctions sont continues et dérivables.** Si une de ces fonctions ne serait pas continue, cela voudrait dire que le point matériel « saute » d'une position dans l'espace à une autre position dans l'espace sans passer par des points intermédiaires. Une particule pourrait « passer à travers un mur sans le pénétrer ». Il s'avérera qu'en physique moderne, c'est exactement ce qui est possible (l'effet tunnel), mais en mécanique, nous faisons l'hypothèse que la courbe paramétrée est continue.

Si nous considérons seulement la courbe dans l'espace de coordonnées, sans tenir compte du fait que c'est une fonction du temps (en d'autres termes, si nous considérons l'image de la fonction), nous parlons alors de **la trajectoire** du point matériel.

La trajectoire de la Terre, pour un observateur qui se trouve au Soleil et qui prend deux étoiles lointaines comme points de référence pour définir son isomorphisme, est une ellipse. *Le mouvement* de la Terre pour cet observateur est une fonction du temps, qui indique la position de la Terre sur cette ellipse en fonction de la valeur du temps. Mais il faut aussi noter que, pour un observateur sur la Terre, la trajectoire de la Terre se résume à un point, car pour cet observateur, la Terre ne bouge pas.

Vitesse

Comme le mouvement d'un point matériel est seulement défini par rapport à un observateur, **toutes les notions qui découlent d'un mouvement sont forcément aussi seulement définies par rapport à ce même observateur.** Une notion importante, qui découle du mouvement, est la notion de vitesse instantanée.

Si le mouvement d'un point matériel est donné par *[x(t), y(t), z(t)]*, alors la vitesse de ce point matériel, au moment *t*, est donné par :

[x'(t), y'(t), z'(t)], les dérivées de *x(t), y(t)* et de *z(t)*.

C'est aussi une fonction du temps (de l'observateur) dans l'espace de coordonnées Euclidien en 3 dimensions, et on dit que ce sont **les coordonnées du vecteur vitesse**.

Comme les positions sont mesurées en mètres (ce sont des distances entre l’origine et les projections orthogonales de l’emplacement du point matériel sur les axes du système de coordonnées de l’observateur) et le temps est mesuré en secondes, les vitesses sont données en **mètres par seconde**.

Quand *x(t), y(t)* et *z(t)* sont des fonctions constantes, c'est à dire, qu'elles ne dépendent pas de *t*, alors le point matériel « ne bouge pas » vis-à-vis de l'observateur. Son vecteur vitesse est le vecteur nul *[0, 0, 0]*. On dit que le point est au **repos**.

Quand le vecteur vitesse ne dépend pas de *t*, c'est à dire, quand le vecteur vitesse est un vecteur constant $[v_x , v_y , v_z]$, alors on dit que le point matériel a **un mouvement uniforme et rectiligne vis-à-vis de l'observateur**.

Le vecteur vitesse est tangent à la trajectoire dans tous les cas. Il se peut que le vecteur vitesse change de direction, mais ne change pas de grandeur, pour certains mouvements. C'est le cas, par exemple, d'un point matériel qui a un cercle comme trajectoire, et qui tourne avec une vitesse de rotation constante. La longueur du vecteur vitesse reste la même, mais la direction du vecteur vitesse (tangent au cercle) change tout le temps.

Accélération

De la même façon que nous avons introduit le vecteur vitesse, nous pouvons introduire le vecteur accélération vis-à-vis l'observateur : c'est la dérivée du vecteur vitesse :

$[x''(t), y''(t), z''(t)]$

Quand le mouvement est uniforme et rectiligne vis-à-vis de l'observateur, le vecteur accélération est le vecteur nul.

Les accélérations, étant des dérivées de vitesse en fonction du temps, ont des unités de **mètres par seconde au carré**.

Nous pouvons nous demander combien de dérivées successives nous allons encore introduire comme ça. Il s'avère qu'en mécanique, nous pouvons nous arrêter au niveau de l'accélération, et elle jouera le rôle dominant dans la dynamique.

Le vecteur accélération n'est pas toujours tangent à la trajectoire. Pour un mouvement circulaire à vitesse de rotation constante, par exemple, le vecteur accélération pointe vers le centre du cercle (et est donc perpendiculaire à la trajectoire, qui est le cercle). Quand le vecteur accélération est perpendiculaire à la trajectoire, le vecteur vitesse change de direction, mais pas de grandeur. Quand le vecteur accélération a une composante dans le sens de la vitesse, la vitesse devient plus grande. Quand le vecteur accélération a une composante dans le sens opposé de la vitesse, alors la vitesse devient plus petite (le point matériel ralentit).

Changement d'observateur

Un même point matériel peut être observé par deux observateurs (avec deux systèmes de coordonnées différents). Nous allons supposer que les deux observateurs ont choisi la *même observation comme temps de référence*, ainsi, les temps des deux observateurs sont numériquement les mêmes, pour ne pas trop compliquer la situation.

Nous allons noter la position du point matériel vu par l'observateur *A*, *[x,y,z]* et la position du même point par l'observateur *B*, *[u,v,w]*. *A* et *B* ont tous les deux un isomorphisme (au même moment) de l'espace Euclidien, ce qui veut dire qu'en toute généralité, il y a une rotation des axes, et une translation de l'origine, entre les deux systèmes de coordonnées.

Algébriquement, ceci peut s’écrire comme une translation et une matrice de rotation, mais nous allons nous limiter à un cas spécifique : *seulement une translation* :

$x = u + a$

$y = v + b$

$z = w + c$

Nous voyons que $[a,b,c]$ est la position, comme vu par l’observateur *A*, de l’origine du système *B* (l’œil de l’observateur *B*). Effectivement, pour l’observateur *B*, son œil se trouvant dans l’origine de son propre système, il a les coordonnées $(0,0,0)$, donc $u = 0$, $v = 0$ et $w = 0$. Dans ce cas, l’observateur *A* verra le même point matériel (l’œil de *B*), en position $x = a$, $y = b$, $z = c$. Ainsi, $[a,b,c]$ est bien la position de l’œil de *B*, comme vu par *A*.

Ceci est la relation entre deux observateurs différents concernant le même espace physique *au même moment*. A un autre moment, la relation sera différente. Ainsi, la relation (dans le cas simplifié d’une translation mais sans rotation) entre les mouvements du même point matériel par les deux observateurs est :

$x(t) = u(t) + a(t)$

$y(t) = v(t) + b(t)$

$z(t) = w(t) + c(t)$

[a(t), b(t), c(t)]* sera le mouvement de l'observateur *B* comme vu par l'observateur *A. La vitesse de l'observateur *B*, comme vu par l'observateur *A*, sera :

$V_B = [\ a'(t), b'(t), c'(t)\ ]$.

La vitesse du point matériel, comme vu par l'observateur *A*, est :

$v_A = [x'(t), y'(t), z'(t)\ ]$;

la vitesse du même point matériel, comme vu par l'observateur *B*, est :

$v_B = [\ u'(t), v'(t), w'(t)\ ]$;

Ainsi, nous obtenons :

$v_A = v_B + V_B$ (une somme vectorielle)

C'est la loi de l'addition des vitesses. La vitesse vue par un observateur *A* d'un point matériel est la vitesse de ce point comme vue par un observateur *B*, plus la vitesse de l'observateur *B*, comme vue par *A*.

Notez qu'il faut que les deux observateurs aient leurs axes *X,Y,Z* et *U,V,W* respectivement parallèles : *nous n'avons pas considéré les rotations.* Quand il y a des rotations en jeu, les choses deviennent plus compliquées.

Exactement de la même façon, en prenant la deuxième dérivée, nous pouvons établir une relation similaire pour les accélérations :

$a_A = a_B + A_B$ (une somme vectorielle)

L'accélération vue par un observateur *A* d'un point matériel, est l'accélération comme vue par un observateur *B*, plus l'accélération de l'observateur *B*, comme vue par *A*. Ici, aussi, les choses deviennent plus compliquées s'il y a des rotations en jeu.

Dynamique

Notion de dynamique et déterminisme

Nous y voilà finalement. Jusqu'ici, avec la géométrie physique et la cinétique, nous avons la possibilité de *décrire* un mouvement donné (par hypothèse, ou par observation) dans un cadre mathématique, en supposant que ce qu'on observe « le long des lignes de vue », ou ce qu'on touche, correspond à des objets matériels qui prennent une position dans l'espace physique, position qui change en fonction du temps, ce qu'on appelle leur mouvement vis-à-vis de nous, observateurs. Mais nous n'avons pas de théorie qui peut nous *prédire* ces mouvements. Est-ce que ce sont des esprits qui décident de bouger les objets matériels ? Est-ce les objets mêmes qui ont une « volonté » d'aller quelque part ? Peuvent-ils changer d'avis ? Si la Lune en a marre de tourner autour de la Terre, peut-elle décider d'aller tourner un peu autour de Jupiter pour changer ? Est-ce un spectre cosmique qui doit l'aider pour faire cela, et tant qu'il ne s'y décide pas, la Lune restera sur son orbite autour de la Terre ?

En d'autres termes, la Lune, pour un observateur donné, aura une position en fonction du temps : *[x(t), y(t), z(t)]*, mais est-ce que ces fonctions sont « données à l'avance » et est-ce qu'il y a un moyen de les connaître, ou est-ce qu'il n'y a aucun moyen de le savoir à l'avance, parce que cela dépend, par exemple, du bon vouloir d'un esprit sur-naturel ?

La cinétique ne nous permet pas de trancher : elle permet de décrire ce mouvement, une fois qu'on le connaît, mais elle ne dit rien sur ce que doivent être ces fonctions (sauf qu'elles sont postulées d'être continues et dérivables).

La dynamique fait l'hypothèse que le mouvement futur est entièrement déterminé par l'état actuel de l'univers. On appelle cela, **une théorie déterministe** : quand on connaît le présent, le futur est entièrement déterminé. Le passé, d'ailleurs, aussi. Toute « tranche de temps »[5] individuelle contient toutes les informations (en principe) pour connaître la situation à toutes les autres tranches de temps.

Notez qu'il est nécessaire de pouvoir connaître *parfaitement* l'état présent des choses (de *toutes* les choses) avant de pouvoir prédire avec certitude, le futur dans une théorie déterministe. Dans la pratique, bien sûr, il est impossible de connaître tout l'univers, aujourd'hui, de façon précise, et donc, *nous ne connaîtront pas le futur,* mais au moins, nous pouvons conceptualiser cela dans des univers imaginés plus simples (avec moins d'objets).

5 Par « tranche de temps » nous entendons : toutes les fonctions décrivant les mouvements des corps matériels, limitées dans leur domaine à une toute petite intervalle de temps ; des petits morceaux de mouvement de toutes les particules de l'univers.

L’avantage conceptuel de la notion d’un univers déterministe, c’est que nous n’avons plus besoin d’un esprit magique qui décidera de la trajectoire future de la Lune : cette trajectoire est entièrement déterminée par l’état actuel de l’univers. Même si dans la pratique, il nous sera impossible de calculer cette trajectoire parfaitement car nous ne connaissons pas la position de tous les points matériels dans l’univers entier, conceptuellement, cette trajectoire est entièrement déterminée à partir de l’état actuel de l’univers. **La nature n’a plus le choix, tout est déterminé. La nature doit suivre des « lois ».**

La dynamique est l’étude de ces lois qui fixent le futur, quand le présent est connu.

La physique moderne va partiellement être obligé de lâcher lest sur la notion de déterminisme, mais dans la théorie de Newton, la nature est parfaitement déterministe.

La dynamique de Newton

Alors, c’est quoi, cette dynamique de Newton qui fixe tous les mouvements du futur, quand on connaît le présent ? Il en va ainsi :

1. Il y a un observateur pour lequel tout ce qui suit est valable. Appelons-le l’observateur *O*.
2. Tout objet subit une influence de la présence de tout autre objet, et on appelle cette influence « une force ». Une force est un vecteur.

3. La force qu’exerce un objet *A* sur un objet *B* dépend des positions et des vitesses relatives de *A* et de *B* et de leur nature, comme vus par *O* (et change donc avec le temps).

4. Les forces que différents objets exercent individuellement sur l’objet *B*, s’ajoutent comme des vecteurs, pour donner lieu à la force totale que subit l’objet *B*.

5. Tout objet matériel possède une propriété qu’on appelle « la masse de l’objet », qui est un nombre réel positif invariable.

6. Si *m* est la masse de l’objet *B* (un nombre réel positif), et *F* est la force totale que subit l’objet *B*, alors, l’accélération de l’objet *B*, comme vue par l’observateur *O*, multipliée par sa masse *m*, sera égale à la force totale *F*.

Ce qu’on vient d’énoncer met les bases pour prédire, et aura comme domaine d’application, le mouvement d’objets célestes sous l’influence de la gravitation et les pommes qui tombent d’un pommier, ce qui était le point de départ de Newton. Il faudra ajouter des éléments supplémentaires pour pouvoir décrire un skieur qui descend d’une pente, ce qu'on fera plus tard.

Le premier point est nécessaire, car nous avons vu que tout mouvement est relatif à un observateur. Nous ne pouvons pas parler de notions comme position ou accélération, sans considérer l’observateur vis-à-vis duquel nous considérons cette position ou cette accélération. **Il faut donc au moins un observateur pour lequel les lois énoncées sont vraies.** Est-ce finalement notre « observateur de l'espace absolu » qui nous échappait en cinétique ? Nous allons voir qu'il n'en est rien, car s'il existe un tel observateur (ce qui est admis par postulat donc), alors il existe toute une famille d'observateurs pour lesquels ces lois sont valables. Nous les appellerons les **observateurs inertiels**.

En suite, il y a **l'introduction de la notion de force**. C'est le concept central dans la dynamique de Newton, par lequel les objets « dictent » aux autres objets comment il faut qu'ils bougent. Mais il faut encore spécifier exactement quelle est la force exercée par un objet de nature *A*, sur un objet de nature *B*, en fonction de leur position relative et (éventuellement) de leur vitesse relative. La position relative est le vecteur qui va d'un corps vers l'autre ; la vitesse relative est la différence vectorielle des vitesses des deux corps. Pour Newton, la force universelle était la gravitation, et son espoir était que c'était la seule force qui déterminait tout, y compris, le comportement de la matière sur le plan microscopique. Nous savons maintenant que la gravitation n'est pas la seule force (il y a aussi les forces électromagnétiques par exemple). **La force de gravitation** exercée par l'objet *A* sur l'objet *B* est le vecteur qui pointe de *B* vers *A* et qui a comme grandeur :

$F = G\, m_A\, m_B / R_{AB}^2$

G est une constante universelle (la constante de Newton), m_A est la masse de l'objet matériel *A*, m_B est la masse de l'objet *B*, et R_{AB} est la distance Euclidienne entre les positions des points matérielles *A* et *B* pour l'observateur *O*. La force gravitationnelle ne dépend pas des vitesses des objets.

Rien ne nous empêche, d'étendre la théorie dynamique de Newton à d'autres forces, mais pour l'instant, nous nous contentons de présenter la force gravitationnelle comme si c'était la seule force dans l'univers.

Nous voyons que tout objet dans l'univers exerce une force sur tout autre objet dans l'univers. A priori, cela pose un grand problème, car cela voudrait dire que pour pouvoir espérer faire un simple calcul en dynamique, il faudra tenir compte de tous les objets dans l'univers ! On ne pourra jamais faire cela dans la pratique ! Seulement, il y a quelque chose qui nous sauve : **plus les objets sont loin, plus la force sera petite** : il y a une dépendance en $1/R^2$ où R est la distance entre les objets. L'univers dans lequel nous vivons est suffisamment « vide » pour que le $1/R^2$ « gagne » de la masse à distance, ce qui veut dire que nous pouvons négliger la force due aux objets très lointains, et que nous allons calculer une force qui sera proche de la « vraie force » si on pouvait inclure tous les objets.

Il est remarquable que la masse qui entre dans la formule pour la force de gravitation, est la même masse que celle qui entre dans la formule dans le point 6, et qui permet de déduire l'accélération en fonction de la force totale.

Comme l'accélération est la deuxième dérivée de la position, il nous faut deux « conditions actuelles » pour pouvoir en déduire la position pour tout temps futur : **il nous faut la position**

actuelle, et la première dérivée de la position actuelle, qui n'est rien d'autre que la vitesse.

Il faut donc connaître la position actuelle, et la vitesse actuelle d'un point matériel, pour pouvoir déterminer de façon unique, sa position future en fonction du temps avec la connaissance (dynamique) de l'accélération (par la loi énoncée dans le point 6) du dit point matériel.

L'état actuel de l'univers qu'il faut donc connaître pour déterminer le futur (et d'ailleurs aussi le passé), c'est la position et la vitesse actuelle de chaque point matériel dans l'univers.

Les positions (et, pour d'autres forces, éventuellement les vitesses) de tous les points matériels nous permettent de calculer toutes les forces sur tous les points matériels, ce qui nous permet de connaître l'accélération de tout point matériel. Avec la connaissance de la position et de la vitesse actuelle d'un point, on peut donc calculer son futur mouvement, ce qui nous permet, justement, de connaître la future position et la future vitesse de tous les points, à partir desquelles on peut à nouveau, déduire les forces, et donc l'accélération etc.

La théorie dynamique de Newton avec sa loi de gravitation nous permet donc d'imaginer un univers avec quelques objets célestes dedans ; le fait que les objets lointains ne contribuent pas beaucoup à la force exercée, grâce à la dépendance $1/R^2$ de la force de gravitation, nous donne l'espoir que les observations calculées dans le petit univers imaginé correspondront, en ce qui concerne le mouvement d'objets célestes, assez fidèlement aux observations faites sur les vrais objets célestes, si nous renseignons bien les positions et vitesses, ainsi que les masses, des objets célestes en question, à un moment donné. La théorie de Newton concernant les mouvements des objets célestes dans le système solaire fut un énorme succès, inégalé à son époque. En plus, cette théorie prédit aussi relativement bien la chute d'objets lourds à la surface de la Terre. Par contre, pour d'autres observations, **il faudra ajouter des « lois de forces », autres que la gravitation**.

Masse

Chaque objet est postulé de posséder **une masse**. On peut définir une masse unitaire en choisissant un objet matériel quelconque, qui sert comme masse de référence et on peut comparer les masses des autres objets à cette masse de référence. Pendant plusieurs décennies, l'objet de référence était **un bloc de platine d'un kilogramme**, gardé à Paris. Actuellement, il y a une définition plus fondamentale de l'unité de masse. **Quand l'unité de masse est fixée, la constante de Newton peut être, en principe, mesurée.**

Puisque la masse multipliée par l'accélération est égale à une force, l'unité de force doit donc être kilogramme mètre par seconde au carré. On a donné un nom particulier à cette unité : **le Newton**. Mais ce n'est pas une nouvelle unité : un Newton, c'est exactement un kilogramme mètre par seconde au carré.

Ceci implique, par la formule de la grandeur de la force gravitationnelle, que la constante de Newton doit avoir les unités suivantes : mètre cube par kilogramme et par seconde au carré. Des mesures précises de cette constante nous donnent la valeur de

$G = 6{,}67408 \times 10^{-11}\ m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}$

Dans l'univers de Newton, il y a donc trois unités fondamentales, le mètre, la seconde, et le kilogramme, et des unités dérivées en multipliant ou divisant des puissances de ces unités. Certaines de ces combinaisons auront des noms spécifiques, nous venons d'introduire le Newton (mais il y aura aussi le Joule, le Watt et autres qu'on introduira plus tard).

Action et réaction

La force de gravitation possède une propriété qui se généralise. Effectivement, la force exercée par gravitation d'un objet *A* sur un objet *B* est une force dont le vecteur pointe de *B* vers *A*, et possède une magnitude de

$F_B = G\ m_A\ m_B / R_{AB}^2$

De la même façon, l'objet *B* exerce une force de gravitation sur l'objet *A*, qui pointe de *A* vers *B*, et avec une magnitude, qui est :

$F_A = G\ m_B\ m_A / R_{BA}^2$

Nous constatons que $F_A = F_B$: la magnitude de la force de gravitation sur le corps *A*, par le corps *B*, est identique à la magnitude de la force de gravitation sur le corps *B*, par le corps *A*. En plus, la première force est orientée de *A* à *B*, tandis que la deuxième force est orientée de *B* à *A*, donc dans le sens opposé. **La somme vectorielle des deux forces est zéro : c'est la loi d'action et de réaction.**

Newton a postulé que cette propriété sera valable aussi pour toute autre forme de force, différente de la gravitation, si elle existe.

La loi d’action et de réaction implique une propriété qui est très heureuse pour notre modélisation simplifiée du monde :

Le centre de gravité d’un ensemble de points matériels suit un mouvement qui sera donné par la somme vectorielle des forces *extérieures* sur tous les points matériels de l’ensemble et comme si ce centre avait une masse qui est la somme des masses des points matériels de l’ensemble ; il ne faut pas tenir compte des forces qu’exercent les particules entre eux.

Le centre de gravité d’un ensemble de points matériels est la position donnée par la formule suivante :

$$x_c(t)=\frac{\sum_i m_i x_i(t)}{\sum_i m_i}$$

$$y_c(t)=\frac{\sum_i m_i y_i(t)}{\sum_i m_i}$$

$$z_c(t)=\frac{\sum_i m_i z_i(t)}{\sum_i m_i}$$

$$M_c = \sum_i m_i$$

Nous avons alors :

$$M_c x_c''(t) = \sum_i m_i x_i''(t) = \sum_i F_i$$

F_i est normalement la force totale sur la particule *i*, mais **on peut donc enlever toutes les forces internes**, car leur somme vectorielle est, grâce au principe d'action et de réaction, zéro.

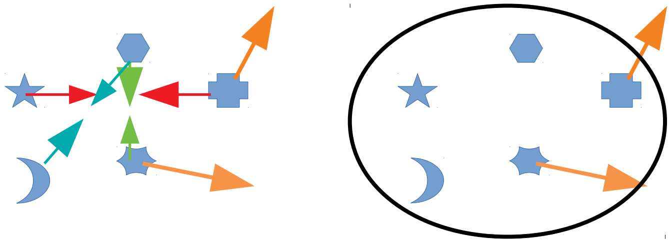

Illustration 3: On peut ignorer les forces internes pour calculer le mouvement du centre de masse grâce au principe d'action et réaction.

Pourquoi est-ce que ceci est si heureux ? La raison est que **cela nous permet d'ignorer la structure interne des objets matériels que nous voulons décrire**. Nous ne sommes pas sûr de connaître la décomposition en « points matériels élémentaires » des objets matériels, et nous connaissons encore moins toutes les interactions (les forces mutuelles) entre ces points matériels dont est fait potentiellement un objet matériel. Il nous serait donc impossible de calculer la force totale sur chacun de ces points, et donc, sur le centre de gravité qui représente la position de l'objet en considération, car il y a beaucoup de forces, potentiellement très fortes, dont on ignore tout. Mais grâce à la loi d’action et de réaction, nous pouvons ignorer toutes ces forces : nous devons seulement tenir compte des forces qui sont causées par les objets extérieurs au système.

Ceci implique aussi que n’importe quel système de points matériels qui ne subit pas de force extérieure aura un centre de gravité qui subit un mouvement uniforme et rectiligne pour un observateur inertiel, même si le système se disloque, explose, change de forme...

C’est le principe sur lequel est basé le moteur de fusée : le centre de gravité de la fusée y compris le combustible, reste sur place, mais comme le combustible est éjecté vers l’arrière, le reste de la fusée doit se déplacer vers l’avant. Comme, dans l’espace, le combustible éjecté continue de se mouvoir, il faut que le reste de la fusée continue de se mouvoir aussi pour garder le centre de gravité à sa place d’origine. Plus qu’il y ait du combustible éjecté, plus que la fusée doit bouger vite.

Observateurs inertiels

Newton devait postuler l'existence d'au moins un observateur inertiel, pour lequel le mouvement des points matériels se passe comme postulé par la dynamique formulée, et qu'on avait appelé l'observateur *O*. Nous allons maintenant constater que l' existence d'un observateur *O* implique l'existence d'autres observateurs inertiels qui peuvent aussi bien jouer le rôle de *O*, et que la dynamique ne permet donc pas de distinguer un observateur unique ; mais nous allons aussi constater que l'existence d'un observateur *O* implique que beaucoup d'autres observateurs ne sont pas inertiels.

Supposons que nous avons un jeu de points matériels qui subissent un mouvement pour notre observateur *O*, sous l'influence des forces qui dépendent des positions relatives des points matériels (donc les vecteurs allant d'un point à l'autre). Ces vecteurs sont les mêmes pour tout autre observateur *X*, tant que *X* a un isomorphisme Euclidien entre l'espace absolu et son système de coordonnées à tout moment, car un isomorphisme Euclidien implique que les distances Euclidiennes sont conservées. Les vecteurs force sur chaque point matériel seront donc les mêmes pour *O* et *X*. Considérons, pour le moment, que *X* bouge vis-à-vis de *O*, mais que les axes des deux systèmes de coordonnées restent parallèles (nous ne considérons pas de rotations).

Ainsi, par postulat, pour toute particule *i*, pour l'observateur *O*, nous avons :

$m_i\, a_i = F_i$ où m_i est la masse de la particule *i*, a_i est le vecteur accélération de la particule *i* pour l'observateur *O*, et F_i est la force totale sur la particule *i*.

Pour l'observateur *X*, nous venons d'argumenter que la force totale sur la particule i sera le même vecteur que F_i. Mais de la cinétique, nous savons que le vecteur accélération de la particule *i*, pour l'observateur *X*, sera :

$\tilde{a}_i = a_i + A$, avec *A* le vecteur accélération de l'observateur *O*, comme vu par l'observateur *X*.

La loi dynamique :

$m_i\, \tilde{a}_i = F_i$

pour l'observateur *X* **est donc valable seulement quand *A* est le vecteur zéro**.

Si l'observateur *O* subit une accélération comme vue par l'observateur *X*, alors les lois de la dynamique ne sont pas valables pour l'observateur *X* ; l'observateur *X* n'est alors pas un observateur inertiel. Par contre, si l'observateur *O* ne subit pas d'accélération comme vu par *X*, les lois de la dynamique sont bien valables aussi pour *X*, et *X* est donc bien un observateur inertiel.

Ainsi, nous pouvons conclure : **si *O* est un observateur inertiel, alors tous les autres observateurs pour qui *O* n'a pas d'accélération, sont aussi des observateurs inertiels, et tous les autres observateurs pour qui *O* est accéléré, ne sont pas des observateurs inertiels**.

Tous les observateurs inertiels sont donc en mouvement uniforme et rectiligne vis-à-vis les autres.

On ne peut pas privilégier un de ces observateurs inertiels ; chaque observateur aurait pu jouer le rôle de l'observateur postulé par Newton. **Nous n'avons donc toujours aucun moyen de savoir quel observateur serait « au repos » vis-à-vis de l'espace absolu**, mais nous pouvons maintenant déterminer quelle famille d'observateurs est en mouvement uniforme et rectiligne vis-à-vis de l'espace absolu, et lesquels sont accélérés.

Comme nous n'avons pas traité en détail la rotation des observateurs, nous ne pouvons pas déduire le résultat suivant, mais **on peut démontrer que les observateurs inertiels**

doivent avoir des axes qui ont des angles constants (non-dépendants du temps) avec les axes de l'observateur *O*.

Les observateurs inertiels peuvent donc avoir des axes inclinés, mais ces axes ne peuvent pas tourner dans le temps vis-à-vis des axes des autres observateurs inertiels. Il n'y a pas de direction privilégiée dans l'espace, mais il y a une « non-rotation » vis-à-vis l'espace absolu.

Le problème de Galilée s'est donc un peu atténué (pas tous les observateurs sont égaux pour l'espace physique absolu), mais persiste parmi la famille des observateurs inertiels : **nous ne pouvons pas connaître « la vitesse absolue » de l'espace physique absolu**, mais nous pouvons nous mettre en mouvement uniforme et rectiligne sans rotation.

Pour définir un observateur inertiel dans la pratique, il faudrait donc avoir un observateur, et deux autres objets matériels lointains, qui ne subissent aucune force extérieure. Tout observateur qui peut définir son isomorphisme entre l'espace absolu et l'espace Euclidien de coordonnées ainsi, sera un observateur inertiel.

La difficulté, dans la pratique, est que nous ne connaissons aucun objet qui ne subit pas, quelque part, une force gravitationnelle par des corps célestes. Tous les objets matériels accessibles subissent la gravitation et il est donc difficile d'établir un vrai observateur inertiel dans le cadre de la théorie de Newton.

Cela dit, nous avons de bonnes approximations. Une première approximation est : **un observateur à la surface de la Terre**, et deux autres objets sur la surface de la Terre. Bien que cet observateur et ces deux autres objets subissent la gravitation de la Terre, ils subissent aussi une force de contrainte de la surface de la Terre même, qui empêche qu'on s'enfonce dans la Terre (nous reviendrons sur les forces de contrainte), ce qui neutralise la gravitation de la Terre. Mais nous subissons la gravitation de la Lune et du Soleil, et la Terre tourne, ce qui fait que ce système n'est qu'approximativement un système inertiel.

Une meilleure approximation est d'éliminer la rotation de la Terre **en choisissant, comme deux autres objets, des étoiles lointaines**. La rotation est ainsi évitée, mais nous subissons toujours une accélération due au Soleil et à la Lune.

Encore une meilleure solution est de considérer un observateur hypothétique **au centre du Soleil** (il aura très chaud) et comme objets : deux étoiles lointaines. Mais nous subissons l'attraction gravitationnelle du centre de la voie Lactée. Etc…

Les forces de contrainte

Nous avons postulé l'existence d'objets matériels, et certains de ces objets matériels sont des solides d'un étendu spatial. Comme deux de ces objets ne peuvent pas prendre la même position, il faut bien quelque chose qui les empêche d'avoir des mouvements qui feraient en sorte qu'à un moment donné, ils se chevauchent. Comme nous savons maintenant que, pour éviter un mouvement uniforme et rectiligne, il faut une force (et que le spectre ou le fantôme n'y sont pour rien), **il faut une force qui fait qu'un objet ne peut pas pénétrer un autre**.

Imaginons une brique qui est posée sur une table. Nous considérons la brique et la table comme deux objets matériels solides qui ne peuvent pas s'interpénétrer. A priori, la brique, si elle est au repos comme la table (pour un observateur au repos à la surface de la Terre), resterait au repos si la force totale qui agit sur la brique est zéro. Mais nous savons que la force gravitationnelle de la Terre agit sur la brique (vers le bas). Si c'est la seule force qui agit sur la brique, la brique devrait se mettre à accélérer vers le bas (devrait commencer à tomber). Mais alors, la brique serait au même endroit que la table. Il y a donc une différence, due à la table, car sans la table, c'est exactement ce qui se passerait. La table doit faire subir une force à la brique de telle façon, que la brique reste au repos : il faut que la force que la table fait subir à la brique, compense *exactement* la force de gravitation qui agit sur la brique.

Mais « comment la table peut savoir » ? La force de gravitation était « une affaire entre la brique et la Terre ». La force entre la table et la brique ne peut quand-même pas savoir exactement ce qu'il faut pour compenser ?

En réalité, il y a un mécanisme qui « règle » la force que la table fait subir à la brique. Quand la brique « frôle » la table, au départ, la table n'exerce pas de force sur la brique. La brique se met donc à tomber, et, effectivement, à vouloir pénétrer la table. Seulement, se qui se passe réellement est que **la table se déforme légèrement au lieu de se laisser pénétrer**. Cette déformation de la table va induire des pressions internes dans le matériel dont est faite la table, et le résultat est que la table va commencer à exercer une force sur la brique vers le haut. Au départ, cette force sera inférieure à la force de gravitation, et la brique va continuer à s'enfoncer. La table va se déformer de plus en plus, et la force que va exercer la table sur la brique va augmenter, jusqu'au moment où elle compensera exactement la force de gravitation, et donc, où la brique s'arrêtera de s'enfoncer dans la table. Si la table exerce une force trop grande, la brique va plutôt aller vers le haut, et va donc diminuer la déformation de la table : **la brique rebondit alors sur la table.** Ainsi, c'est au moment où la force que la table exerce sur la brique compense parfaitement la force de gravitation que subit la brique, que le mouvement s'arrête.

La déformation (légère) d'un objet solide sous l'effet d'un autre objet qui subit une force et qui veut pénétrer l'objet, s'appelle **l'élasticité d'un objet solide**, et c'est le résultat des forces par lesquelles les particules constituantes de l'objet se tiennent.

Les forces de contrainte sont donc un effet de l'élasticité des objets solides, mais nous n'avons pas besoin de connaître en détail ce comportement élastique : **les forces de contrainte seront toujours telles, que les objets solides ne se pénètrent pas.**

Il suffit d'exprimer cette condition, et elle détermine la grandeur de la force de contrainte nécessaire pour éviter cela. Physiquement, elles sont le résultat de la déformation élastique des corps solides, mais il ne faut pas connaître ce processus en détail pour les déterminer.

Au-delà de Newton

Newton a créé une théorie physique qui détermine un monde imaginé complet : un jeu d'objets matériels dans un espace absolu, observé par un observateur inertiel sous l'action de la force de gravitation. On peut choisir le nombre, la forme et la masse des objets matériels, et on peut les disposer dans l'espace comme on veut, à un moment donné, et on peut leur donner une vitesse initiale à ce moment donné ; à partir de là, tout mouvement est déterminé pour tous les moments futurs (et passés) dans le monde de Newton. Comme déjà souligné, ce fut un succès sans précédent pour décrire le mouvement des corps célestes, et des pommes qui tombent d'un pommier. Mais, bien que ce soit l'espoir de Newton, **la gravitation ne pouvait pas décrire la structure et le comportement de la matière au niveau microscopique.** On avait aussi observé des phénomènes qui se seraient bien expliqués par des forces qui ne sont pas la force gravitationnelle : **les phénomènes électriques et magnétiques**.

Pendant deux siècles, la physique a fait des progrès en ajoutant des notions au cadre que Newton avait créé, sans mettre en cause ce cadre, mais en le complétant. Le résultat de tout cela s'appelle **la physique classique**.

Vers la fin du 19ième siècle, on a dû, pour la première fois, mettre en cause sérieusement le cadre même que Newton avait fixé : ajouter des notions ne pouvait pas expliquer certaines observations. C'est **le début de la physique moderne**.

Résumons de quoi est faite la structure mathématique de la théorie de Newton. Nous avons un espace Euclidien avec 3 dimensions, **l’espace absolu**, et un axe réel : **le temps absolu**. Nous avons **un observateur inertiel**, qui est un isomorphisme entre l’espace absolu, et un espace de coordonnées Euclidien, en fonction du temps, et **une référence (une observation) pour choisir le temps zéro de l’observateur**. En suite, nous avons **un ensemble de points matériels**. Il y a une application de cet ensemble de points dans l’ensemble des fonctions continues et dérivables du temps dans l’espace : à chaque point matériel est associé **un mouvement** : une position en fonction du temps. Il y a une autre application de l’ensemble des points dans les nombres réels positifs : **la masse**. A chaque point matériel, est associé une masse. Il y a, finalement, une application *des couples de points matériels* dans l’ensemble des fonctions du temps dans l’ensemble des vecteurs : **la force qu’exerce la deuxième particule du couple sur la première**, en fonction du temps. Les lois de la dynamique font que ces applications satisfont beaucoup de conditions et de propriétés entre eux qu’on ne va pas répéter ici.

Il n’y a rien d’autre comme objet fondamental mathématique dont est faite la nature selon Newton.

Électromagnétisme

Introduction

Au départ, l’électromagnétisme va seulement introduire des nouvelles forces entre corps matériels, de façon comparable à la force de gravitation. Mais on constatera vite que beaucoup de phénomènes électromagnétiques ne pourront jamais être expliqués de cette façon, dont un phénomène important : la lumière. Newton pensait que la lumière était faite de particules matérielles – car dans sa théorie, tout était fait de particules matérielles (sauf l’espace absolu même, le temps et les forces). Certaines observations (la diffraction) sont impossibles à expliquer avec (seulement) des particules matérielles qui ont des positions dans un espace en fonction du temps comme Newton l’avait postulé. Mais on semble pouvoir sauver le cadre de Newton, en introduisant une nouvelle notion dans la théorie : **on postule l’existence d’un champs** ; ou même, deux champs (un champs électrique, et un champs magnétique), mais on appellera ces deux champs, le champs électromagnétique[6]. Dans le bestiaire des choses qui font le monde, il y a donc, à coté de l’espace, le temps, les objets matériels (dans l’espace), et les forces : les champs. Il y a eu beaucoup de résistance conceptuelle contre cette notion, et au 19ième siècle, on a essayé de considérer ces champs comme des manifestations (des « vibrations ») d’un corps matériel : le

6 Il s’avère, d’ailleurs, que ce n’est qu’un seul champs, mais qui se manifeste souvent comme s’il était fait de deux champs d’une autre nature. Les notions mathématiques pour discuter de cela manquent, malheureusement, au niveau du lycée.

fameux « éther ». On a même eu l’espoir de finalement pouvoir trouver l’observateur qui serait au repos vis-à-vis de l’espace absolu : ce serait l’observateur qui est au repos vis-à-vis de ce corps matériel, l’éther, qui était postulé d’être au repos lui-même dans l’espace absolu. Mais toutes les tentatives théoriques de faire cela ont été contredites par des observations expérimentales : *l’éther n’existe pas comme corps matériel dans le sens de Newton*. Le champs électromagnétique est vraiment une nouvelle notion non-matérielle. Ces tentatives de trouver l’éther, et par cela, de trouver l’espace absolu, ont d’ailleurs révélé des observations qui sont fondamentalement incompatibles avec la vision de Newton sur l’espace et le temps. En fait, la règle d’addition de vitesses que nous avions déduite s’avère contredite par des observations et cette déviation devient importante quand on se rapproche de la vitesse de la lumière. C’est la fin de la physique classique : on ne pourra plus sauver le cadre de Newton, et il faut revoir de fond en comble nos conceptions de l’espace et du temps : c’est ce que Einstein fera avec sa théorie de la relativité restreinte. Nous sommes en 1905. Les champs, par contre, vont justement survivre et gagner en importance. Dans ce chapitre, nous allons introduire cette notion de champs, encore dans le cadre de la théorie de Newton.

Électrostatique et électricité

La force électrostatique

Dans le cadre de la théorie de Newton, où toute accélération d'un corps matériel doit être expliquée par une force[7], il est facile de constater qu'il doivent exister des forces qui ne sont pas la force gravitationnelle quand on fait des observations avec des petits corps matériels chargés par frottement.

Il s'avère qu'on peut postuler une nouvelle force, la force électrostatique, qui ressemble comme deux gouttes d'eau à la loi de gravitation. On peut associer un nouveau nombre réel (positif ou négatif, cette fois) à chaque corps matériel, qu'on appellera **sa charge électrique** et qui jouera le rôle que joue la masse dans la gravitation. La force qu'exerce la particule 2 sur la particule 1 sera aussi orientée le long de la droite qui relie les deux positions des deux particules, mais, cette fois :

- si la charge des deux particules est positive, la force sur la particule 1 sera dans le sens opposé du sens de la particule 2.
- si la charge des deux particules est négative, la force sera aussi dans le sens opposé.

7 Ici, nous voyons qu'un cadre théorique accepté à priori est nécessaire pour pouvoir conclure quelque chose concernant un élément théorique de la nature : dans ce cas, une force. Sans ce cadre théorique, l'observation n'impliquerait pas du tout l'existence d'une force – cette notion n'a d'ailleurs même pas de sens hors du cadre de la théorie de Newton.

- Si une charge est positive et l'autre, négative, par contre, la force sur la particule 1 sera dans le sens de la particule 2.

On peut résumer cela aussi : si les deux charges ont le même signe, **la force est répulsive** ; si les deux charges sont de signe opposé, **la force est attractive**. Rappelons que **la force de gravitation, elle, est toujours attractive**.

La formule qui donne **la magnitude de la force électrostatique** est la suivante :

$$F = K \frac{|q_A||q_B|}{R_{AB}^2}$$

Nous voyons qu'elle a exactement la même forme que celle de la gravitation. Ainsi, elle a aussi l'heureuse propriété que sa magnitude diminue fortement avec la distance, ce qui implique qu'on pourra négliger les objets chargés lointains. A première vue, la force électrostatique ressemble tellement à la force de gravitation qu'on pourrait même se demander en quoi elles diffèrent. Il y a deux points essentiels sur lesquels l'électrostatique et la gravitation sont différentes. Le premier est que la force électrostatique peut être répulsive autant qu'attractive. Mais la différence la plus importante est que *la charge électrique n'a rien à voir avec la masse*, le paramètre qui se trouve dans la loi dynamique qui relie l'accélération avec la force ; tandis que c'est la propriété remarquable de la gravitation d'avoir exactement ce même paramètre, la masse, dans la formule de la grandeur de la force gravitationnelle.

Il y a encore une autre différence, dans la pratique : **pour des corps matériels macroscopiques, la charge peut varier dans le temps – tandis que la masse est constante**. Un petit bout de papier peut être chargé électriquement, et 5 minutes plus tard, ne plus être chargé électriquement. Ce n'est qu'une apparence, cependant. **Les particules matérielles élémentaires ont une charge électrique bien fixée comme leur masse**. La raison pour laquelle des objets macroscopiques peuvent avoir une charge électrique variable dans le temps, vient de trois effets :

1. La force électrostatique est beaucoup plus forte que la force gravitationnelle, et « un tout petit peu de charge » peut déjà provoquer des forces importantes

2. Comme les charges viennent en valeurs positives et négatives, un corps macroscopique peut consister d'énormément de particules chargées, s'il y a autant de charges positives que de négatives, c'est comme si le corps était électriquement neutre.

3. Il y a des petites particules matérielles chargées qui peuvent facilement quitter un corps macroscopique, et aller vers un autre corps macroscopique ; la quantité de masse transférée est totalement négligeable, mais il peut s'agir de la charge totale du corps en question. Ceci explique donc l'effet qu'une charge électrique peut facilement se déplacer d'un corps à l'autre : il suffit de transférer un petit nombre de petites particules.

Les forces électrostatiques que nous observons donc macroscopiquement, sont le résultat d'infimes in-balances des charges positives et négatives dont sont faits les corps matériels ; les quelques particules chargées de trop ou de trop peu peuvent facilement passer de corps en corps, donnant l'impression que la charge totale d'un corps est transférée à un autre corps sans autre modification observable des corps.

En plus, nous observons qu'il y a des corps macroscopiques où la charge peut facilement mouvoir d'un endroit à un autre à l'intérieur du corps, sans quitter ce corps. Il s'agit de corps qu'on appelle **« conducteurs » d'électricité**. Le lecteur l'aura compris : il s'agit de nouveau de quelques particules élémentaires chargées qui bougent à l'intérieur du corps en question, souvent, justement (mais pas toujours), sous l'influence de forces électrostatiques. Il s'agit, de nouveau, de tellement peu de particules comparé au nombre total de particules dont est fait un conducteur, qu'il semble que rien ne bouge, sauf la charge.

Conservation de charge

On constate que **les charges peuvent bouger, mais que la somme totale de charge reste toujours constante**. Si un corps neutre devient chargé positivement, il y a un autre corps qui deviendra chargé négativement d'autant de charge. Une charge positive peut disparaître, tant qu'une charge négative de même grandeur disparaît aussi. On postule **la loi de conservation de charge**.

Dans le cadre de la théorie de Newton, où les points matériels sont pérennes, on peut comprendre la loi de conservation de charge comme ceci : toute particule élémentaire a une charge fixe. Ainsi, quand les particules élémentaires bougent, la charge se déplace avec eux, mais la somme de toutes les charges reste la même. Cette notion de conservation de charge survivra dans la physique moderne, même si la pérennité des points matériels n'y est plus d'actualité.

Champs électrique

Sauf pour quelques cas comme les expériences en électrostatique où on attire des petits bouts de papier, dans la pratique, il n'est pas commode d'utiliser la force électrostatique car les quelques charges électriques dont il s'agit, bougent à l'intérieur des conducteurs sans qu'on sache où ils se trouvent. Nous ne pouvons pas observer visuellement par des lignes de vue, où pourraient bien se trouver ces charges. Dans le cadre de la théorie de Newton, on fait l'hypothèse qu'ils se déplaceront, jusqu'au moment où ils ne subissent plus de force électrostatique à l'intérieur du conducteur (tant qu'il y ait une force, ils bougeront). Ainsi, *il faudrait trouver les positions des charges tel que leur configuration résulte en une force électrostatique totale zéro.* Cela paraît à première vue un problème mathématique difficile à résoudre, mais en fait, il y a une technique puissante qui va nous offrir la solution sans trop de peine : **le potentiel électrostatique**. Sans s'en rendre compte, nous allons introduire la notion de champs. Au départ, cela semble juste « une aide au calculs », mais cela finira par être un objet essentiel comme nous l'avons annoncé.

Une charge électrique génère une force électrostatique comme décrit ci-dessus sur toute autre charge électrique dans l'espace. Cette force est seulement réalisée s'il y a vraiment une particule chargée, mais **nous pourrions attacher, à chaque point de l'espace et pour chaque moment, un vecteur qui serait la force électrostatique si jamais nous avions un point matériel à charge unitaire à cet endroit**. Même si le jeu peut nous paraître sans grand intérêt, il est effectivement possible de définir **une fonction de l'espace et du temps dans l'ensemble des vecteurs qui donne le vecteur force à chaque point de l'espace et chaque moment que subirait une charge unitaire si elle se trouvait à cet endroit à ce moment**. On ne peut pas définir ce vecteur à l'endroit d'un point matériel générateur de la force même (la formule aurait une distance zéro par laquelle il faudrait diviser). C'est normal : nous ne pourrions pas placer une particule à charge unitaire à la place où il y a déjà une particule avec une charge !

On peut résoudre la difficulté de la discontinuité du champs électrique là où il y a des points matériels chargés, **en supposant que la charge est distribuée de façon continue**, avec une densité spatiale de charge. **La densité spatiale de charge** est une application de l'espace et du temps dans les nombres réels, qui indique localement que la charge d'un petit volume est égale au volume spatial de ce volume, multiplié, justement, par la densité spatiale au centre de ce petit volume. Cette notion est en contradiction avec la notion de point matériel chargé. Ce souci mathématique s'avérera fondamental ; mais dans le cadre de la physique classique, il nous faut accepter cela, en supposant que les points matériels sont en fait des tous petits volumes non-zéros. Dans notre cadre Newtonien, on définit **le champs électrique** comme on vient de le faire. Avec une densité spatiale de charge, nous n'avons plus de discontinuité dans le champs électrique[8], qui devient une application continue dans tout l'espace.

Ainsi, nous avons un champs vectoriel électrique continu, mais pour l'instant, cela semble être juste un outil mathématique. La force exercée par toutes les charges sur un corps matériel avec une charge *q* sera donc *q*, multiplié par la valeur du champs électrique à l'endroit de ce corps.

---

8 On peut voir cela ainsi : la discontinuité trouvait son origine dans le fait qu'un point matériel chargé contribuait une composante au champs électrique dans le point A avec grandeur :

$$E = K \frac{q_B}{R_{AB}^2}$$

Notez que q_A a disparu de la formule, car nous avions défini le champs comme la force sur une charge unitaire : $q_A = 1$. Pour R_{AB} zéro, cette formule diverge vers l'infini. Avec une densité spatiale de charge, cependant, une petite boule de rayon R aura une charge :

$$q_B = V_{boule} \rho = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho$$

Quand R (qui sera en même temps le rayon de la petite boule, et la distance R_{AB} où on veut évaluer la force) ira vers zéro, cette fois, la composante :

$$E = K \frac{\frac{4}{3} \pi R^3 \rho}{R_{AB}^2}$$

va vers zéro, et notre champs électrostatique est devenu une application continue.

Potentiel électrostatique

On peut démontrer que **le champs électrique peut être dérivé d'une application réelle de l'espace *V(x,y,z,t)***:

E(x,y,z,t) = (- dV/dx ; - dV/dy ; - dV/dz)

Pas tous les champs vectoriels ont cette propriété, mais on peut démontrer que le champs électrique la possède. Cette application *V(x,y,z,t)* sera le potentiel électrostatique. *E(x,y,z,t)* est un vecteur, mais *V(x,y,z,t)* est un nombre réel. En fait, comme le champs électrique consiste de dérivées de *V*, on peut toujours ajouter une constante à *V*, cela ne change rien. Par convention, on choisit le potentiel qui devient zéro à l'infini.

Quand *V* est constant dans une zone de l'espace à un moment donné, alors le champs électrique y sera zéro à cet instant. **Nous avons donc trouvé notre façon de ne pas avoir des forces électrostatiques dans un conducteur : il faut que *V* soit constant dans tout le volume du conducteur pour que les charges y soient au repos !** Notez que ce potentiel pourra changer dans le temps, mais il doit rester le même partout dans le conducteur à un moment donné.

Cela implique que nous pouvons associer une valeur spécifique du potentiel électrostatique à tout conducteur pour un instant donné : on dit que le conducteur est à un potentiel V_1.

En électricité, nous nous intéressons aux *différences* de potentiel entre les conducteurs. L'intégrale du champs électrique le long d’une ligne continue[9] entre deux conducteurs sera égale à la différence du potentiel du conducteur de départ et le potentiel du conducteur d’arrivée. Une application simple est le condensateur plat : deux conducteurs électriques qui sont des corps métalliques plats et parallèles peuvent se trouver à une distance *D* l'un de l'autre. Si la différence de potentiel est *U*, alors le champs électrique dans un point entre les deux plaques est un vecteur qui sera perpendiculaire aux plaques métalliques, et de grandeur *U/D*. Le vecteur sera dans le sens de la plaque au plus haut potentiel vers la plaque du plus bas potentiel.

Nous répétons qu’a ce stade, le champs électrique (le vecteur), et le potentiel électrostatique (le nombre réel) ne sont que des outils mathématiques pour faciliter le calcul des forces, et n’ont pas de nécessité dans la théorie physique : ils ne doivent pas correspondre à « un élément de la réalité » dans le monde imaginé correspondant à la théorie physique – pour l’instant.

Courant électrique

Nous avons vu que des particules chargées peuvent se mouvoir à l’intérieur de corps matériels qu’on qualifie de conducteurs, et que ces particules bougent sous l’influence de forces électrostatiques : ils s’arrêtent de bouger systématiquement quand ils ne subissent plus de forces électrostatiques à

9 L’intégrale le long d’une ligne ne fait pas partie des notions de mathématique vues au lycée. On peut intuitivement comprendre que c’est la limite d’une somme de petits morceaux de la ligne, vus comme petits vecteurs, qu’on multiplie par le produit scalaire avec le champs électrique local.

l’intérieur du conducteur. Seulement, les forces qui agissent sur ces particules à l’intérieur du corps matériel sont bien plus complexes que juste la force électrostatique « macroscopique » comme on l’imagine. Par cela, nous entendons la force électrostatique due aux charges électriques des corps que nous considérons (conducteurs, morceaux de papier, …) sans entrer dans le détail de la composition microscopique de ces corps, et donc sans tenir compte des charges éventuelles et leurs forces associées entre ces composantes microscopiques (dont nous ignorons, la plupart du temps, la nature exacte). Ces forces (souvent aussi de nature électrostatique d'ailleurs) peuvent être importantes et avoir des effets contraires à ce que la force macroscopique seule aurait comme effet.

Il y a même des corps composés qui vont « pousser » les particules chargées contre les forces électrostatiques macroscopiques. En faisant cela, ces corps induisent des conducteurs chargés. On utilise ces corps composés comme **batteries**, car elles permettent de créer des champs électriques. Il va de soi qu’on ne peut pas expliquer le fonctionnement d’une batterie par la simple force électrostatique macroscopique.

Il faut donc accepter des comportements électriques de certains corps sans que nous comprenions le détail de ce qui se passe à l'intérieur. On peut modéliser certains comportements par des « lois » empiriques approximatives, sans que ces lois soient aussi fondamentales que la loi de gravitation ou la loi de la force électrostatique : ce n'est qu'une modélisation simple d'un comportement tellement complexe que nous abandonnons l'idée d'essayer de calculer cela en détail.

D'ailleurs, si nous l'essayions, dans le cadre de la physique classique, nous ne trouverions pas beaucoup de prévisions en accord avec l'observation. Nous savons maintenant que le comportement électrique microscopique de la plupart des corps matériels nécessite la physique moderne (la mécanique quantique). Dans le cadre de la physique moderne, nous arrivons, enfin, à prédire le comportement des matériaux sur le plan électrique, même si le problème est très complexe.

Ainsi, **dans le cadre de la physique classique, il nous faut accepter, donc, des modèles empiriques du comportement électrique des corps, sans fondement ou justification fondamentale.**

Une telle « loi » empirique, mais qui s'avère d'ailleurs étonnement précise, est **la loi de Ohm**. Nous insistons que la loi de Ohm n'a rien de fondamental, et qu'elle peut s'appliquer, ou non, au comportement d'un corps sur le plan électrique, mais que, dans la pratique, elle s'applique à beaucoup de corps avec une précision étonnante.

Elle va ainsi :

pour beaucoup de corps solides, **si nous maintenons une différence de potentiel *U* entre deux faces du corps, alors il y aura un courant électrique *I* qui parcourt le corps, de magnitude proportionnelle à *U*, et le coefficient de proportionnalité est une propriété du corps.**

Traditionnellement, ce coefficient est noté par son inverse, *R*, et s'appelle **la résistance électrique** du corps.

Nous avons ainsi :

$I = U / R$

Mais d'abord, c'est quoi, un courant électrique ? Quand nous avons des charges électriques qui se déplacent, elles forment « un courant électrique » dont la magnitude est donnée par **la quantité de charge qui passe une partie d'un plan donné, coupant les trajectoires des particules chargées, par unité de temps (par seconde donc)**.

Au repos, nous avons vu qu'un corps conducteur a un potentiel constant dans son volume. Si nous forçons, donc, une différence de potentiel sur deux surfaces du corps, ce potentiel ne peut plus être constant, et les charges mobiles à l'intérieur vont se mettre en mouvement. Ce mouvement est, justement, le courant électrique dont on parle, et on constate donc, empiriquement, que ce courant est proportionnel à la différence de potentiel que nous imposons – au moins, pour beaucoup de corps conducteurs. Il y a des corps conducteurs pour lesquels la loi d'Ohm ne s'applique pas du tout.

Notons que la résistance dépend du corps en question, de sa géométrie et de sa composition.

La loi de conservation de charge implique qu'un courant électrique doit « tourner en rond » (former un circuit fermé), ou doit se terminer sur deux « réservoirs de charge », un qui accumulera des charges positives, et un

autre qui accumulera des charges négatives. Ces charges accumulées seront alors le courant électrique multiplié par le temps qui s'écoule.

Dans le dernier cas, le courant ne peut pas continuer d'exister éternellement, car les quantités de charge accumulées deviendraient trop grandes, et les forces électrostatiques trop fortes. Un « courant continu » est un courant qui est constant pendant un temps indéfini. Ainsi, **un courant continu ne peut que former un circuit fermé**.

Unités

Logiquement, l'introduction de la force électrostatique implique l'introduction d'une nouvelle unité qu'on ne peut pas fabriquer avec les mètres, les secondes et les kilogrammes : l'unité de charge. Cette unité de charge s'appelle « le Coulomb ». Mais le système international ne considère pas le Coulomb comme une unité de base. Le système international prend comme unité de base : **l'unité de courant électrique, l'Ampère**. Il y a une expérience calibrée qui détermine un courant de référence (donc 1 Ampère), mais nous ne pouvons pas encore décrire cette expérience (elle a besoin de forces magnétostatiques). Nous exprimons le rapport entre une intensité de courant et ce courant de référence, en Ampère.

De cette définition découle automatiquement l'unité de charge : c'est le courant multiplié par le temps, donc **Ampère seconde**. Comme déjà mentionné, nous donnons aussi le nom de **Coulomb** à cette unité de charge, mais elle n'est donc rien d'autre que Ampère seconde.

La constante *K*, qui s'appelle la constante de Coulomb dans la formule de la force électrostatique aura comme unité : des Newtons mètres au carré par Coulomb au carré. Mais pour exprimer cela en unités de base, il faudra remplacer les Newtons et les Coulombs par leurs formes de base, donc : des kilogrammes mètres par seconde au carré mètres au carré par Ampère au carré par seconde au carré. Cela se simplifie en : kilogrammes mètres cube par Ampère au carré par secondes puissance 4.

Nous avons : $K = 8{,}987\,551\,787\,368\,176 \times 10^9\ kg\ m^3 / (A^2\ s^4)$

Pour des raisons historiques, la constante de Coulomb est aussi écrite comme :

$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ et ε_0 s'appelle **la permittivité du vide**. On peut en déduire que sa valeur est :

$\varepsilon_0 = 8.854187817... \times 10^{-12}\ A^2 s^4 / (kg\ m^3)$

Le champs électrique aura comme unité : Newton par Coulomb, ce qui est en unités de base : kilogramme mètre par seconde au carré par Ampère seconde ; donc kilogramme mètre par seconde cube et par Ampère. Le potentiel électrique aura mètres fois l'unité du champs électrique comme unité, ce qui fait : kilogramme mètres au carré par seconde cube par Ampère. On appelle cette unité aussi le **Volt**. Finalement, la résistance électrique a comme unité : le Volt par Ampère, ce qui donne donc en unités de base : kilogramme mètre au carré par seconde cube par Ampère au carré. On appelle cette unité aussi le **Ohm**.

[champs électrique] = $kg\ m / (s^3\ A) = V / m$

[potentiel électrostatique] = Volt $(V) = kg\ m^2 / (s^3\ A)$

[résistance électrique] = Ohm (Ω) = $kg\ m^2 / (s^3\ A^2) = V/A$

Magnétostatique

L'électrostatique introduit une force qui explique beaucoup de phénomènes que la gravitation ne pouvait pas expliquer, mais il reste des forces (si on reste dans le cadre de Newton) inexpliquées. Au départ, il y a des phénomènes qui semblent sans relation, mais qui s'avèrent être la même force :

1. Il y a des matériaux « magnétiques », des aimants, qui exercent des forces les uns sur les autres, qui ne peuvent pas s'expliquer par la force gravitationnelle, ni la force électrostatique.

2. Des courants électriques font subir des forces aux des aimants.

3. Des conducteurs électriques subissent des forces proche d’un aimant.

4. Des conducteurs électriques exercent des forces sur d’autres conducteurs électriques.

Ces phénomènes relèvent d'une même force : **la force magnétique**. Seulement, la description mathématique des phénomènes magnétiques dépasse les notions mathématiques vues au lycée. Nous allons donc devoir limiter leur description et il est normal de ne pas complètement comprendre les expressions mathématiques qui suivront.

Il s'avère que, pour calculer les forces magnétiques, un outil mathématique nous aide beaucoup : **le champs magnétique**[10]. Comme le champs électrique, à ce stade, ce n'est qu'un outil pour aider dans le calcul des forces, et on pourrait, si on veut se rendre la vie compliquée, faire sans. Le champs magnétique est aussi un champs de vecteurs, qu'on note traditionnellement *B*. A chaque point de l'espace et pour tout moment, on associe donc un vecteur *B*, comme on associait à chaque point de l'espace et pour tout moment, un vecteur E pour le champs électrique. Le champs électrique avait une source : les charges électriques. Il y a deux types **de sources pour le champs magnétique** :

1. les courants électriques
2. les dipôles magnétiques (dont sont faits les aimants permanents)

Les corps matériels qu'on appelle aimants permanents sont constitués de particules élémentaires porteurs de dipôles magnétiques, qui sont représentés par un vecteur *M*.

Si le dipôle se trouve dans un point *D*, alors, le champs magnétique dans un point *P* dû à ce dipôle, sera :

$$B=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{R^3}\left(3\left(M.1_R\right)1_R-M\right)$$

10 Le nom officiel de se champs est l'induction magnétique.

Ici, R est la distance entre D et P, et 1_R est le vecteur $\frac{\overrightarrow{DP}}{R}$.

Dans l'expression, nous avons le produit scalaire *(M.1R)*.

La constante prend la forme $\frac{\mu_0}{4\pi}$ pour des raisons historiques, et jouera un rôle comme la constante de Newton ou la constante de Coulomb.

La contribution des courants électriques au champs magnétique est donnée par la loi de Biot et Savart :

$$B=\frac{\mu_0}{4\pi}I\int_C \frac{dl\times 1_R}{R^2}$$

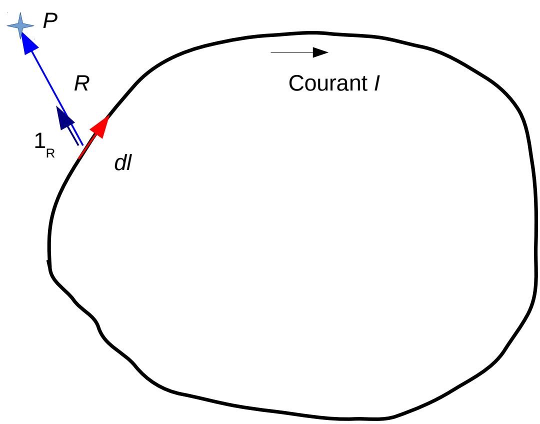

Illustration 4: Géométrie de la loi de Biot-Savart: un circuit (noir) conduisant un courant électrique I est constitué de "petits morceaux de circuit" dl qui contribuent au champs magnétique dans le point P.

Ceci est une expression d'intégrale qui n'est pas connue au niveau du lycée, mais qu'on peut comprendre intuitivement comme ceci : l'intégrale est une intégrale le long de la courbe *C* qui suit le circuit fermé du courant électrique de magnitude *I*. C'est la limite d'une somme de contributions. Chaque contribution utilise un *dl*, petit vecteur, morceau de la courbe. 1_R est le vecteur unitaire sur la droite qui va du point d'intégration (où on considère *dl*) sur le circuit du courant vers le point *P* où on calcule le champs *B*. *R* est la distance entre les deux points. Nous utilisons un produit vectoriel qui n'est pas vu au lycée, mais qui produit un vecteur perpendiculaire aux deux vecteurs qui font le produit.

Comme le champs électrique, le champs magnétique permet de calculer les forces sur les corps matériels.

Dans les deux formules il y a une constante que nous avons notée μ_0 et elle s'appelle : **la perméabilité du vide**. Contrairement aux autres constantes, la valeur de celle-ci n'est pas mesurée, mais fixée, car c'est ce choix qui fixera l'unité de courant (l'Ampère), comme on verra bientôt. Elle est de :

$\mu_0 = 4\pi\ 10^{-7}\ kg\ m\ /\ (s^2\ A^2)$

En 1819, Œrsted découvre l'effet de force d'un courant électrique sur un dipôle magnétique (une aiguille de boussole). Il ne connaît pas la formulation du champs magnétique, mais il s'agit de la force qu'implique un champs magnétique calculé par la loi de Biot et Savart, sur un dipôle magnétique.

Nous n'allons pas étudier les forces magnétiques sur un dipôle magnétique, mais le champs magnétique implique aussi une

force magnétique sur une particule chargée de la façon suivante :

$F = q\ (v \times B)$

Ici, *q* est la charge électrique de la particule ; *v* est le vecteur vitesse de la particule, et *B* est le vecteur de champs magnétique à l'endroit où se trouve la particule. La croix représente, comme dans la loi de Biot et Savart, le produit vectoriel, et produit un vecteur perpendiculaire à *v* et à *B* de grandeur $|v|.|B| \sin u$, avec *u* l'angle entre le vecteur *v* et le vecteur *B*.

Nous voyons ici le premier exemple où une force dépend d'une vitesse[11]. Le champs magnétique ne cause pas de force sur une particule chargée au repos. Elle cause une force sur une particule qui bouge, et la force est perpendiculaire à la vitesse, donc à la trajectoire. Ainsi, la force magnétique change la direction, mais pas la magnitude, de la vitesse de la charge.

Dans un champs magnétique uniforme (le même vecteur *B* partout), une particule chargée qui a une vitesse perpendiculaire au champs magnétique aura une trajectoire circulaire.

Un courant électrique étant fait de particules chargées en mouvement, un champs magnétique induit donc aussi **une force sur un conducteur qui conduit un courant électrique**.

11 Si le lecteur se demande, à juste titre, « vitesse pour quel observateur », la réponse dans ce cadre-ci sera : pour un observateur pour qui la source du champs magnétique est au repos. Mais finalement, cette force restera valable pour tout observateur, car l’effet d’induction magnétique compensera le mouvement de la source du champs magnétique.

Historiquement, c'est d'ailleurs par ce biais que la force magnétique a été découverte, par Ampère, en 1821 :

La force magnétique qui agit sur un petit morceau de conducteur de longueur *dL*, et qui conduit un courant *I*, est donnée par :

$F = I\, dL\, 1_L \times B$

Ici, 1_L est un vecteur unitaire tangent au conducteur dans le sens du courant.

Cette force est technologiquement exploitée dans la construction de **moteurs électriques**. Dans un moteur électrique, on fait couler un courant dans des conducteurs qui se trouvent dans un champs magnétique. La force magnétique qui agit alors sur ces conducteurs, fait tourner le moteur.

Cette force est aussi prise comme phénomène qui définit l'unité de courant électrique, l'Ampère : **un courant d'un Ampère dans deux conducteurs rectilignes parallèles très longs, à un mètre de distance l'un de l'autre, induit une force sur chaque mètre de conducteur, égale à 2.10^{-7} *N*.** C’est parce que l’Ampère est défini comme ceci, que la perméabilité du vide a la valeur qu’on a indiqué.

En résumé, les dipôles magnétiques et les courants électriques sont la cause de forces agissant sur des dipôles magnétiques, des particules chargées en mouvement, et des conducteurs conduisant un courant électrique. Le champs magnétique est une aide de calcul mathématique pour calculer ces forces.

Induction magnétique

En 1831, Faraday découvre un nouvel effet : **un champs magnétique qui change dans le temps, agit comme s'il y avait un champs électrique, non-induit par des charges**. Faraday découvre que s'il a deux conducteurs en bobine, il y a un courant pendant un court instant dans la deuxième bobine, quand il branche, ou débranche, le courant dans la première bobine. Cet effet s’appelle « l’induction magnétique ».

Effectivement, **il faudra revoir notre définition du champs électrique**. La source de champ électrique, à savoir, les charges électriques dans l'espace, doit être complétée par une composante du vecteur électrique qui trouve son origine dans le changement dans le temps (la dérivée) du champs magnétique.

La formulation de cette modification nous mène trop loin des notions mathématiques vues au lycée, mais elle implique que, **quand il y a des champs magnétiques qui varient dans le temps, le champs électrique ne peut plus être calculé à partir du potentiel électrostatique seul**. La nouvelle composante du champs électrique implique qu'il y aura un courant électrique dans tout conducteur qui forme un circuit fermé et qui se trouve dans un champs magnétique qui varie dans le temps.

Nous voyons que le champs magnétique et le champs électrique, qui étaient des aides au calcul, commencent « à vivre leur vie d'objet physique ».

L'induction magnétique est exploitée technologiquement dans le **transformateur** et surtout, dans **le générateur électrique**.

Un générateur électrique ressemble beaucoup à un moteur électrique, sauf que cette fois, une force extérieure fait tourner le générateur, qui contient des conducteurs qui se trouvent dans un champs magnétique. Quand le générateur est forcé de tourner, du point de vue des conducteurs, le champs magnétique change, et un courant électrique est induit dans ces conducteurs par induction magnétique, courant électrique qui est en suite utilisé pour autre chose, comme allumer une ampoule.

L'électrodynamique

En 1871, James Clark Maxwell publie finalement son livre sur l'électrodynamique. Jusque là, des formulations diverses des effets électriques et magnétiques étaient publiées, mais personne n'en avait fait le résumé mathématique et théorique. En essayant de faire exactement cela déjà en 1864, *Maxwell doit constater que les lois de forces d'électrostatique, de magnétostatique, et d'induction, sont mutuellement mathématiquement incompatibles et contiennent des incohérences*. Il ne peut donc pas faire, en l'état des choses, une synthèse mathématique cohérente de l'électromagnétisme.

Il observe cependant qu'il suffit, pour restaurer la cohérence des lois, *de postuler un effet supplémentaire qui n'avait pas encore été observé* : **il faut que le changement d'un champs électrique implique une composante de champs magnétique**, de façon comparable à l'induction, où un changement d'un champs magnétique implique une composante de champs électrique. En d'autres termes, **le champs**

magnétique aura, à part des dipôles magnétiques et les courants électriques, aussi une troisième source : le changement du champs électrique.

Maxwell est ainsi dans la capacité de présenter une théorie globale des effets électromagnétiques, et cette fois, avec son nouvel effet, la théorie présentée est cohérente.

Mais en introduisant son effet, Maxwell ne peut plus formuler l'électromagnétisme comme des forces agissant sur des courants et des charges, suite aux mouvements d'autres courants et d'autres charges seuls : **les champs électriques et magnétiques sont maintenant indispensables dans la théorie**, de la même façon que les forces sont indispensables dans la théorie de la gravitation de Newton. Il faut maintenant donc accepter l'existence de ces champs comme « objets physiques » de la même façon que nous acceptons l'espace, le temps, et les forces comme « objets physiques » dans le cadre de la théorie de Newton.

Effectivement, comme un champs électrique changeant implique un champs magnétique, et un champs magnétique changeant, implique, à son tour, un champs électrique, dans la formulation de Maxwell, **il peut y avoir des champs électriques et magnétiques qui s'entretiennent tout seul**, sans qu'il y ait des courants ou des charges dans le coin. La théorie de Maxwell implique que ces champs ne peuvent pas rester sur place, mais doivent se propager comme des ondes, et quand on calcule leur vitesse de propagation, on trouve… **la vitesse de la lumière** !

N'oublions pas que ce phénomène est un phénomène théorique qui découle d'une modification que Maxwell avait introduite pour rendre sa théorie cohérente ; rien ne disait que cette théorie était une bonne description de la nature.

En 1887, Heinrich Hertz démontre expérimentalement **la propagation d'ondes radio**, d'origine électrique, comme la théorie de Maxwell le prédit, donnant une base expérimentale pour la proposition théorique de Maxwell. L'application technologique est bien sûr la communication radio, mais il est maintenant plus que probable que **la lumière visible** aussi, est un phénomène électrodynamique qui suit les lois de Maxwell.

La physique classique est complète, il semble. Le cadre de Newton, complété avec les champs de Maxwell, décrit une multitude de phénomènes correctement.

Mais...

Nous avions indiqué que Maxwell était capable de dériver la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques de ces lois. En fait, on peut relativement facilement voir que cette vitesse est dérivée de la constante de Coulomb *K* et de μ_0 :

$$c=\sqrt{\frac{4\pi K}{\mu_0}}=\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$$

Quand on calcule la valeur de cette formule, on trouve :

c = 299 792 458 m / s

C’est la vitesse de la lumière ! Notez que nulle part dans la théorie de l’électromagnétisme, nous avons utilisé des phénomènes optiques. Cette valeur vient de constantes, liées aux forces électrostatiques (Coulomb), et forces entre courants électriques. Que cette vitesse sorte de cette théorie est hautement remarquable !

Mais la vitesse *pour quel observateur inertiel* ??

Il en suit qu' **à priori, la théorie de Maxwell ne peut être valable que pour un seul observateur inertiel** : nous avons finalement trouvé notre observateur au repos dans l'espace absolu !

Des expériences sont mises en place pour mesurer la vitesse de la Terre vis-à-vis de cet observateur absolu au repos. C'est à priori facile : il suffit de mesurer la vitesse de la lumière dans des directions différentes, et les valeurs différentes mesurées et leurs directions nous indiqueront dans quelle direction et à quelle vitesse la Terre bouge dans l'espace absolu… Par contre, il faut une très grande précision dans la mesure, car nous supposons que le mouvement de la Terre dans l'espace absolu est lent comparé à la vitesse de la lumière, et que nous allons donc voir l'effet seulement si nous pouvons faire des mesures avec beaucoup de chiffres significatifs...

Au grand dam des expérimentateurs (Michelson et Morley en 1887, la même année que l'expérience de Heinrich Hertz...suivis de beaucoup de confirmations entre 1902 et 1905 avec des précisions expérimentales améliorées), **la Terre semble immobile dans l'espace absolu** : la vitesse de la lumière est exactement la même dans toutes les directions, jour et nuit, en janvier et en juin. Donc, finalement, Ptolémée avait raison, et la Terre ne bouge pas et le Soleil tourne bien autour de la Terre immobile et non vice versa. Galilée et Newton avaient tout faux. Hum. Il y a quelque chose qui cloche.

Einstein va nous sortir du pétrin en 1905, mais au prix de casser le cadre de Newton fondamentalement, pour la première fois dans l'histoire de la physique.

Ondes et champs

Les ondes sont des phénomènes dynamiques qui peuvent apparaître dans certains champs, en fonction des lois dynamiques qui gèrent ces champs.

Un champ est une fonction réelle ou vectorielle de l'espace et du temps. Souvent, les lois dynamiques des champs correspondent à des équations différentielles partielles, c'est à dire, des équations dans lesquelles apparaissent les dérivées partielles de cette fonction vers les coordonnées et vers le temps. Les équations différentielles partielles ne font pas partie du programme de mathématiques du lycée, mais on peut espérer que le lecteur aura une idée intuitive de ce que ce genre d'équation peut être.

Nous allons considérer seulement des ondes en une dimension spatiale ; les ondes en trois dimensions sont bien plus complexes, mais en une dimension, les propriétés essentielles sont déjà illustrées.

Supposons qu'on peut écrire l'équation différentielle partielle suivante concernant un champs réel $S(x,t)$:

$$\frac{d^2 S}{dx^2} - \frac{1}{v^2} \frac{d^2 S}{dt^2} = 0$$

Nous avons utilisé la notation de la dérivée normale dans cette équation. Il s'agit de deux dérivées de deuxième ordre ; mais il y en a une qui considère que la variable est *x*, et *t* est à voir comme une constante, et l'autre qui considère que la variable est *t*, et *x* est une constante.

Si cette équation est compatible avec les lois dynamiques du champs *S*, alors *S* peut avoir le phénomène d'ondes qui se propageront à une vitesse *v*.

Considérons une fonction d'une seule variable, *u* : la fonction *f(u)*. Construisons le champs ***S(x,t) = f(x – v t)***.

Alors nous trouvons :

$$\frac{dS}{dx} = f'(x - vt) \quad \text{(on considère } t \text{ comme constante)}$$

$$\frac{d^2 S}{dx^2} = f''(x - vt) \quad \text{(on considère toujours } t \text{ comme constante)}$$

$$\frac{dS}{dt} = f'(x - vt).(-v) \quad \text{(on considère } x \text{ comme constante)}$$

$$\frac{d^2 S}{dt^2} = f''(x - vt)(-v)(-v) = v^2 f''(x - vt) \quad (x \text{ est constante})$$

Quand nous substituons ceci dans l'équation différentielle, nous trouvons :

$$\frac{d^2S}{dx^2}-\frac{1}{v^2}\frac{d^2S}{dt^2}=f''(x-vt)-\frac{1}{v^2}v^2f''(x-vt)=0$$

Notre champs *S* satisfait l'équation pour toute fonction *f(u)* !

Quelle forme de solution est-ce que cela implique ? Au moment *t = 0*, le champs prendra la forme de *f(x)* dans l'espace :

S(x,0) = f(x).

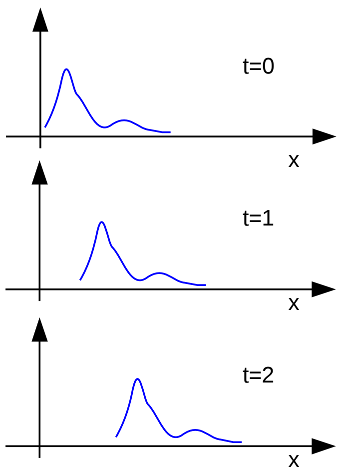

Illustration 5: Onde en une dimension.

Au moment *t = 1*, le champs prendra la forme *f(x – v)*. C'est la même forme, mais décalée de *v* dans le sens de *x*.

Au moment *t = 2*, le champs prendra la forme *f(x – 2 v)*. C'est encore la même forme, mais décalée de *2v* dans le sens de *x*.

On voit donc que cette solution du champs peut prendre une forme quelconque dans l'espace (décrite par la fonction *f(u)*), et que cette forme se propage dans le sens de *x* à une vitesse *v*. C’est une **onde**.

On peut vérifier, c'est un exercice pour le lecteur, qu'une autre solution de l'équation est : $S(x,t) = g(x + v\ t)$, avec $g(u)$ une fonction librement choisie. Cette fois, on verra que cette solution représente une forme quelconque dans l'espace (décrite par la fonction $g(u)$) et que cette forme se propage dans le sens de $-x$ à une vitesse v.

Mais on peut maintenant aussi considérer une somme :

$S(x,t) = f(x - v\ t) + g(x + v\ t)$. On peut vérifier que c'est aussi une solution de notre équation différentielle. Nous avons deux formes (décrites par $f(u)$ et $g(u)$), une qui se propage vers la droite, une autre qui se propage vers la gauche, et à tout moment, le champs total est une superposition de ces deux formes décalées. C'est l'onde la plus générale en une dimension.

Une onde est donc une forme « fixe » du champs dans l'espace, qui se propage dans une direction, à une vitesse donnée, ou une combinaison de ces propagations dans différentes directions. Dans une dimension, il n'y a que deux directions, d'où nos deux termes. Dans 3 dimensions, il y a beaucoup plus de possibilités. Les ondes électromagnétiques sont des ondes du champs électrique et magnétique qui satisfont une équation différentielle en trois dimensions :

$$\frac{d^2 S}{dx^2}+\frac{d^2 S}{dy^2}+\frac{d^2 S}{dz^2}-\frac{1}{c^2}\frac{d^2 S}{dt^2}=0$$

Maxwell avait trouvé qu'avec sa modification, le champs électrique et le champs magnétique satisfaisaient cette équation dans l'espace vide sans charges ou courants, avec pour valeur de c, celle que nous avions citée auparavant.

Dans la mesure où la lumière est justement, la propagation d’une onde électromagnétique, elle implique que dans l’espace libre sans contrainte, la lumière se propage selon une droite (une direction de propagation). Nos « lignes de vue » dans notre théorie d’observation de la géométrie physique sont ainsi expliquées finalement !

L’étude des solutions de cette équation d’onde est très riche, et peut expliquer des phénomènes d’interférence et de diffraction, mais les techniques mathématiques nécessaires pour le faire sont au-delà du niveau du cours de mathématiques du lycée.

Énergie

Travail

Nous allons introduire une notion qui semblera, au départ, être juste une astuce de calcul, et qui finira par être une des notions centrales de la physique.

Nous définissons la notion suivante : **le travail *dW* fourni par une force *F* agissant sur un point matériel** pendant une intervalle de temps *dt*, pour un observateur donné, est :

$dW = dr \, . \, F$

Ici, *dr* est le vecteur qui est le déplacement du point matériel pendant le temps *dt*, c'est à dire, le vecteur *PQ*, où *P* est le point de l'espace où se trouvait le point au début, et *Q* le point de l'espace où se trouvait le point à la fin de l'intervalle de temps *dt*. Le produit est un produit scalaire.

Le produit scalaire des deux vecteurs fait que le travail fourni est positif quand le mouvement du point va dans le sens de la force, est négatif quand le mouvement du point va dans le sens opposé de la force, et est nul quand le mouvement est perpendiculaire à la force.

L'unité de travail, on dira aussi, d'énergie, est donc : le Newton mètre, ou le $kg \, m^2 / s^2$. On donne un nom à cette unité : **le Joule**.

Énergie potentielle

On peut se demander à quoi peut bien servir cette définition. Dans le cadre de la théorie de Newton avec la force gravitationnelle, le travail de la force a une propriété remarquable, qui motive cette définition. Nous allons définir une quantité qui va avec la force gravitationnelle : l'énergie potentielle de la force gravitationnelle. Pour chaque couple de points matériels de masse m_1 et m_2, nous définissons leur énergie potentielle gravitationnelle :

$$V_{12} = -G\frac{m_1 m_2}{R_{12}}$$

Notez que cette formule ressemble à celle de la force entre ces deux particules, mais notez que dans le dénominateur, il y a *R* et non *R* carré.

Nous pouvons démontrer une propriété qui lie l'énergie potentielle gravitationnelle et le travail fait par la force gravitationnelle pour ce couple. Si dans un petit temps *dt*, la particule 1 bouge de dr_1 et la particule 2 bouge de dr_2, alors le travail fourni par la force gravitationnelle sur la particule 1 aura fait un travail de :

$dW_1 = dr_1 \,.\, 1_R\, F$, où 1_R est le vecteur unitaire qui pointe de la particule 1 vers la particule 2 ; la force gravitationnelle sur la particule 2 aura fait un travail de :

$dW_2 = (dr_2 \,.\, (-1_R))\, F$

et le travail fourni par ces deux forces :

$dW = dW_1 + dW_2 = 1_R \cdot (dr_1 - dr_2) F$

Maintenant, le produit scalaire $1_R \cdot (dr_1 - dr_2)$ est la projection sur l'axe entre particule 1 et particule 2 du mouvement de la particule 1 moins cette projection de la particule 2 : en d'autres termes, c'est la diminution de la distance entre les deux particules. Ainsi, on peut donc dire que *R* est devenu plus petit de $1_R \cdot (dr_1 - dr_2)$.

Illustration 6: Géométrie du changement de distance quand deux objets bougent.

Si nous considérons que les déplacements sont petits, alors nous pouvons estimer le changement de l'énergie potentielle après ce mouvement en prenant la dérivée de l'énergie potentielle envers *R*, et en la multipliant par $- 1_R \cdot (dr_1 - dr_2)$.

Effectivement, le (petit) changement de la valeur d’une fonction est rapproché par le (petit) changement de son argument, fois la dérivée (c’est le coefficient directeur de la tangente).

La dérivée de V_{12} par rapport à R est :

$$\frac{dV_{12}}{dR} = G\frac{m_1 m_2}{R_{12}^2} = F$$

Notez que nous trouvons la grandeur de la force que chaque particule exerce sur l’autre !

Ainsi, le changement d’énergie potentielle est donc :

$-1_R \cdot (dr_1 - dr_2)\, F$

Notez que *le changement de l’énergie potentielle entre les deux particules est égal à moins le travail fourni des forces agissant sur les deux particules.*

C’est comme si les forces gravitationnelles avaient «puisé leur travail fourni » dans leur énergie potentielle : leur énergie potentielle a diminué d’autant que les forces ont fourni du travail.

On peut généraliser cela à plusieurs particules : il suffit de prendre la somme des énergies potentielles de chaque couple (compté une seule fois, donc quand on a comptabilisé V_{58} entre la particule 5 et la particule 8, il ne faut pas ajouter encore V_{85}).

Le travail fourni sera la somme des travaux fournis par la force totale sur chaque particule. On peut facilement démontrer que pour la force gravitationnelle, la propriété reste valable.

Nous avons donc en général pour un système de particules qui exercent des forces gravitationnelles les unes sur les autres :

Le travail fourni total est égal à la diminution de l'énergie potentielle totale.

Énergie cinétique

Il y a une deuxième propriété du travail fourni, cette fois indépendamment de la nature de la force, mais qui est une conséquence du principe de Newton, que la masse fois l'accélération est égal à la force totale :

On ne le démontre pas, mais le travail fourni sur une particule est égal à l'augmentation de la quantité :

$$\frac{1}{2} m v^2$$

où m est la masse de la particule en question, et v est la vitesse de la particule en question pour l'observateur. On appelle cette quantité : **l'énergie cinétique de la particule.** L'énergie cinétique totale d'un système est la somme des énergies cinétiques de toutes leurs particules.

Nous arrivons enfin à notre propriété finale :

La somme de l'énergie totale cinétique, et l'énergie totale potentielle, d'un système de particules, qu'on appelle l'énergie totale du système, ne change pas dans le temps, pour des particules qui interagissent par gravitation.

C’est une propriété remarquable, qui permet parfois de faire des calculs rapidement. Quand nous savons qu’à un instant donné, l’énergie totale du système est *E*, alors nous savons qu’à un autre moment, cette énergie sera toujours *E*. Si nous pouvons calculer l’énergie potentielle à cet instant, alors nous pouvons en dériver l’énergie cinétique. S’il y a une vitesse inconnue dans le système, nous pouvons facilement la calculer à partir de l’énergie cinétique.

Pour l’instant, nous avons démontré cette propriété seulement pour la force gravitationnelle, mais elle s’applique aussi à d’autres forces. Vu la similitude de la force électrostatique, il y a des chances que cette propriété marche aussi pour cette force. **Il faut juste trouver la bonne formule pour l’énergie potentielle. Si on peut la trouver, on appelle cette force, une force conservatrice.**

Une force est une force conservatrice, s’il existe une expression pour l’énergie potentielle, telle que le travail fourni de cette force est égale à la diminution de son énergie potentielle.

Dans un système qui subit seulement des forces conservatrices, la propriété, que l’énergie totale ne change pas, est valide. C’est **la loi de conservation d’énergie. C’est une hypothèse que toutes les forces fondamentales sont conservatives et que la loi de conservation d’énergie est donc universelle.**

Chaleur, friction et dissipation

Si toutes les forces sont conservatrices, même les forces qui agissent sur le plan microscopique entre les particules élémentaires constituantes des objets matériels, on peut diviser l'énergie totale d'un système en deux parties : la partie « macroscopique » et la partie « microscopique ». La partie macroscopique de l'énergie totale consiste de l'énergie cinétique des mouvements des objets qu'on considère explicitement, et l'énergie potentielle des forces externes entre ces objets. La partie microscopique de l'énergie totale consiste des mouvements microscopiques des particules à l'intérieur de ces corps et l'énergie potentielle des forces internes entre ces particules.

Parfois, dans un système, il n'y a presque pas d'influence des forces extérieures sur les mouvements intérieurs. Ainsi, l'énergie totale interne reste constante, et l'énergie totale externe reste constante aussi. Nous appelons un tel système : **un système non-dissipatif**. Dans un tel système, nous pouvons totalement ignorer les forces internes et les mouvements internes. Le système solaire est un exemple d'un tel système. Ce type de systèmes est normalement relativement facile à étudier.

Dans beaucoup de cas, cependant, il y a une influence. Alors, il y a deux possibilités. Il se peut qu'il y ait **une interaction réversible** entre l'énergie interne et l'énergie externe. L'exemple typique est un ressort. Quand nous étirons un ressort, une force externe (celle qui tire sur le ressort) fournit du travail, et cela augmente l'énergie interne du ressort (cela augmente l'énergie potentielle interne du ressort). Mais plus tard, le ressort peut rendre ce travail à l'extérieur en tirant sur un objet et en livrant du travail si cet objet bouge dans le sens de la force. **Notre système est toujours non-dissipatif, mais il faudra modéliser cela avec une force qui peut avoir une énergie potentielle**, ici, la « force du ressort ». On peut, en suite, considérer cette force comme « externe » et on se retrouve dans le cas précédent où on peut oublier les interactions internes (restantes) des particules dans les objets.

Mais il se peut aussi que cela n'est pas possible, et qu'on ne peut pas simplement récupérer l'énergie qui est passée dans le système interne. Un tel système est appelé **un système dissipatif**. Il y a de l'énergie externe qui va dans l'énergie interne de façon irréversible et on ne peut pas modéliser cela avec une simple force et une énergie potentielle. Nous avons l'impression qu'il y a de l'énergie « qui se perd ». En fait, cette énergie est exactement l'énergie externe qui est convertie en énergie interne. Nous pouvons essayer de modéliser le résultat de ces interactions souvent complexes par quelques forces externes supplémentaires : **des forces de friction**, mais *nous ne pouvons pas associer une énergie potentielle à ces forces*. Les forces de friction sont donc des modèles simplifiés des forces microscopiques qui agissent sur les mouvements macroscopiques. Le travail fait par les forces de friction est justement, avec le signe inversé, l'énergie qui se perdra pour l'énergie totale extérieure, et qui sera gagnée pour l'énergie totale intérieure. Nous appelons le travail fait par les forces de friction : **la dissipation.**

Même dans le système solaire, il y a quand même un peu de dissipation, qui a des effets sur le long terme. La force gravitationnelle qu'exerce la Lune sur la Terre attire aussi les masses océaniques, ce qui donne lieu aux marées. En réaction, les masses océaniques exercent une (petite) force sur la Lune, et cette force est une force de friction. Elle fait perdre un peu d'énergie totale (externe) du système Lune-Terre, et chauffe un peu la Terre par l'action des marées sur les cotes. Ainsi, la rotation de la Lune autour de la Terre diminue, et la distance Terre-Lune augmente. La rotation de la Terre diminue aussi (les jours deviennent plus longs). Cette dissipation s'arrêtera quand la rotation de la Terre sur elle-même coïncidera avec la rotation de la Lune autour de la Terre (quand la Lune sera devenue géo-stationnaire). Mais le système solaire est quand-même largement non-dissipatif. Sur Terre, il y a beaucoup plus de friction et de dissipation, par exemple, par la friction de l'air.

Les forces de friction, pour qu'elles soient dissipatives, doivent être dans le sens opposé de la vitesse des particules sur lesquelles elles agissent.

La comptabilité de l'énergie interne, externe, et l'énergie interne qui est récupérable pour le système externe est un domaine d'étude entier, et s'appelle **la thermodynamique**.

Dans la thermodynamique, on associe, à chaque objet matériel, **une énergie interne totale *U***. Quand il y a des forces externes qui agissent sur cet objet, il faudra distinguer celles qui modifient juste le mouvement de cet objet dans l'espace (comme nous l'avons fait jusque là), et celles qui vont interagir avec les parties internes du système (par exemple, frotter, comprimer...). Dans le dernier cas, le travail fait par ces forces augmentera l'énergie interne U de l'objet.

Un cas spécial est quand deux objets ont leurs particules qui interagissent sans « force macroscopique », mais seulement par des forces microscopiques : **un objet transfère alors de la chaleur à l'autre**. On note la quantité d'énergie qui correspond à cette chaleur : *W*. L'énergie interne de l'objet qui livre la chaleur sera diminuée de *W*, et l'énergie interne de l'objet qui reçoit la chaleur est augmentée de *W*. Illustrons ces cas par des exemples simples.

1. Système non-dissipatif sans interaction entre énergie interne et externe (on peut considérer les objets matériels comme solides et oublier totalement leur énergie interne) : le système solaire (quand on oublie les petits effets de marées dont nous avons parlé).

2. Système non-dissipatif mais avec échange entre énergie interne et externe : un gaz dans un cylindre vertical avec un piston vertical. Le gaz a une énergie interne *U*. Une masse *m* est placée sur le piston. Quand la force gravitationnelle qui agit sur la masse *m* comprimera le gaz, l'énergie potentielle externe gravitationnelle diminuera, passera temporairement dans l'énergie cinétique de la masse tant qu'elle bouge, mais cela finira par s'arrêter, et finalement, c'est l'énergie interne *U* du gaz comprimé qui augmentera. Mais ce gaz agira comme un ressort, et va maintenant accélérer la masse vers le haut de nouveau : l'énergie interne du gaz *U* va diminuer, et en passant par l'énergie cinétique de la masse, l'énergie potentielle gravitationnelle augmentera. S'il n'y a pas de friction (ce qui est

difficile à faire dans ce cas), le gaz et le piston agissent comme un ressort parfait, et l'énergie interne *U* du gaz agit comme l'énergie potentielle du ressort.

3. Système dissipatif : Un vélo qui roule sur une route en pente et qui descend de la montagne en freinant, pour garder une vitesse constante. La vitesse du vélo est constante, donc son énergie cinétique est constante. Par contre, le vélo descend et son énergie potentielle gravitationnelle diminue. Normalement, le vélo devrait accélérer. Mais les plaquettes de frein du vélo exercent une force de friction sur la roue. Cette force de friction est telle que son travail est égal à l'énergie gravitationnelle perdue. Ce travail augmentera l'énergie interne du frein et de la roue (ils deviennent chaud).

4. Transfert de chaleur. On jette une pierre chaude dans un seau d'eau froide. La pierre chaude aura des particules internes qui ont plus d'énergie cinétique que les particules de l'eau, et quand les deux corps sont en contact, des forces microscopiques entre les particules d'eau et les particules de la pierre dans la zone de contact feront que les particules d'eau vont commencer à bouger plus vite, et que les particules de la pierre vont bouger moins vite. L'énergie interne U_1 de la pierre va diminuer d'un montant W, et l'énergie interne de l'eau U_2 va augmenter du même montant W. On dit qu'il y a une quantité W de chaleur qui est transférée de la pierre vers l'eau.

Notez que toutes les formes d'énergie, qu'elles soient travail, énergie potentielle, énergie cinétique, énergie interne, chaleur, ont comme unité : le Joule.

Électrodynamique et énergie

La notion d'énergie est une notion utile quand les forces sont conservatrices au niveau fondamental, car cela implique la loi de conservation d'énergie. Sans la loi de conservation d'énergie, cette notion perdrait son utilité. Nous avons vu que la force gravitationnelle est conservatrice, et il n'est pas difficile de constater que la force électrostatique est aussi conservatrice, car sa forme mathématique est la même que celle de la gravitation. Il faut juste remplacer les masses par les charges.

On peut facilement démontrer qu'un courant électrique I qui coule d'un conducteur sous potentiel électrostatique V_1 vers un conducteur sous potentiel électrostatique V_2 correspond à la force électrostatique qui fournit un travail par unité de temps :

$$P = I\,(V_1 - V_2)$$

On appelle une énergie par unité de temps : **une puissance**. L'unité d'une puissance est donc un Joule par seconde, ou $kg\ m^2 / s^3$. On donne un nom à cette unité : **le Watt**.

Si le courant coule dans un conducteur avec résistance R, alors cette puissance sera dissipée en chaleur qui augmentera l'énergie interne du conducteur. C'est le principe du **radiateur électrique**, mais aussi de **l'ampoule incandescente**.

Par contre, si nous avons un courant de particules chargées qui bougent dans le vide, les particules vont gagner en énergie cinétique. C’est le principe de fonctionnement d’un accélérateur de particules électrostatique. Les anciens téléviseurs à tube cathodique fonctionnaient sur ce principe.

A priori, la force magnétique ne devrait pas avoir un effet énergétique, puisque elle est toujours perpendiculaire à la vitesse de la particule chargée et que son travail doit donc être zéro. Mais ceci n’est pas vrai pour la force magnétique sur un courant dans un conducteur, et la force magnétique qui agit sur un conducteur peut très bien travailler sous un déplacement du conducteur. C’est ce qui se passe dans un moteur électrique. Mais il ne semble pas facile d’attribuer un potentiel à la force magnétique à première vue. Est-elle conservatrice ?

Les choses se compliquent encore plus quand nous considérons l’électrodynamique avec des ondes électromagnétiques, comme la lumière ou des ondes radio. *Nous ne pouvons plus nous en sortir simplement avec une énergie potentielle entre couples de particules matérielles.* Est-ce que la force électromagnétique n’est, alors, pas conservatrice, et est-ce que la notion d’énergie perd son intérêt quand il y a des forces électromagnétiques en jeu ?

Nous pouvons parfaitement considérer que l’électromagnétisme est une interaction conservatrice, **à condition d’accepter que le champs électromagnétique lui-même a une énergie totale associée !**

L’énergie totale du champs électromagnétique est définie comme une intégrale d’une densité d’énergie par volume d’espace, et cette densité est :

$$\frac{1}{2}\epsilon_0(E.E)+\frac{1}{2\mu_0}(B.B)$$

L’énergie totale du champs électromagnétique est donc l’intégrale, la « somme », sur tous les petits éléments de l’espace de l’univers entier, de cette densité multipliée par le volume de ces petits éléments.

Cette énergie est l’énergie totale du champs électromagnétique, et il faut l’ajouter à l’énergie cinétique des particules, et à l’énergie potentielle gravitationnelle des couples de particules, pour que la loi de conservation d’énergie reste valable.

Notez qu’en faisant cela, il n’est plus nécessaire d’utiliser le potentiel électrostatique, car c’est déjà pris en compte par l’énergie du champs électromagnétique.

Le fait que ce champs ait sa propre énergie interne indique encore plus que c’est bien une entité de la réalité physique...

Quand une source de lumière émet un pulse de lumière, l’énergie interne de cette source diminue, et cette énergie est transférée au champs électromagnétique : le pulse de lumière même contient de l’énergie. Quand ce pulse se propage dans l’espace, cette énergie accompagne ce mouvement. Finalement, quand ce pulse est absorbé par un objet matériel, cette énergie quitte le champs électromagnétique et sera transférée à l’énergie interne de l’objet en question (par exemple : il chauffe). C'est le principe du four à micro-ondes : un émetteur de micro-ondes dans l'appareil transfert de l'énergie vers le champs électromagnétique sous forme de micro-ondes. Ces ondes sont absorbées par la nourriture qui chauffe. L'air ambiant dans le four ne chauffe pas et ses parois ne chauffent pas non plus.

Si on veut comprendre intuitivement comment l'énergie du champs électromagnétique joue le rôle d'énergie potentielle dans le cadre de la force électrostatique entre deux charges, on peut le comprendre comme ceci. Imaginons d'abord que nous avons deux charges opposées q et $-q$, a une distance l'une de l'autre de 1 mètre, et au repos. Les deux charges n'ont pas d'énergie cinétique puisqu'ils ne bougent pas. Par contre, les deux charges vont causer un champs électrique, qui sera la source d'énergie du champs e.m.

Comme ce sont des charges opposées, la force électrostatique est attractive. Les charges vont accélérer l'une vers l'autre. Ils vont gagner de l'énergie cinétique (ils prennent de la vitesse), et leur distance va diminuer. Comme leur distance diminue, et qu'ils ont des charges opposées, le champs électrique va diminuer partout (quand les deux charges seraient au même point, le champs de la charge $+q$, et le champs de la charge $-q$, sont parfaitement opposés, et il n'y a pas de champs électrique du tout). Ainsi, nous voyons que l'énergie du champs e.m. diminue, et est convertie en énergie cinétique des charges.

Physique quantique

Introduction

Nous avons vu que la théorie électrodynamique de Maxwell, les observations de la vitesse de la lumière et le cadre de Newton avaient un sérieux problème, qu'Einstein va résoudre en 1905 en cassant le cadre de Newton concernant les notions de l'espace et du temps. Mais la mécanique quantique ne s'occupe pas de cela. La mécanique quantique va s'imposer pour résoudre d'autres difficultés rencontrées avec la cadre de Newton, va casser partiellement la notion de déterminisme, et va introduire de la probabilité fondamentale dans la physique ; elle va casser la notion qu'un objet matériel puisse avoir une trajectoire ; et elle va fondamentalement modifier la notion d'observation. Pour faire cela, *il faudra accepter des notions fondamentales si anti-intuitives, que les discussions de leur interprétation, un siècle après, ne sont toujours pas résolues, et différents courants philosophiques donnent des réponses différentes aux difficultés conceptuelles posées par ces notions.*

Par contre, il faut savoir que la mécanique quantique est une théorie qui a un immense succès expérimental, qui est impossible de nier. Une théorie aussi bizarre que la mécanique quantique ne serait pas considérée plus que 5 minutes sans ce succès expérimental. Pendant presque 1 siècle, des gens ont essayé de trouver des explications « raisonnables » aux notions bizarres de la mécanique quantique, sans succès. Il faudra donc faire avec.

La mécanique quantique s'est imposée **quand on a essayé de comprendre la structure microscopique de la matière**, au niveau de l'atome ; il s'est avéré aussi s'appliquer à la lumière. Quand on pensait avoir une description complète de l'électrodynamique classique, on a essayé de décrire une structure d'atome avec des constituants matériels chargés dans le cadre de la théorie de Newton et ça ne marchait pas. Il y avait des difficultés fondamentales et il y avait des contradictions avec l'expérience. Par exemple, en électrodynamique, une charge accélérée émet de la radiation électromagnétique[12]. C'est le principe de beaucoup d'appareils, du synchrotron au tube rayons-X. Toute structure d'atome qu'on pouvait imaginer, avait des charges qui tournaient autour d'autres charges ; ces charges devaient donc émettre de la radiation et perdre de l'énergie (transfert d'énergie de l'atome dans le champs électromagnétique). Nous n'observons pas cette radiation. Il est quasi-impossible de se défaire de cet effet en électrodynamique classique. Cela pose donc un problème. Ce n'est qu'un exemple parmi beaucoup de difficultés fondamentales que rencontre le cadre de Newton et l'électrodynamique quand on essaie de décrire les atomes et la constitution microscopique de la matière.

Il n'y a pas une seule théorie quantique. En fait, **la théorie quantique est un cadre**, et selon qu'on remplit ce cadre d'une façon ou d'une autre, on obtient une autre théorie. Le cadre quantique en lui-même est si ouvert, que sans autre guide que

12 Intuitivement, on peut comprendre qu'une charge accélérée correspond à un courant changeant, et donc un champs magnétique changeant, qui induit un champs électrique changeant etc...

ce cadre, presque tout et son contraire seraient possible. **Il faut donc quelque chose qui nous guide concernant ce que nous allons mettre dans ce cadre.** Ce qui peut nous guider, c'est une théorie déterministe, par exemple. Elle ne restera pas vraie, mais elle nous fournira l'inspiration pour « fabriquer » une théorie quantique.

L'application du cadre quantique à la mécanique de Newton est la mécanique quantique. C'est une théorie qui aura un immense succès dans la description de *l'atome* et de la microstructure de la matière. Par contre, **quand on applique le cadre de la théorie quantique à l'électrodynamique, nous obtenons une toute autre théorie, l'électrodynamique quantique.** Elle sera le début des théories quantiques de l*a physique des particules*, et surtout, c'est la bonne théorie des *photons*, les « particules de lumière ». Ce sont deux théories quantiques différentes, mais qu'on pourra faire vivre ensemble si on ne se pose pas trop de questions.

Assez de suspense... c'est quoi ce cadre bizarre ?

Le cadre fondamental quantique

Le cadre quantique est basée sur **la notion d'observation,** sans spécifier quelle genre d'observation, ou comment elle est faite, où exactement ce qui est observé. On part d'un observateur qui peut faire « une observation totale du monde », et qui peut obtenir des résultats différents suite à cette observation ; on part aussi de l'idée que cet observateur fait les observations les plus précises et complètes possibles conceptuellement. *C'est à* *l'utilisateur du cadre quantique de décider quel est le genre d'observation, et surtout, quel est l'ensemble des résultats conceptuellement possibles, pour fabriquer une théorie spécifique*.

En suite, le cadre quantique considère une autre observation complète et la plus précise possible du même monde, qui aura sa propre liste de résultats possibles. Si nous introduisons la même notion de temps que dans le cadre de Newton, cette deuxième observation peut être le même genre d'observation que la première, mais à un moment plus tard ; ou cela peut être une autre façon de faire une observation du monde, « au même moment ». **Le cadre quantique suppose, effectivement, qu'il y a des façons différentes, et incompatibles, de « faire une observation totale du monde »**. On peut regarder le monde d'une certaine façon, et en apprendre tout ce qui est possible, ou on peut regarder le monde d'une autre façon, et en apprendre tout ce qui est possible, et ces deux façons de faire ne sont pas compatibles ; ce qu'on apprend n'est pas la même chose, et on ne peut donc pas connaître les deux genres de réponse simultanément.

Le cadre quantique postule le principe de superposition, et la règle de Bohr :

- **tous les résultats possibles de la deuxième observation sont des « superpositions » des résultats possibles de la première observation** (nous y reviendrons) et vice versa. C'est le principe de superposition, qui est la notion de base du cadre quantique.

- De cette superposition, on peut calculer **la probabilité d'obtenir un résultat actuel de cette deuxième observation, si on connaît le résultat de la première.** C'est la règle de Bohr. Elle permet au cadre quantique de faire des prédictions expérimentales.

Ainsi, le cadre quantique ne parle plus d'un monde physique « réel » et puis, un observateur qui fait des observations de ce monde « objectif et réel » ; mais plutôt, juste **un lien entre des observations possibles et des observations réellement faites,** sans qu'il y ait une réalité derrière, à part la structure des superpositions même. Il permet de calculer juste des probabilités d'obtenir un résultat quand un autre résultat d'observation est connu. C'est comme s'il n'y avait plus d'univers, plus d'espace, plus de temps, plus de notions matérielles (comme des objets matériels) ou immatérielles (comme le champs électromagnétique). Il y a juste un observateur qui se trouve nulle part, et qui fait des observations (de quoi?) et peut calculer des probabilités d'obtenir des résultats d'autres observations. **Comme une observation faite détermine les probabilités de l'observation suivante, on dit parfois aussi qu'une observation faite indique « un état quantique » du système**, mais qui n'est donc rien d'autre qu'une « observation faite ».

Cela semble contradictoire : pour faire des observations, il faut bien qu'il y ait quelque chose à observer et ce quelque chose à observer doit bien exister objectivement, n’est-ce pas ? Mais il n’existe que des observations faites et potentielles, et rien d’autre... **Est-ce l’état quantique même qui est la « réalité physique » ?** Ici, on touche au problème fondamental de l’interprétation de la théorie quantique, et il reste d’actualité. Mais dans la pratique, nous sommes sauvés par le fait que les théories non-quantiques fonctionnent quand-même pas si mal, et que **toute théorie quantique doit pouvoir reproduire les observations « classiques » que nous avons l’habitude de faire.** Ceci nous donne une échappatoire et nous permet de « mettre l’étrangeté de la théorie quantique en boîte » : nous considérons que nos observations se font dans un monde classique, et **que la théorie quantique ne gère que la partie non-observée entre les deux observations**. Purement logiquement, ceci ne tient pas debout, bien sûr. Pourquoi la nature serait-elle classique avant et après, mais serait quantique entre deux observations ? Mais nous feront fi de cette contradiction, et ceci nous permet d’envisager la mécanique quantique de façon plus tangible et (un peu) moins étrange.

Théorie quantique pour débutant

Pour donner une idée de ce que veulent dire ces notions du cadre quantique sans avoir une machinerie mathématique trop compliquée, nous allons nous imaginer un « monde quantique » réduit à une simplicité extrême : une théorie quantique « jouet ». On part d’un observateur qui peut faire une observation de tout son univers qui est de type « chiffre » et alors, le résultat de son observation peut être 1, 2 ou 3. Il peut aussi faire une observation du type « lettre », incompatible avec l'observation « chiffre » et le résultat de son observation sera *A*, *B* ou *C*. Il faut reconnaître que ce monde est très réduit !

Mais la théorie n’est pas encore complète sans une spécification comment les observations de type « lettre » sont des superpositions des observations potentielles de type « chiffre » et vice versa. Il faut donc, dans la théorie postulée, une façon de dire : l’observation *A*, comment est-elle une superposition des observations 1, 2 et 3 ; l’observation *B*, comment est-elle une superposition des observations 1, 2 et 3 ; l’observation *C*, comment est-elle une superposition des observations 1, 2 et 3.

Notez que dans notre univers-jouet, il n’y a pas de temps, d’espace ou autre. Il y a juste la possibilité de faire des observations de type lettre ou de type chiffre.

On notera | *A* > pour décrire « l’observation A » et on notera | *1* > pour décrire « l’observation 1 » etc...

Dans notre théorie jouet, il peut être postulé que :

$$| A > = 1/\sqrt{2} \, | 1 > + \, 1/\sqrt{2} \, | 2>$$

tandis que :

$$| B > = 1/\sqrt{2} \, | 1> - \, 1/\sqrt{2} \, | 2>$$

et il s’avère que

$$| C > = | 3>$$

L'observation *A* et l'observation *B* sont tous les deux des superpositions de l'observation 1 et 2, mais avec des coefficients différents. L'observation *C* est, comme on voit, la même que l'observation 3.

Cela veut dire que si on fait une observation « lettre » et que le résultat est « *B* », et on fait maintenant une observation « chiffre », alors la probabilité de trouver un 1 sera proportionnel à $(1/\sqrt{2})^2 = 1/2$, que la probabilité de trouver un 2 sera proportionnel à $(- 1/\sqrt{2})^2 = 1/2$ et que la probabilité de trouver un 3 sera 0 : **c'est la règle de Bohr, qui dit que les probabilités des résultats sont proportionnels à la valeur absolue au carré des coefficients dans la superposition.**

Nous pouvons parfaitement calculer avec les expressions de superposition des observations : si on calcule :

$| A > + | B> = 1/\sqrt{2} | 1 > + 1/\sqrt{2} | 2> + 1/\sqrt{2} | 1> - 1/\sqrt{2} | 2>$

$= \sqrt{2} | 1 >$

Ainsi :

$|1> = 1/\sqrt{2} (| A > + | B>)$

On calcule avec des « observations » comme si c'était des vecteurs (mais pas dans l'espace physique). Nous avons établi que l'observation 1 est la superposition de *A* et de *B* comme on vient de le calculer. Si on fait une observation « lettre » après avoir fait une observation chiffre qui avait donné 1 comme résultat, nous allons trouver que la probabilité de trouver *A* est 1/2 et la probabilité de trouver *B* est 1/2. On ne peut pas trouver *C* comme résultat (probabilité zéro).

Ce petit univers-jouet n’a servi qu’a donner une idée ce que les postulats de la théorie quantique veulent dire, mais un « vrai » univers est bien plus compliqué qu’un système ou l’observation de l’univers entier dans le plus grand nombre de détails ne peut avoir que 3 résultats possibles. Notez que nous avons utilisé des coefficients réels pour la simplicité, mais **la théorie quantique permet des coefficients complexes**.

La mécanique quantique

La mécanique quantique est l’application du cadre quantique avec comme « monde observable » celui qui s’inspire du cadre de la théorie de Newton. Nous pouvons, au plus, utiliser la gravitation et l’électrostatique, et un peu de magnétostatique, mais cela nous mènera déjà loin dans la compréhension des atomes, et de la matière au niveau microscopique.

Dans la mécanique quantique, nous récupérons ainsi le cadre de *la géométrie physique et du temps*, ainsi *la notion des points matériels*, comme chez Newton. Mais sur le plan de la cinétique, **nous ne pouvons plus introduire des trajectoires**, cette notion doit être abandonnée. Cependant, *nous gardons la notion de « vitesse » d’une certaine façon, mais non plus comme la dérivée du mouvement (qu’il faut abandonner), mais comme « quantité de mouvement » et comme une observation en soi.*

Imaginons d’abord **un univers Newtonien avec une seule et unique particule matérielle**, et un observateur (oui, il aura besoin de deux autres particules pour définir un référentiel, mais on va dire que celles-là ne seront pas quantiques...). L’observateur qui va observer cet univers, peut alors observer « la position de la particule » et **cette observation peut avoir comme résultat : un des points de l’espace physique**. Ainsi, la liste des résultats possibles de cette observation est la liste des points dans l’espace (les 3 nombres réels des coordonnées).

Nous devons, cependant, aussi considérer qu’**un observateur peut observer la vitesse de la-dite particule : Alors, la liste des résultats possibles sera tous les vecteurs de vitesse imaginables**.

Classiquement, ça ne pose pas de problème de considérer qu’un observateur observe simultanément la vitesse et la position de la particule, mais en mécanique quantique, **il faut accepter que ces deux observations ne sont pas compatibles** : un observateur qui veut mesurer la position de la particule avec grande précision, ne pourra pas mesurer, sans la déranger, la vitesse de la particule avec grande précision, et un observateur qui veut mesurer la vitesse de la particule ne pourra pas le faire, sans déranger la position de la particule.

Ainsi, il faut accepter que **l’observation de la vitesse d’une particule est faite d’une superposition des observations possibles des positions de la particule, et vice versa**.

Si on ne fait pas cela, alors la mécanique quantique se réduit parfaitement à la mécanique de Newton[13]. C’est en refusant

13 Pour les connaisseurs : admettre la mesure simultanée de position et de vitesse réduit la constante de Planck à zéro.

qu'on puisse simultanément connaître la position et la vitesse d'une particule avec une précision arbitrairement grande, que la mécanique quantique sera différente de la théorie de Newton.

La superposition, en théorie quantique, se fait avec des nombres complexes. L'observation d'une vitesse sera une superposition des observations de position selon la formule suivante :

l'observation de la vitesse *v* contiendra toutes les observations de position *x*, chacune avec un coefficient égal à

$$\cos (2 \pi m (v.x) / h) + i \sin(2 \pi m (v.x) / h) = e^{i2 \pi m (v.x) / h}$$

Dans cette expression, ***h* est une constante qui s'appelle la constante de Planck**, *m* est la masse de la particule, et *i* est l'unité complexe imaginaire. Nous avons le produit scalaire entre le vecteur vitesse *v*, et le vecteur *x* de la position.

La constante de Planck est mesurée égale à :

$$h = 6{,}626\ 070\ 040 \times 10^{-34}\ kg\ m^2 / s$$

Qu'est ce que cela implique, suite aux postulats fondamentaux de la théorie quantique ? Si on a observé la vitesse d'une particule de façon très précise, et tout de suite après nous voulons observer sa position, nous aurons une superposition de toutes les positions possibles, donc tous les points de l'espace entière.

La probabilité d'observer concrètement une position spécifique est proportionnelle à la valeur absolue au carré des coefficients de superposition. C'est le deuxième postulat de la théorie quantique, la règle de Bohr.

Dans notre cas, ces valeurs sont toutes égales à 1, donc toutes les positions ont la même probabilité. **Après une mesure de vitesse précise, la particule peut se trouver n'importe où dans l'espace !**

Nous pouvons faire l'inverse aussi : une position sera une superposition de toutes les vitesses, et la formule sera très semblable, il y aura juste un signe de différent. **Après une mesure de position précise, la particule peut avoir toutes les vitesses possibles !**

C'est le principe d'incertitude de Heisenberg.

Mais il ne faut pas s'en étonner : nous avons *postulé* justement cela, que les mesures de vitesse n'étaient pas compatibles avec les mesures de position.

Souvent, nous considérons le premier cas, avec une particule qui à une vitesse (v) observée. Alors, il faut associer le nombre complexe $(\cos (2 \pi m (v.x) / h) + i \sin(2 \pi m (v.x) / h))$ à chaque position (x) de l'espace.

Associer un nombre à chaque position de l'espace fait beaucoup penser à un champs. Historiquement, au début du développement de la physique quantique, quand les principes n'étaient pas encore très clairs, *on a pensé qu'il fallait considérer une particule non comme un point, mais comme un champs, justement.* Cette mécanique quantique embryonnaire s'appelait **la mécanique ondulatoire**, et **on pensait qu'il**

fallait donc associer un champs complexe à chaque particule.

Le « champs » qui a donc associé un nombre complexe à chaque point de l'espace, s'appelle « **la fonction d'onde** » et on peut facilement voir qu'elle a une périodicité en *x* (« longueur d'onde ») de :

$$\lambda = \frac{h}{m v}$$ **la relation de de Broglie.**

Ainsi, nous voyons qu'avec une particule de masse *m*, qui bouge avec une vitesse *v* (car on a observé cela), on peut associer une onde qui a une longueur d'onde donnée par la relation de de Broglie.

La mécanique quantique, cependant, associe seulement un « champs » à une particule quand c'est la seule particule de l'univers. Effectivement, dès qu'il y a deux particules dans l'univers, l'observateur qui observe tout l'univers fera des observations de deux positions (des deux particules). Alors, toute autre observation non-compatible sera une superposition de ces observations de deux particules. Il faudra donc associer un nombre complexe (le coefficient dans la superposition) à chaque *couple* de positions. Ça, ce n'est plus un champs. C'est un objet mathématique plus compliqué, une fonction complexe sur un espace à 6 dimensions réelles : le x_1, y_1 et z_1 de la première particule, et le x_2, y_2 et z_2 de la deuxième particule. S'il y a *N* particules dans l'univers, il faudra associer un nombre complexe à chaque *N*-tuple de positions possibles : une fonction à *3N* dimensions réelles. Le fait qu'il faut considérer l'observation de toutes les positions comme une seule observation, et qu'elle prend ainsi part dans les superpositions d'autres observations, est un effet quantique aux conséquences les plus étranges et bizarres, et s'appelle **l'intrication quantique**, ou **l'enchevêtrement quantique**. Nous n'allons pas discuter de cela ici, on peut juste dire que ces prédictions ont bel et bien été en accord avec les expériences.

Cependant, *l'approche de la mécanique ondulatoire, qui ne fait qu'associer un champs complexe à chaque particule, sans tenir compte de cette intrication, donne souvent de bonnes approximations dans les calculs atomiques, et nous allons nous limiter à cela.*

Nous avons considéré les superpositions de deux types d'observation incompatibles : position et vitesse. Mais on peut aussi considérer des observations du même type, à des moments différents[14]. Là aussi, la théorie quantique postule que les observations au temps t_2 seront des superpositions des observations au temps t_1.

Ceci est plus intéressant, car cela nous permet de prédire les probabilités des observations dans le futur, quand nous avons fait une observation dans le présent. Seulement, quels sont les coefficients de superposition ?

14 Notez que le temps n'est pas une « observation », mais reste un nombre réel comme Newton le voyait, dans la mécanique quantique : le temps reste classique. On touche ici à une difficulté très très profonde dans la physique contemporaine, dont personne n'a de solution à ce jour.

Nous ne pouvons pas entrer dans les détails théoriques et mathématiques, mais il s'avère que la bonne question à se poser pour essayer d'y répondre, est la suivante :

Quel est le genre d'observation qu'il faut faire au moment t_1 pour que rien ne change dans le temps, c'est à dire, toute autre observation de tout genre dans le futur donnera les mêmes probabilités, indépendant de t_2, l'instant où on les fait ?

On peut se demander si une telle observation existe. Il s'avère que oui, et la réponse est étonnante : **c'est l'observation de l'énergie totale de chez Newton !**

Ainsi, quand on a mesuré l'énergie totale du système avec la plus grande précision possible[15] alors, toute observation ultérieure aura une distribution de probabilité indépendante du temps. Pour des raisons évidentes, on appelle les observations des énergies **des « états stationnaires »**. Un système quantique dont on connaît (on vient d'observer) l'énergie totale, « ne bouge plus ».

Mais la grande surprise, c'est que, quand on formule tout cela mathématiquement (ce qui dépasse totalement le niveau du lycée), on trouve que **pas toutes les valeurs réelles des énergies sont permises**, contrairement au cas de Newton, mais souvent, seulement des valeurs discrètes, au moins, pour des systèmes liés par des forces. Un exemple est l'atome. **C'est de là, que la théorie quantique tient son nom : l'énergie des systèmes est discrétisée ou quantifiée.**

15 Et on a fait toutes les mesures supplémentaires compatibles s'il y en a...

En suite, on peut utiliser les observations d'énergie comme une sorte de « base » pour calculer l'évolution dans le temps d'un système qui aurait subi une observation qui n'est pas compatible avec l'énergie (comme la mesure de la position par exemple). Une mesure de position sera une superposition de différentes observations d'énergie.

Voici donc comment il faut s'imaginer la description quantique d'un système microscopique comme un atome : la plupart du temps, cet atome est « stable » et *c'est donc comme si on avait observé son énergie*. Mais parfois, il y a quelque chose qui se passe de l'extérieur, et alors, l'atome change d'état stationnaire (de valeur d'énergie observée) pour rester, en suite, dans ce nouvel état. Les changements d'énergie observée seront la différence des deux niveaux d'énergie de départ et d'arrivée. En d'autres termes, il faut se dire qu'on fait, sans le savoir, régulièrement des observations d'énergie des systèmes microscopiques.

Finalement, on peut se poser la question : nous avons postulé qu'une observation de vitesse est incompatible avec une observation de position, mais cependant, c'est ce qu'on fait tous les jours avec des objets macroscopiques, non ? En fait, quand nous parlons d'une observation de position, nous voulons dire : une observation de position *parfaitement* précise, au milliardième de milliardième de femtomètre près, en principe. Mais nous pouvons lâcher lest sur la précision de la mesure de position, et essayer de mesurer la vitesse, aussi avec une précision limitée. **Une observation qui essaie de mesurer la position et la vitesse ensemble, le plus précisément**

possible telle qu'elle est faisable, est une mesure *cohérente*. *C'est la mesure quantique qui se rapproche le plus aux hypothèses classiques.* Les observations cohérentes sont, comme toute observation, une superposition des autres, et si on regarde une observation cohérente, alors elle forme **un paquet d'onde**. Un paquet d'onde ressemble à un sinus ou un cosinus, mais dans une enveloppe limitée dans l'espace. L'étendu de ce paquet dans l'espace sera la précision de la position, et la longueur d'onde aura aussi une précision limitée, et nous donnera la vitesse avec une erreur. L'incertitude de Heisenberg nous donnera une limite sur les deux précisions qu'on peut obtenir.

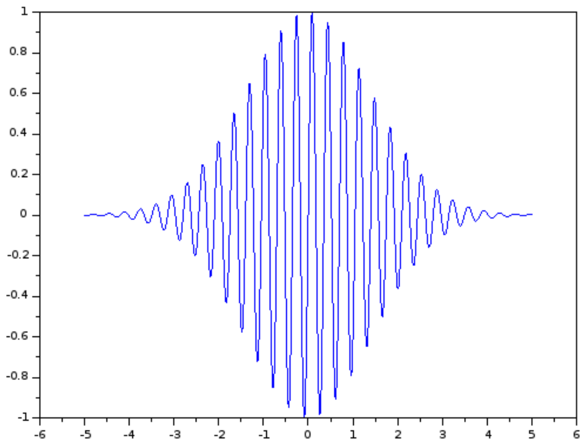

Illustration 7: Un paquet d'onde.

Pour des corps macroscopiques, la mesure cohérente est largement plus précise en principe que la précision de nos appareils de mesure en pratique, ce qui permet donc au niveau macroscopique, de considérer que nous pouvons mesurer la position et la vitesse d’un objet sans problèmes.

Une mesure cohérente de la position et de la vitesse d’une balle de ping-pong est donc parfaitement adéquate pour la mécanique classique. Mais quand on veut observer des particules microscopiques, les limitations de la mécanique quantique deviennent importantes.

C’est ce qui explique la compatibilité de la mécanique quantique et la mécanique de Newton pour les objets macroscopiques et la défaillance de la mécanique Newtonienne au niveau microscopique.

Photons

La mécanique quantique est la théorie quantique, avec comme « inspiration », la mécanique de Newton. De la même façon, **l’électrodynamique quantique est la théorie quantique, avec comme inspiration, l’électrodynamique de Maxwell.**

Historiquement, le premier effet quantique découvert est celui de l’électrodynamique quantique : Planck avait déjà observé **une sorte de nécessité de quantification de l’énergie dans les ondes électromagnétiques,** et Einstein, en 1905, postule **l’existence de photons**, mais le développement théorique s’est fait beaucoup plus tard, et la théorie qui en sort est bien plus compliquée encore que la mécanique quantique.

Les énergies possibles des ondes électromagnétiques classiques seront, dans leur version quantique, quantifiées. Dans l'électrodynamique quantique, les « pas » entre ces niveaux d'énergie sont constants pour une onde de fréquence donnée, et on appelle ce pas, un photon. **Un photon est donc une quantité d'énergie dans une onde électromagnétique d'une certaine fréquence et direction de propagation.**

Les photons peuvent devenir des « paquets d'onde » et alors on voit qu'**un « pas de quantification » commence à ressembler beaucoup à une particule matérielle**, sauf qu'elle a masse zéro. Plus les fréquences seront élevées, plus la nature de ces paquets d'onde quantifiées ressembleront à une particule. Ces paquets d'onde, étant des ondes électromagnétiques, se propagent à la vitesse de la lumière.

Un système de particules (chargées) peut donner exactement cette énergie au champs électromagnétique qui « monte d'un pas de photon » : **on dit qu'un photon est émis** ; le champs électromagnétique peut donner exactement cette énergie à un système de particules (chargées) et va descendre d'un pas de photon : **on dit que le système de particules a absorbé un photon**.

La relation de base qu'il faut retenir est que le pas d'énergie E (donc l'énergie qui va avec un photon) dépend de la fréquence de l'onde classique f tel que :

$E = h f$

où h est bien la même constante de Planck qu'en mécanique quantique.

Atomes et chimie

L'atome

L'atome le plus simple est l'atome d'hydrogène. Il est fait d'un proton, de masse importante et de charge positive, et d'un électron de charge négative et de masse légère. La charge positive du proton est égale à la valeur absolue de la charge de l'électron. Nous allons simplement tenir compte de la force électrostatique, qui sera donc attractive. *Si l'atome pouvait être décrit correctement par la mécanique de Newton, nous serions dans un cas très comparable à celui de la Terre et le Soleil.* L'électron pourrait orbiter « comme il veut » autour du proton. On pourrait choisir n'importe quelle position et vitesse initiale, et cela donnerait une trajectoire, une ellipse, avec n'importe quelle énergie totale. **Il n'y aurait pas deux atomes d'hydrogène identiques**, comme il n'y a pas deux systèmes solaires identiques dans notre galaxie. Mais on constate que tous les atomes d'hydrogène sont identiques, et ont les mêmes énergies. La mécanique de Newton ne peut donc pas s'appliquer. Il faut utiliser la mécanique quantique ; par contre, la situation de l'attraction électrostatique reste son inspiration.

Comme nous avons vu, à partir de la formulation de l'énergie totale dans le cas du problème de Newton, nous pouvons calculer les observations d'énergie possibles pour un système quantique. Ce calcul dépasse le niveau du lycée, mais il est parfaitement faisable : on peut ainsi calculer quels sont les « états stationnaires » de l'électron dans un atome d'hydrogène.

Il s’avère que les valeurs sont : *-13.6 eV / n^2* où *n* est un nombre naturel, et l'unité *eV* (électronvolt) est une unité d'énergie égale à *1.602 10^{-19}* Joule, inventée parce qu'elle est plus pratique quand on se trouve au niveau atomique.

Il se trouve qu'on peut faire un certain nombre d'observations d'énergie identiques, mais différentes d'une autre façon, parce qu'elles peuvent être complétées par d'autres observations compatibles (par exemple un aspect de la rotation de l’électron autour du noyau, mais nous ne pouvons pas aller dans les détails). Ainsi, pour l'énergie *-13.6 eV* (donc, *n = 1*), on trouve 1 observation possible ; pour l'énergie *-13.6 eV / 4* (donc *n = 2*), on trouve 4 observations possibles ; pour l'énergie *-13.6 eV / 9* (donc *n = 3*), on trouve 9 observations possibles etc.

A chaque observation complète possible correspond une superposition des observations « position » de l'électron, donc une « onde » spécifique, comme dans la mécanique ondulatoire. Ces « ondes » sont parfaitement calculables, et elle nous apprennent quelle est la probabilité de trouver l'électron à une position donnée dans l'atome, si on fait une mesure de position, par la règle de Bohr. Ces « densités de probabilité » dans l'espace s'appellent **des orbitales**.

L' orbitale pour *n = 1* est une sorte de boule (orbitale « s »).

Les 4 orbitales pour *n = 2* sont de deux sortes : une sorte de boule, et trois « haltères » perpendiculaires (orbitales « p »).

Les 9 orbitales pour *n = 3* sont de trois sortes : une sorte de boule, trois sortes de « haltères » perpendiculaires, et puis, 5 formes plus compliquées dans l'espace (orbitales « d »).

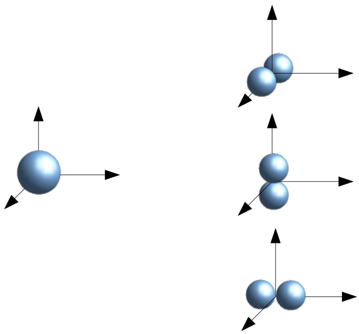

Illustration 8: Orbitales s et p de l'atome hydrogène.

Notre électron peut « choisir » une de ces orbitales, et idéalement, comme ce sont des états stationnaires, notre électron va rester là jusqu'à ce qu'il y a quelque chose qui va perturber ce système, et le choix de l'orbitale déterminera l'énergie de l'atome hydrogène.

Dans la pratique, l'électron se trouvera la plupart du temps dans l'orbitale avec la plus basse énergie, donc $n = 1$. C'est pour cela que tous les atomes d'hydrogène sont identiques.

Si nous avons un atome plus sophistiqué que l'atome d'hydrogène, le noyau contiendra plusieurs protons et des neutrons, aura une charge positive de Z fois la charge d'un proton, et l'atome aura, normalement, aussi Z électrons.

Si on ne tient pas compte des répulsions entre les électrons, et on considère juste l'attraction entre chaque électron et le noyau, nous avons « Z fois un atome d'hydrogène ». Dans l'équivalence du système solaire, c'est comme si le soleil était Z fois plus massif, et qu'il y avait Z planètes qui orbitent autour au lieu de une seule. Les énergies observables calculées seront Z^2 plus grandes, donc si on remplace le *-13.6 eV* de l'atome hydrogène par *- 13.6* Z^2 *eV*, nous avons l'énergie pour un électron dans le système dans l'orbitale $n = 1$. Dans la mesure où nos approximations sont tenables, on pourrait croire que chaque électron peut « choisir » son orbitale, et que la plupart du temps, tous les électrons se trouveraient dans la même orbitale avec $n = 1$. Mais il y a un effet de la mécanique quantique (un effet d'intrication si on veut), **qui empêche plus que deux électrons de se trouver dans la même orbitale.** C'est **le principe d'exclusion de Pauli**.

Ainsi, on peut « loger » deux électrons dans l'unique orbitale $n = 1$, mais pas d'avantage. En suite, nous avons « 8 cases » dans les orbitales de $n = 2$. Et nous avons 18 cases dans les orbitales de $n = 3$.

La répulsion mutuelle des électrons que nous avions négligée, joue quand-même un rôle, et cela va changer les valeurs des énergies. Mais grossièrement, la structure d'organisation des « cases » pour des paires d'électrons reste valable, aussi dans les atomes avec plusieurs électrons.

Normalement, un atome va « ranger ses électrons » de telle façon que l'atome donnera comme observation d'énergie, la plus basse valeur possible avec certitude : on dit que l'atome est dans son **« état fondamental »**. Il faudra des actions extérieures pour que l'atome se trouve dans un état avec une plus grande énergie (c.a.d. pour qu'une mesure d'énergie a une probabilité importante de donner comme résultat, une énergie plus grande que la plus basse). On parle alors **d’un atome « excité »**.

Liaisons chimiques

Nous avons considéré le problème d'un seul noyau, ce qui donne lieu à des états stationnaires correspondant à ceux des atomes. Quand il y a deux noyaux et deux électrons, **il y a aussi des états stationnaires où l'onde de l'électron enveloppe les deux noyaux**, qui eux, doivent se trouver dans des états semblables à des états cohérents à une distance relativement courte. Cet état stationnaire correspond à une énergie plus basse que les deux atomes séparément. Cet état est alors une liaison chimique entre les deux atomes.

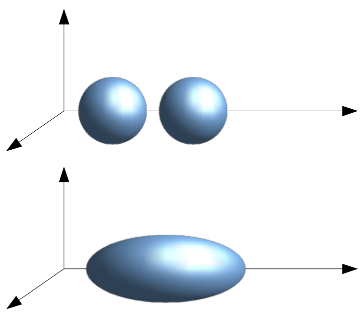

Illustration 9: Orbitale enveloppant deux noyaux d'hydrogène.

Toute la théorie de la liaison chimique entre atomes trouve son origine dans l’existence de ces états stationnaires avec

une énergie plus basse que celle des atomes individuels. La différence d'énergie est **l'énergie de liaison**.

Cependant, il y a aussi des états stationnaires où il y a trois ou plus de noyaux qui interviennent, et des orbitales qui enveloppent trois ou plus de noyaux, qui donnent des niveaux d'énergie encore plus basses que si on avait des liaisons 2 à 2 entre ces noyaux. Cela a posé longtemps problème en chimie, mais maintenant on appelle cela **résonance ou mésomérie** et en chimie on fait comme si c'était des liaisons 2 par 2 qui se partagent ; mais ce n'est rien d'autre que des orbitales enveloppant trois où plus de noyaux, de la même façon que la liaison chimique standard enveloppe 2 noyaux. La différence entre l'énergie de ces orbitales à trois ou plus de noyaux, comparé à ce qu'on obtient avec juste des liaisons 2 à 2, est appelée **l'énergie de résonance**. L'exemple standard est le benzène, où il y a des orbitales qui enveloppent les 6 atomes de carbone de l'anneau.

Finalement, nous pouvons dire un mot sur l'orientation des liaisons dans l'espace, mais nous allons limiter la discussion à des atomes qui ont des électrons seulement dans les orbitales de $n = 1$ et de $n = 2$.

Les liaisons chimiques (2 à 2, et mésomères, donc à 3 atomes ou plus) peuvent être calculées à partir des orbitales des atomes individuels, mais il faut choisir les bons. Le plus simple, c'est la liaison de deux atomes hydrogène. Comme nous avons juste les orbitales « boule » de n = 1 par atome, leur combinaison mathématique fait une sorte de balle de rugby contenant les deux noyaux. Cette liaison est appelée « **liaison sigma** ».

Mais nous avons vu qu'au niveau *n = 2*, nous avons 4 orbitales : une « boule » et 3 « haltères ». Il y a 4 orbitales différentes, parce que nous avons complété l'observation « énergie » par d'autres mesures compatibles, qui avaient quelque chose à voir avec la rotation de l'électron autour du noyau ; mais nous aurions pu choisir une autre mesure complémentaire. *Il s'avère que pour faire les liaisons chimiques, il vaut mieux considérer une autre mesure complémentaire, et alors, les orbitales auront d'autres formes, qui sont des combinaisons linéaires des 4 orbitales que nous venons de mentionner.* Et il y a 3 cas possibles. On appelle ces 3 cas de mesures complémentaires (et donc, de combinaisons des orbitales différentes), **les 3 modes d'hybridation**.

Premier cas : **on combine les 4 orbitales** de façon symétrique. Cela donne 4 nouvelles orbitales du niveau *n = 2*, qui ressemblent à une haltère déformée, avec une grosse bulbe, et une petite bulbe ; mais ce qui est intéressant, c'est de savoir que ces 4 orbitales sont orientées vers les sommets d'un tétraèdre. C'est la forme qui faut choisir quand l'atome ne fera que des liaisons simples, 2 à 2. Ce cas s'appelle l'hybridation sp^3. Les liaisons formées seront toutes des liaisons sigma.

Illustration 10: Hybridation sp^3*: on combine un orbitale s et trois orbitales p en 4 orbitales* sp^3*.*

Deuxième cas : **on garde une orbitale « haltère » et on combine la boule et les deux autres haltères en 3 nouvelles orbitales**. Nous aurons à nouveau des orbitales « grosse bulbe, petite bulbe », mais cette fois, elles sont orientées dans le même plan, perpendiculaire à l’orbitale haltère que nous avons gardé, et vers les sommets d’un triangle équilatéral. C’est la forme qu’il convient de choisir quand l’atome fera **une liaison double**, ou contribuera une paire d’électrons à une liaison résonance. Ce cas s’appelle l’hybridation sp^2. Les liaisons faites avec les orbitales « grosse bulbe/petite bulbe » seront des liaisons sigma, et l’altère qui reste fera un autre type de liaison (double) : **une liaison dite « pi »**.

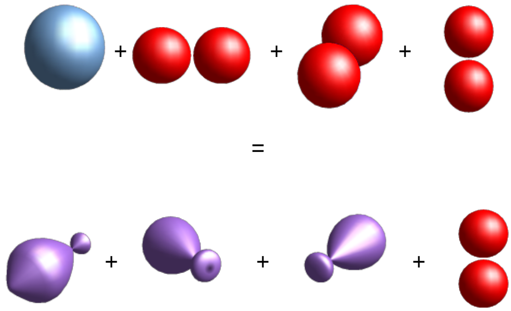

Illustration 11: Hybridation sp^2*: on combine un orbitale s et deux orbitales p en trois orbitales sp*^{2}*. Le troisième orbitale p reste inchangé.*

Troisième cas : **on garde deux orbitales « haltère » et on combine la boule et la seule orbitale altère qui reste** : cela fait à nouveau deux orbitales « grosse bulbe, petite bulbe », mais cette fois, orientées dos-à-dos sur la droite, perpendiculaire aux deux haltères que nous avions gardées. C'est la forme qu'il convient de choisir, quand l'atome fera deux liaisons doubles, ou une liaison triple, ou quand il contribuera deux paires d'électrons dans une liaison de résonance. Les liaisons faites avec les orbitales « grosse bulbe/petite bulbe » seront des liaisons sigma, et les liaisons faites avec les haltères, seront des liaisons pi. On appelle ce cas : hybridation *sp*.

Les orbitales « grosse bulbe, petite bulbe » formeront la liaison chimique 2 à 2 principale entre deux atomes, selon une droite, « grosse bulbe contre grosse bulbe ». C'est ce qu'on appelle une liaison sigma. Ceci explique donc les angles des liaisons chimiques : premier cas : angle de 109 degrés, deuxième cas : angle de 120 degrés, troisième cas : angle de 180 degrés. Leur liaison est comme celle des atomes hydrogène : une sorte de balle de rugby contenant les deux noyaux.

Les haltères qui restent, formeront des orbitales de double ou de triple liaison, ou des orbitales de résonance, avec les haltères parallèles de l'autre atome. Il faut se les imaginer comme une « double saucisse » (une seule liaison) parallèle à l'axe de liaison, des deux cotés de celle-ci. C'est la liaison pi.

Finalement, **dans les cristaux, il y a des orbitales qui enveloppent tous les atomes du cristal**. C'est une sorte d'énorme liaison chimique, et on pourrait voir le cristal en entier comme une sorte d'énorme « molécule ». C'est **la liaison métallique**.

Interaction avec la radiation

Un système de noyaux et d'électrons, comme un atome, une molécule, un cristal, … a donc des états stationnaires avec des niveaux d'énergie, les seules énergies possibles du système (les seuls résultats de mesure d'énergie possibles si on fait une observation d'énergie).

Quand un tel système interagit avec le champs électromagnétique, il peut seulement le faire avec des différences d'énergie entre deux valeurs admises, et le champs électrodynamique quantique ne peut accepter que des énergies de photons « entiers ». Ainsi, si un électron descend d'un niveau vers un niveau plus bas, un photon correspondant à la bonne énergie (et donc à la bonne fréquence) est émis ; si un photon arrive sur le système, il peut être absorbé par le système. Alors, il faut qu'il y ait un électron qui « monte » avec la même énergie.

Il y a un effet plus subtil du champs électrodynamique quantique sur tout système d'électrons. On ne peut pas le décrire d'avantage, mais l'électrodynamique quantique résulte en une sorte de « bruit » qui perturbe un tout petit peu tout système chargé. Concrètement, cela a pour effet qu'un système d'électrons, comme un atome, qui se trouve dans un état stationnaire excité (et qui devrait, normalement, y rester, comme c'est un état stationnaire), va finir par émettre un photon pour amener le système d'électrons vers son état fondamental (la plus basse énergie). En d'autres termes, autant que le système purement « mécanique quantique » devrait maintenir indéfiniment un état stationnaire, même excité, le « bruit » du champs électrodynamique rend cet état instable. *C' est une des raisons pour lesquelles un système électronique a tendance à se trouver dans son état fondamental,* sauf s'il absorbe des photons.

Comme il faut adéquation entre l'énergie des photons absorbés ou émis, et les différences d'énergies entre les états stationnaires du système électronique, un système électronique quantifié ne peut, en général, qu'absorber, ou émettre, de la radiation de certaines fréquences. **C'est l'origine du spectre d'absorption, et du spectre d'émission, de systèmes matériels.**

Relativité

Introduction

A la fin de notre discussion de l'électrodynamique, nous avions compris que la théorie de Maxwell prévoyait des ondes électromagnétiques qui se propageaient à une vitesse qui se déduisait de deux constantes : la permittivité et la perméabilité du vide, et que le résultat était, par surprise, égal à la vitesse de la lumière, ce qui renforçait l'idée que la lumière est aussi une onde électromagnétique. Le fait que cette vitesse est fixe dans la théorie faisait d'abord assumer qu'il n'y avait qu'un seul référentiel dans lequel cette théorie pouvait s'appliquer, étant donné la règle d'addition de vitesses dans la cinétique de Newton, ce qui pouvait nous inspirer l'idée que ce référentiel est celui de l'espace absolu. Mais **des observations expérimentales de la vitesse de la lumière ont indiqué que cette vitesse est la même pour tout observateur inertiel, ce qui est totalement incompatible avec cette règle d'additions de vitesses.**

Le dilemme fut finalement résolu par Einstein en 1905, mais pour cela, **Einstein devait abandonner l'idée d'un espace absolu, et d'un temps absolu et universel**.

La règle d'addition de vitesses de la cinétique de Newton dit que si quelque chose a une vitesse v pour l'observateur 1, et que l'observateur 1 a une vitesse V pour l'observateur 2, alors ce quelque chose aura une vitesse $v' = v + V$ pour l'observateur 2.

C'est une conséquence directe du fait qu'on suppose que l'observateur 1 et 2 mesurent les mêmes intervalles de temps entre deux événements, et qu'ils mesurent la même distance entre deux points au même moment.

Einstein veut modifier la règle de l'addition de vitesses de telle façon que si la vitesse *v* est celle de la lumière, alors *v'* sera aussi celle de la lumière. *Alors, il faut que les deux observateurs ne mesurent pas le même temps entre deux événements, et/ou que les deux observateurs ne mesurent pas la même distance entre deux points au même moment.*

Espace-temps et intervalle

Einstein va considérer qu'il n'y a donc pas un espace absolu Euclidien, dont tous les observateurs font un isomorphisme vers leur système de coordonnées (sinon les distances doivent être les mêmes!) ; il va aussi considérer que le temps observé par deux observateurs entre deux événements ne doit pas nécessairement être le même : on oublie donc aussi le temps absolu. Par contre, *Einstein garde encore l'idée qu'un observateur observera bien les points matériels dans un espace de coordonnées Euclidien en 3 dimensions, et qu'il observera bien un temps qui est un nombre réel qui avance*, mais ces observations seront liées d'une façon plus subtile à « ce qui est réellement dehors » qu'un isomorphisme Euclidien en 3 dimensions (l'espace absolu), et un autre isomorphisme en 1 dimension (le temps absolu). Il y aura bien un isomorphisme, mais un qui « mélangera le temps et l'espace ».

Einstein va effectivement considérer que les choses qui sont « physiques », sont les événements mêmes. Un « événement » existait déjà chez Newton, mais on n'en avait pas saisi l'importance. Un événement est quelque chose d'observable **qui se passe à un endroit, à un moment**. C'est donc la position et le temps de quelque chose qui se passe. Mais si, comme chez Newton, il y avait un temps absolu, et un espace absolu, un événement était juste la combinaison d'un point de l'espace absolu, et un moment du temps absolu. Einstein va considérer que le cadre dans lequel les choses se passent, ne sont pas une juxtaposition d'un espace absolu, et d'un temps absolu, séparément, mais que c'est un seul cadre : **l'espace-temps**. **L'espace-temps sera absolu**, et 'fixera' les événements, mais ne consiste pas d'un espace absolu, et d'un temps absolu séparément.

Einstein postulera qu'un observateur inertiel verra donc bien son espace Euclidien en 3 dimensions, et son temps en 1 dimension, mais qu'il faut considérer cela comme un espace de coordonnées en 4 dimensions réelles, presque comme un espace de coordonnées Euclidiens, sauf que la « distance » n'est pas la distance Euclidienne mais sera autre chose.

Si on appelle les 4 coordonnées de notre observateur : x,y,z,t (où x,y,z sont les coordonnées dans son « espace » et t est son « temps »), alors, **la distance qu'Einstein va proposer**, est :

$$c^2 (t_1 - t_2)^2 - (x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2 - (z_1 - z_2)^2$$

Il appelle cette quantité : **l'intervalle entre deux événements**. Mathématiquement, ce n'est pas une distance, car une distance est un nombre réel positif, et cette expression peut devenir négative ; les mathématiciens appellent cela **une pseudo-distance**. Si les signes pour les termes de l'espace étaient tous positif, ce serait une distance, mais le signe de certains termes est bien négatif.

Einstein postule que la structure de l'espace-temps absolu est semblable à un espace Euclidien, sauf qu'il faut utiliser cette pseudo-distance, qui est donc « physique et invariante », à la place de la distance Euclidienne normale.

On appelle un tel espace, **un espace Minkowski**, qui se différencie donc d'un espace Euclidien, justement, par cette structure de pseudo-distance, à la place de la distance Euclidienne. L'espace et le temps d'un observateur inertiel seront un isomorphisme entre un système de 4 coordonnées (x,y,z,t), et cet unique espace-temps de Minkowski absolu. **Tous les observateurs inertiels trouveront la même intervalle entre deux événements.**

Cela impose, comme on peut vite s'en rendre compte, que s'il y a quelque chose qui bouge à la vitesse de la lumière pour un observateur, tous les observateurs (inertiels) seront d'accord que c'est la même vitesse. Par exemple, si l'événement 1 est « ma lampe émet un flash de lumière » et l'événement 2 est « Paul a vu arriver mon flash de lumière », l'intervalle entre ces deux événements sera zéro pour un observateur, car les derniers 3 termes seront la distance Euclidienne dans l'espace que la lumière aura traversée, au carré, et si cette lumière va à la vitesse c, cela aura pris un temps $c\ (t_2 - t_1)$. Einstein postule que cette intervalle doit être la même pour tous les observateurs, donc tous les observateurs vont trouver zéro, et donc, un rapport de la distance (pour eux) sur le temps (pour eux) égal à c.

Einstein postule que tout observateur inertiel aura un système de coordonnées et de temps qui sera un isomorphisme avec sa structure de l'espace-temps absolu. C'est le même genre de notion que Newton avait introduit avec son espace absolu : tous les observateurs avaient des isomorphismes entre leur système de coordonnées de leur vision de l'espace et de l'espace absolu comme espace Euclidien, ce qui faisait que tous les observateurs étaient en accord sur les distances Euclidiennes entre les points au même moment ; *mais Newton avait un problème pour « fixer » cet espace absolu entre deux moments différents.* Comme Einstein inclut le temps dans son espace-temps, il n'y a pas de problème pour « fixer » l'espace-temps, car on ne peut pas considérer « un autre moment » **- le temps fait déjà partie du système !**

L'espace-temps est donc bel et bien absolu, et on n'a pas le problème qu'un observateur « bouge » vis-à-vis de cet espace-temps, car hors de l'espace-temps, il n'y a pas de temps, et il n'y a rien à bouger.

Le problème se réduit donc à trouver les isomorphismes de cette structure avec cette pseudo distance. Chez Newton, on rappelle, les isomorphismes entre deux observateurs inertiels (on ne considère pas les axes non-parallèles) étaient :

$x' = x - V\,t$

$t' = t - t_0$

On appelle cette transformation **une transformation de Galilée**. Elle transforme une observation en espace et temps chez Newton d'un événement par un observateur *O* en une observation en espace et temps du même événement par un observateur *O'*. *V* est la vitesse de l'observateur *O'* par l'observateur *O*.

Les transformations de Lorentz

Les isomorphismes de la structure de l'espace-temps qui préservent donc l'intervalle d'Einstein, sont relativement faciles à démontrer, mais les formules sont un peu compliquées sauf si on se place dans *le cas où les deux observateurs ont des axes parallèles, et que l'observateur 2 bouge le long de l'axe X à une vitesse V selon l'observateur 1, et les deux observateurs « démarrent » leur temps quand ils se croisent.*

On trouve :

$x' = \gamma\,(x - V\,t)$

$y' = y$

$z' = z$

$t' = \gamma(t - V\,x\,/\,c^2)$

où $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1 - \dfrac{V^2}{c^2}}}$

On peut constater que $c^2\,t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = c^2\,t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2$ ce qui était bien le but de cette transformation ; il faut aussi noter que pour des vitesses v, $V << c$, et des intervalles de temps qui permettent la lumière largement d'arriver des objets observés, que :

$\gamma \approx 1$ et que :

$x' \approx x - V t$

$t' \approx t$

Donc pour des objets pas trop loin des observateurs (comparé à la distance que peut parcourir la lumière pendant les intervalles d'observation) et des vitesses entre les observateurs bien plus petites que la vitesse de la lumière, les transformations de Lorentz sont très proches des transformations de Galilée.

Contraction de la longueur

Considérons une barre de fer qui est au repos pour l'observateur O, dans la direction de l'axe X, avec une extrémité à l'origine, et l'autre donc, à x = L, la longueur de la barre pour un observateur au repos vis-à-vis de la barre.

L'observateur O', pour qui la barre bouge à une vitesse v, va mesurer la distance entre les deux extrémités de la barre *au même moment pour lui*, disons, au moment $t' = 0$.

Il verra la première extrémité à $x' = 0$, alors $x = 0$, $t = 0$. Mais la deuxième extrémité, pour $t' = 0$, aura $t = v L / c^2$, avec $x = L$, ce qui nous donne $x' = \gamma (L - v^2 L / c^2) = L / \gamma$.

En d'autre termes, pour l'observateur, qui voit la barre bouger à la vitesse v, elle a une longueur plus petite que L, à savoir L/γ.

Un objet en mouvement est donc plus court dans sa direction de mouvement qu'au repos.

Dilatation du temps

Considérons une montre au repos pour l'observateur *O* (à l'origine). Donc $x = 0$. L'observateur *O'* regarde cette montre, et verra qu'elle indique la valeur *T*, quand la montre de *O'* indiquera $\gamma.T$. En d'autres termes, quand l'observateur voit que la montre de *O* indique « 1 heure », pour lui, *O'*, déjà 5 heures ont écoulées. **Le temps de *O* écoule plus lentement comme observé par *O'*.**

Temps propre

Pour tout objet matériel, on appelle « son temps propre », le temps écoulé comme mesuré par un observateur pour qui l'objet est au repos. Le temps propre d'un objet en mouvement écoule toujours plus lentement que le temps de l'observateur qui voit bouger l'objet.

Bonus : thermodynamique

Les notions de thermodynamique ne font pas officiellement partie du programme du lycée. Cependant, des notions thermodynamiques (comme température, équilibre...) sont régulièrement mentionnées en chimie et en SVT, et ils formeront le départ pour tout ce qui concerne chimie dans l'enseignement supérieur qui est scientifiquement orienté. Il est étrange d'avoir des notions de relativité, mais de ne pas savoir ce qu'est un équilibre thermodynamique ; de savoir ce qui se passe quand on s'approche de la vitesse de la lumière dans un vaisseau totalement imaginaire, mais de ne pas savoir pourquoi la glace fond. Voici donc un bonus qui me semble indispensable...

Travail, chaleur, énergie

A priori, la thermodynamique se met dans le cadre de la physique classique de Newton. Cependant, il s'avérera que ses principes resteront valable au-delà de ce cadre.

Dans le cadre de Newton, nous avons vu que, si les forces sont toutes “conservatrices”, c.a.d. permettent l'introduction d'une énergie potentielle, alors une propriété remarquable peut être déduite: **la loi de conservation d'énergie**. Un système mécanique aura une quantité d'énergie totale, qui sera la somme des énergies cinétiques et potentielles de ses constituants (points matériels), et cette quantité ne changera pas dans le temps.

Pour des systèmes macroscopiques, les “corps mécaniques” que nous considérons sont composés d’une quantité énorme de points matériels constituants, dont nous ne pouvons pas décrire le mouvement en détail. Si nous considérons un projectile sous l’influence, disons, de la gravitation, nous ne pouvons pas tenir compte des mouvements individuels des atomes, voir des électrons, protons et neutrons, dont est fait ce corps macroscopique. Ainsi, *nous divisons le mouvement du corps en un mouvement macroscopique (le mouvement de son centre de gravité, et éventuellement, sa rotation), et les mouvements autour de ce centre de gravité de ces particules composantes, que nous appellerons des mouvements microscopiques*. Le bilan de son énergie totale est ainsi aussi coupé en deux parties: une contribution vient de son mouvement macroscopique et les forces externes qui agissent sur ce corps, et puis, la contribution qui vient des mouvements microscopiques et des forces internes.

Cependant, nous ne pouvons pas toujours les séparer parfaitement, et **les forces extérieures peuvent modifier les mouvements microscopiques, et vice versa.**

Les transformations des mouvements microscopiques en mouvements macroscopiques et vice versa, est exactement le domaine de la thermodynamique. Bien qu’il faut garder en tête l’explication physique par des mouvements microscopiques, et donc par une explication mécanique au niveau du monde microscopique, la thermodynamique dite classique fait fi de cette vision mécanique microscopique, et

postule des lois universelles, dont nous pouvons, intuitivement, comprendre l’explication mécanique.

Si le monde microscopique et le monde macroscopique n’interagissent pas, nous sommes dans le domaine de la mécanique de Newton “simple”. Nous pouvons négliger l’existence de la microstructure de la matière. C’est le cadre typique des exercices de mécanique.

Si nous avons des forces extérieures qui modifient l’état énergétique des systèmes microscopiques, nous avons un transfert d’énergie microscopique vers le système macroscopique, ou inversement. C’est le cas de frottements et autres.

Finalement, si nous avons deux corps macroscopiques en contact, leurs interactions microscopiques peuvent modifier leurs contenus énergétiques microscopiques, et nous pouvons avoir un transfert d’énergie microscopique d’un corps vers un autre: c’est le transfert de chaleur.

Dans un système réel, nous pouvons avoir les 3 types d’interaction en même temps. **Il est pris comme convention en thermodynamique d’éliminer la partie “purement macroscopique”.** Ceci n’est pas une approximation ou une négligence: nous ne considérons pas les forces externes qui accélèrent le centre de gravité du corps en question, et nous ne tenons pas compte de son énergie potentielle ni cinétique. En éliminant ces deux aspects, nous ne commettons aucune erreur, car selon la deuxième loi de Newton, ces deux aspects sont équivalents.

Ainsi, la seule énergie à considérer, sera l'énergie microscopique du corps, et les seules forces à considérer, seront les forces agissant sur le système qui n'accélèrent pas le centre de gravité (ni la rotation) mais qui modifient l'état interne du système. Ce sont par exemple des forces de frottement, ou des forces de pression qui compriment le corps.

La première loi

La première loi de la thermodynamique n'est rien d'autre que la loi de conservation d'énergie.

Elle va ainsi:

1. **A chaque corps est associé une énergie interne *U***
2. **L'énergie interne *U* change comme *dU = dQ + dW***

Ici, *dU* est le changement d'énergie interne, ***dQ* est la chaleur reçue par le corps, et *dW* est le travail exercé sur le corps par des forces externes** (qui n'accélèrent pas le centre de gravité donc).

La première loi dit que l'énergie interne d'un corps **est une variable d'état**, ce qui veut dire que si le corps revient dans le même état, la variable doit revenir à la même valeur.

Un processus cyclique est un suite d'opérations faite sur un corps qui peut se répéter à l'infini. Ceci implique donc que le corps retourne régulièrement à un même état.

On peut démontrer ainsi **l'équivalence d'une quantité de travail, et une quantité de chaleur**, si pendant ce processus, une quantité de travail *W* est fournie et une quantité *Q* de chaleur est extraite: effectivement, alors $W = Q$, car le dU total du processus est zéro (le processus étant cyclique).

Un exemple est: une force frotte sur un corps (qui chauffe), suivi d'une extraction de chaleur de ce corps pour le remettre dans son état initial. Le travail fourni par les forces de frottement doit alors être égal à la quantité de chaleur extraite.

Un système qui n'échange pas de chaleur avec un autre système, est appelé **un système adiabatiquement isolé**. Il peut toujours subir des forces mécaniques, mais il ne peut pas recevoir ou perdre de la chaleur.

Quand des corps interagissent sans échange de travail, ils peuvent seulement échanger de la chaleur. Ceci se passe quand on met deux corps en contact, sans que des forces macroscopiques travaillent, c.a.d. sans que leurs points d'action bougent.

Température et gaz parfaits

On constate que deux corps peuvent seulement échanger de la chaleur dans un sens qui est déterminé uniquement par une grandeur qui s'appelle "la température": **la chaleur peut seulement être transportée (sans qu'il y ait des forces mécaniques en jeu) d'un corps de température élevée vers un corps de température moins élevée, et ceci indépendamment de la nature des corps.** Il est ainsi possible de construire un appareil de mesure, un **thermomètre**, qui indiquera la température d'un corps donné quand il n'y aura plus d’échange de chaleur entre le thermomètre et le corps en question. Tout autre corps à cette même température ne pourra, alors, pas échanger de la chaleur avec le premier corps non plus. A priori, on peut choisir l’échelle de température (par la construction de son thermomètre) comme on veut, du moment où on respecte l’ordre: si un corps *A* est à température *T* et un autre corps *B* est à température *t* inférieure à *T*, alors la chaleur ira de *A* vers *B* et jamais de *B* vers *A*. Mais nous allons voir que certaines échelles de température ont plus de sens que d’autres.

Il y a des corps matériels qui sont des gaz et certains gaz ont un comportement universel. On les appelle **les gaz parfaits**. Les gaz nobles sont des gaz parfaits dans beaucoup de circonstances, mais aussi l’oxygène, l’azote et bien d’autres gaz.

On avait constaté qu’un corps de gaz parfait, à une température donnée, respecte une relation entre le volume qu’il occupe, et la pression mécanique qu’il exerce sur son conteneur:

$$p \times V = constante$$

pour un corps gazeux donné et pour une température donnée. C’est la loi de Boyle-Mariotte.

En d’autres termes, si on a un corps gazeux qui occupe un volume V_1 et exerce une pression P_1, et si on change le volume de ce corps en V_2 en ramenant la température à celle d’avant, alors la pression P_2 sera telle que : $P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$

Il convient de noter que la valeur de cette expression constante dépendra du corps gazeux et de la température.

La surprise, cependant, est qu'**on peut choisir une échelle de température telle que cette constante devient proportionnelle à la quantité de matière de gaz** (le nombre de mol) **et à cette température**, et sera indépendante de la nature exacte du gaz.

Ainsi, la remarquable **loi des gaz parfaits** est:

P x V = N x R x T

où:

- *P* est la pression exercée par le gaz
- *V* est le volume occupé par le gaz
- *N* est le nombre de mol de gaz
- *T* est la température dans la bonne échelle
- *R* est une constante universelle ($8{,}3144621\ JK^{-1}mol^{-1}$)

Cette "bonne échelle de température" devient, ce qu'on appelle, **la "température absolue". Son unité est le Kelvin.**

C'est donc extrêmement remarquable qu'un mol d'hélium ou d'oxygène, à une température donnée, dans un volume donnée, exercent exactement la même pression.

La loi des gaz parfaits fixe donc l'échelle de la température, à un choix arbitraire de taille de l'unité près, qui est fixé par la constante *R*.

Un gaz physique ne suit pas exactement la loi des gaz parfaits dans des circonstances de basse température et de très haute pression, mais sinon, vers des hautes températures et des basses pressions, tous les gaz tendent vers cette loi.

On peut donc construire un thermomètre qui mesure la température absolue, en prenant une quantité de gaz parfait, en l'enfermant dans un volume fixe V, et en mesurant la pression exercée par le gaz en question. L'application de la loi des gaz parfaits nous donnera alors la température du gaz, et donc, du corps avec qui le gaz sera en contact quand il sera en 'équilibre', c.a.d. quand il n'échangera plus de chaleur avec le corps en question.

Transport de chaleur

Quand deux corps à deux températures sont en contact, sans bouger, il y a un flux de chaleur du corps le plus chaud vers le corps le plus froid qui se met en route. *Dans beaucoup de cas, le flux de chaleur (la quantité de chaleur par unité de temps, donc en Watt) sera proportionnel à la différence de température.* C'est ce qu'on appelle **la loi de Fourier.** La loi de Fourier est une loi empirique, semblable à la loi d'Ohm pour le courant électrique.

$$Q / t = (T_1 - T_2) / R_{th}$$

Ici, Q est la quantité de chaleur (Joule) transportée en un temps t (secondes). $T_1 - T_2$ est la différence de température entre les deux corps. Par imitation de la loi de Ohm, le coefficient de proportionnalité R_{th} est appelé **la résistance thermique**. Des matériaux à grande résistance thermique sont utilisés pour isoler des habitations. Les métaux, et en particulier le cuivre, sont d’excellents conducteurs de chaleur, qui ont une toute petite résistance thermique.

Une autre forme de transport de chaleur est simplement **le transport mécanique d’un corps chaud**. On « transporte » ainsi l’énergie interne du système qui est juste géométriquement déplacé. Ce transport s’appelle « **convection** ». Mettre un bidon d’eau chaude sur un train est une forme de convection, si on le veut. Mais souvent, on parle de convection quand cela se fait **dans un champs gravitationnel**.

Un corps chaud a souvent tendance à dilater. Il occupe alors plus de volume pour la même masse. Dans un milieu ambiant dans un champs gravitationnel, cela provoque *une poussée d’Archimède*, ce qui fait monter le corps chaud. Quand le corps chaud perd sa chaleur quand il arrive en haut, en refroidissant, il se contracte. Sa densité augmente, et la poussée d’Archimède diminue : le corps froid coule et retombe vers le bas, où il peut se réchauffer. Ainsi une source chaude en profondeur d’un milieu dans un champs gravitationnel (de l’eau dans une casserole, chauffée au fond, ou le manteau de la Terre, chauffé au niveau du noyau, l’air chauffé au sol) mettra en route un cycle de convection, qui transportera la chaleur plus vite que la simple conduction.

États thermodynamiques

Un système thermodynamique est décrit par un état qui dépend seulement de quelques grandeurs. Le nombre et la nature exacte de ces grandeurs dépendra de la nature du corps. Si le corps est homogène, et ne change pas de composition chimique, alors **deux grandeurs sont suffisantes pour décrire son état**. Pour un corps gazeux donné (donc pour un nombre de mol d'un gaz particulier donné), cela peut être **la température et la pression**. Ou la pression et le volume. Ou la température et le volume. Dès qu'on fixe deux quantités, l'état thermodynamique du gaz en question est fixé. L'énergie interne U étant une fonction de l'état thermodynamique, et donc une fonction des deux grandeurs choisies. Mais **pour un gaz parfait, il s'avère que l'énergie interne ne dépend que de la température: $U = U(T)$.**

Microscopiquement, cela s'explique de la façon suivante. Un gaz parfait est un gaz fait de points matériels qui n'exercent pas de forces à distance entre eux. La température absolue d'un tel gaz est alors simplement proportionnel à l'énergie cinétique moyenne d'un de ces points matériels, et l'énergie interne du corps est alors égal à l'énergie cinétique totale, qui est simplement l'énergie cinétique moyenne d'un seul point, fois le nombre de points matériels.

Pour d'autres corps homogènes que les gaz parfaits, l'énergie interne peut dépendre de l'état thermodynamique entier. Si on exprime cet état en température et pression, nous avons que U

= $U(T,P)$. Si on exprime cet état en température et volume, nous aurons $U = U(T,V)$.

On peut maintenant considérer le problème suivant: **quelle est la chaleur à apporter à un corps à volume constant, pour augmenter sa température d'un Kelvin ?** En d'autres termes:

$Q_1 = U(T+1,V) – U(T,V)$

Cette chaleur, nécessaire pour augmenter la température du corps d'un Kelvin, est appelé: l**a capacité thermique à volume constant C_V.** C'est plutôt la dérivée qu'on définit ainsi:

$C_V = dU/dT$ pour $V = constant$

De la même façon, nous avons l**a capacité thermique à pression constante C_P.** Il y a cependant une subtilité dans ce cas précis. Effectivement, à pression constante, il nous faut savoir quelle est la quantité de chaleur à apporter à un corps pour augmenter sa température d'un Kelvin. Seulement, l'augmentation de son énergie interne ne sera pas égale à cette chaleur apportée Q. Effectivement, le corps risque de changer de volume. Si le corps augmente de volume dV pendant ce processus, la pression P exercera un travail sur le monde externe égal à $P.dV$. Ainsi, l'énergie interne n'augmentera alors que de:

$Q – P. dV = U(T+1,P) – U(T,P)$

Nous avons donc que:

$C_P = U(T+1,P) - U(T,P) + P.\, dV$

Dans le cas d'un gaz parfait, U ne dépend que de *T*, donc $U(T,P) = U(T,V) = U(T)$. Ainsi:

$C_P = C_V + P.dV$

De la loi des gaz parfaits, $P.V = N.R.T$; pour une augmentation d'un Kelvin, $P.dV = N.R$

Ainsi, nous trouvons **pour un gaz parfait:** $\boldsymbol{C_P = C_V + N.R}$

Cette relation n'est pas vraie pour un système quelconque mais il illustre bien la différence entre la capacité thermique à pression constante, et à volume constant. Dans ce dernier cas, il n'y a pas de travail mécanique qui entre en jeux.

Machines thermiques

Nous savons déjà que le travail mécanique peut être converti en chaleur. Au lieu de passer une quantité de chaleur à un corps, on peut aussi bien avoir une force de frottement qui fait du travail sur ce corps, et l'effet sera le même: l'état thermodynamique du corps changera et l'énergie interne du corps augmentera.

Cependant, dans la déduction de la capacité thermique à pression constante, nous avons vu que nous pouvons apporter de la chaleur à un corps, et *que ce corps peut convertir une partie de cette chaleur en travail mécanique*. En chauffant un gaz parfait avec une chaleur C_P, seulement une fraction C_V de cette chaleur était emmagasinée dans l'énergie interne du corps en augmentant sa température d'un Kelvin, et $N.R$ était de l’énergie mécanique rendue par le corps au le monde extérieur par son expansion.

Une machine thermique est une machine qui prend de la chaleur, et qui rend de l’énergie mécanique.

Peut-on convertir toute chaleur en énergie mécanique ? Il s’avère que non. Autant qu’un peut toujours transformer toute énergie mécanique en chaleur, l’inverse n’est pas vrai. Il y a donc quelque chose d’irréversible dans ceci.

Nous allons donc devoir détailler un peu plus ce que nous entendons par “machine thermique”. **Une machine thermique est un processus cyclique qui reçoit de la chaleur Q_1 à une température T_1, qui produit du travail mécanique W, et qui rend de la chaleur Q_2 à une température T_2.**

La première loi dit que $W = Q_1 - Q_2$

Il s’avère qu’aucune machine n’existe qui prend de la chaleur Q_1 et qui rend seulement du travail W, donc avec $Q_2 = 0$. Une machine thermique peut donc seulement transformer une partie de l’énergie thermique qu’elle reçoit, Q_1, en travail mécanique W. **Une partie doit inévitablement être rendue comme chaleur Q_2.**

On appelle **le rendement de la machine thermique**: $\eta = W/Q_1$

Cependant, une machine thermique peut être réversible. On peut aussi considérer qu’une quantité Q_2 de chaleur est prélevée à température T_2 et que nous appliquons une énergie mécanique W à la machine, qui dépose une chaleur Q_1 à température T_1. Ceci est alors **une pompe à chaleur**.

La deuxième loi

La deuxième loi précise le fait suivant:

il n'existe aucun processus cyclique dont le seul effet est de transférer de la chaleur d'un corps à une température T_1 vers un corps à température $T_2 > T_1$.

Dit comme cela, cette loi semble évidente. Ses conséquences seront vastes.

La deuxième loi spécifie déjà qu'une machine thermique avec $Q_2 = 0$ n'est pas possible. Effectivement, supposons qu'une telle machine existe. Alors cette machine peut donc extraire de la chaleur à température T_1 et la transformer entièrement en énergie mécanique. Cette énergie mécanique peut être utilisée pour effectuer du frottement sur un corps à température $T_3 > T_1$. Ainsi, nous aurions construit un processus cyclique, dont le seul effet est d'extraire de la chaleur Q_1 à température T_1 et de fournir cette chaleur à température T_3 ce qui est contraire à la deuxième loi.

Un raisonnement plus poussé, mais du même genre, nous permet de déduire ceci : l'efficacité d'une machine thermique est limitée par:

$\eta < 1 - T_2 / T_1$

Une machine théorique qui atteint cette efficacité, est réversible et s'appelle **une machine de Carnot**.

On peut ré-écrire cette expression de la façon suivante:

$$1-\frac{T_2}{T_1}>\eta=\frac{W}{Q_1}=\frac{Q_1-Q_2}{Q_1}=1-\frac{Q_2}{Q_1}$$

De cela, on peut déduire:

$$\frac{T_2}{T_1}<\frac{Q_2}{Q_1}$$

Cela s'écrit encore comme:

$$\frac{Q_1}{T_1}-\frac{Q_2}{T_2}<0$$

Souvenons-nous que Q_1 était de la chaleur *reçue* par le système à température T_1, et Q_2 était de la chaleur *donnée* par le système à température T_2.

On peut généraliser ce raisonnement, et il mène à la propriété suivante pour tout cycle:

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i}<0$$

où il faut comprendre Q_i la chaleur *reçue* par le système à température T_i. Une chaleur donnée est alors à prendre avec un signe négatif. **L'égalité est atteinte pour un processus physiquement impossible à réaliser, mais peut être approchée arbitrairement, et alors, le processus est réversible**.

Entropie

Nous avons déjà introduit une grandeur d'état à un système thermodynamique: l'énergie interne. Nous allons maintenant introduire une deuxième grandeur: **son entropie**. Cette grandeur est suggérée par ce que nous venons de constater concernant la deuxième loi de la thermodynamique.

A tout état thermodynamique correspond une grandeur S, son entropie. Elle est aussi fonction des variables d'état, exactement comme l'énergie interne.

Le changement d'entropie entre un état E_1 et un état E_2, quand on trouve un processus *réversible* pour aller de l'état E_1 vers l'état E_2 est donné par:

$S_2 - S_1$ = somme des Q_i / T_i le long du chemin de E_1 vers E_2

Ainsi, **un système isolé aura son énergie interne qui reste constante (première loi de la thermodynamique), et l'entropie totale du système isolé qui ne peut qu'augmenter.** Dans le cas où l'entropie totale reste constante, tous les processus qui s'y opèrent, sont réversibles.

Effectivement, supposons qu'une partie du système isolé parcourt un processus cyclique. A la fin de ce cycle, les parties concernées sont dans le même état thermodynamique, et donc, leur entropie est la même qu'au départ.

Par contre, pour le reste du système, qui a fourni la chaleur et à reçu la chaleur, il faut inverser les signes de Q_i (nous considérons maintenant l'extérieur du cycle).

De $\sum_i \frac{Q_i}{T_i} < 0$ avec le signe inversé, suit automatiquement que la somme des entropies du reste du système, a augmentée.

Énergie libre, équilibre

Si nous considérons maintenant que nous avons un système thermodynamique *dans un environnement à température T* avec lequel nous pouvons librement échanger de la chaleur, nous pouvons définir ce qu'on appelle **"l'énergie libre"** du système:

$F = U - T \times S$

L'énergie libre du système ne change donc pas quand, dans une transformation réversible, le système reçoit une chaleur *Q* de l'environnement:

$U' = U + Q$

$S' = S + Q/T$

$F' = U + Q - T x (S + Q/T) = U - S T = F$

F « fait donc fi » de l'énergie interne qui n'est pas récupérable par une machine de Carnot. ***F* sera le bilan de l'énergie mécanique qui peut être extraite du système**.

Un système qui est thermiquement en contact avec un environnement à température *T*, et qui n'échangera pas de chaleur à une autre température, mais qui peut échanger du travail *L* (positif si la machine livre du travail à l'extérieur) entre un état *A* et un état *B*, aura que :

$L < F(A) - F(B),$

et il y aura égalité seulement si le processus est réversible.

Ainsi, l’énergie libre *F* d’un système diminue d'un montant supérieur à la quantité d'énergie mécanique que le système fournit à l’extérieur.

Un système en contact avec un environnement à température *T*, mais qui n’échange pas d’énergie mécanique avec l’extérieur, ($L = 0$) a donc la propriété que **s’il subit une transformation interne, son énergie libre ne peut que diminuer**.

Si un tel système atteint **un minimum de son énergie libre**, il ne peut plus évoluer. On dit qu’il est **en équilibre thermodynamique à température *T***.

Équilibres classiques

Le cas de l’énergie libre peut être généralisé. Nous considérons un système qui est fait de sous-systèmes : l’énergie totale interne du système est la somme des énergies des sous-systèmes ; l’entropie totale est la somme des entropies des sous-systèmes. Les sous-systèmes peuvent échanger de la chaleur, de l’énergie mécanique etc... entre eux, mais les conditions extérieures seront spécifiées.

Il y a **4 cas de figure classiques** dans lesquels on considère un système et les variables pour décrire les états sont choisis en fonction du cas de figure. Les deux lois de la thermodynamique nous indiquent alors quel sera l’état d’équilibre thermodynamique du système, et donc, de ses sous-systèmes.

Système totalement isolé

Un système qui n'échange **pas de travail, ni de chaleur** avec l'environnement, aura comme variables préférées :

U et *S*

La première loi impose que *U* sera constant. La deuxième loi indique que *S* augmentera. **L'équilibre thermodynamique d'un tel système est donc atteint quand, pour *U* fixe, nous avons l'entropie maximale.**

Un exemple est : on met des glaçons dans de l'eau chaude, le tout dans un calorimètre qui isole l'ensemble du monde extérieur. Il y aura échange de chaleur de l'eau chaude vers les glaçons, qui fondront partiellement. L'eau chaude, en transférant de la chaleur à sa température élevée T_1, diminuera son entropie de Q/T_1 ; mais les glaçons, qui vont recevoir cette chaleur à leur température plus basse T_2 augmenteront leur entropie de Q/T_2. Ainsi, l'entropie totale du système monte quand l'eau chaude transférera de la chaleur aux glaçons, tout en gardant l'énergie interne totale *U* constante. Quand il n'y a plus de process qui peuvent augmenter *S*, l'équilibre est atteint.

Il faut donc trouver le maximum de *S*, avec *U* constant, pour trouver l'équilibre thermodynamique.

Température constante

Nous considérons un système qui **n'échange pas d'énergie mécanique avec le monde externe, mais qui est en contact thermique avec un environnement à température *T***.

Nous avons déjà traité ce cas. Les deux variables à utiliser sont :

T et *F*

L'équilibre thermodynamique sera atteint quand, pour *T* fixe, nous trouvons le minimum de *F*.

Nous pouvons considérer le même problème avec l'eau chaude et les glaçons, mais cette fois, le mélange n'est pas placé dans un calorimètre qui isole le système, mais dans une casserole en cuivre, le tout flottant dans une piscine à *27 C*.

Système isolé à pression constante

Les deux types de systèmes considérés jusqu'ici n'échangeaient pas d'énergie mécanique avec l'environnement. Cela implique, par exemple, qu'ils sont à volume constant, car dès que le volume change, et qu'il y a une pression exercée, cela représente un travail égal à $P.\ dV$ donné à l'extérieur. Cependant, beaucoup de systèmes sont exposés à la pression atmosphérique et nous ne les contraignons pas toujours de rester à volume constant.

Considérons un système dans un environnement à pression P. Il est alors judicieux d'introduire la quantité suivante :

$H = U + P \times V$

On l'appelle **l'enthalpie du système**.

Si un système augmente son volume de dV, sous pression P, il exerce un travail sur le monde extérieur égal à $P \times dV$. Son énergie interne diminue alors de $P \times dV$.

$U' = U - P \times dV$

$H' = U' + P \times (V + dV) = U - P \times dV + P \times V + P \times dV = H$

Nous voyons que l'enthalpie ne change pas si le système change de volume, et exerce du travail en faisant cela. L'enthalpie sera une quantité plus pratique que l'énergie interne dans ce cas de figure.

Si le système est thermiquement isolé, mais est à pression constante, les deux variables à utiliser sont :

H et S

On trouve l'équilibre thermodynamique en cherchant le maximum de *S* en gardant *H* constant.

Dans la pratique, il n'y a quasiment aucune différence entre enthalpie et énergie interne tant qu'on travaille seulement avec des solides ou des liquides, car ils ne changent pas beaucoup de volume. Cependant, **dès qu'il y a absorption ou développement de gaz** (des réactions chimiques), et qu'on travaille à pression constante, il faut utiliser l'enthalpie et non l'énergie interne. Comme très souvent, on fait de la chimie sous pression atmosphérique, et non dans un bidon d'acier fermé, les bilans énergétiques des réactions en chimie sont données en enthalpie et non en énergie interne, car ainsi, on a déjà tenu compte du travail mécanique fourni par l'expansion du système gazeux dans l'atmosphère.

Un exemple est : dans un système thermiquement isolé, mais avec un piston, qui garde la pression constante, nous mélangeons une quantité de vapeur à *100 C* et quelques glaçons. L'état d'équilibre sera différent du système enfermé dans un bidon d'acier à volume constant, car en refroidissant, la vapeur va contracter, et l'environnement fera un travail mécanique sur le système avec le piston. L'énergie interne finale du système à piston sera plus élevée que de celui dans le bidon.

Pression et température donnée

Nous devinons maintenant le quatrième cas : un système **en contact avec un environnement à température *T*, et à pression *P*.** C'est la combinaison de l'enthalpie et l'énergie libre.

Nous introduisons donc :

$G = H - T \times S = U + P \times V - T \times S = F + P \times V$

L'énergie libre de Gibbs. On parle aussi d'**enthalpie libre**. Pour distinguer *F*, on appelle *F* aussi l'énergie libre de Helmholtz.

Les variables à utiliser sont :

T et G

On trouve l'équilibre thermodynamique en cherchant le minimum de *G*, en gardant *T* constant.

Diagramme de phase

Considérons un corps fait d'eau. Cette eau peut apparaître sous 3 formes différentes : la glace, le liquide, et la vapeur. Souvent, nous nous intéressons à un système à une température donnée T et une pression donnée P. Les variables à utiliser sont donc T et G, mais nous allons utiliser $G(T,P)$. Nous pouvons ainsi considérer **les états thermodynamiques dans le plan *T*,*P*.** En réalité, nous pouvons nous imaginer qu'aux 3 états d'eau, correspondent *3 fonctions G différentes* : G_l, G_s, G_v pour un kilogramme d'eau liquide, de glace solide, et de vapeur, respectivement. Un mélange de liquide, glace et vapeur, sous des conditions imposées de P et de T, auront une énergie libre de Gibbs totale de :

$$G(T,P) = m_V\, G_V(T,P) + m_L\, G_L(T,P) + (M - m_L - m_V)\, G_S(T,P)$$

où M est la masse totale d'eau considérée, m_V est la partie de cette masse en forme de vapeur, et m_L est la partie de cette masse en forme de liquide.

Pour chaque couple T,P, il y aura une des trois G_X qui sera le minimum des trois G_l, G_s, G_v. Imaginons que ce soit G_l. Alors, si $m_L = M$, G totale sera minimale. Cela veut dire que pour ce T et P, toute l'eau deviendra liquide en équilibre thermodynamique. Pour une autre combinaison de T et P, il se peut que ce soit G_V qui est minimal. Alors, toute l'eau deviendra de la vapeur. Pour encore d'autres valeurs de T et P, ce sera le tour de la glace d'avoir le plus bas G.

Ainsi, le plan *T*,*P* est divisé en zones, où l'un ou l'autre *G* sera minimal : c'est un diagramme de phase. Dans le diagramme de phase de l’eau, il y aura 3 zones : glace, liquide et gaz. Sur une courbe qui sépare deux zones, par exemple, liquide et vapeur, nous avons que $G_L = G_V$ car d’un coté $G_L < G_V$ et de l’autre coté $G_L > G_V$. Dans la mesure où ces deux fonctions de T et P sont des fonctions continues, sur la ligne de séparation, nous avons $G_L = G_V$. Ainsi, pour les couples P, T sur la ligne de séparation, le liquide et la vapeur peuvent être en équilibre. A une pression d’une atmosphère, cela nous donne une température de *100 C* (*373 K*). A *100 C*, l’eau liquide et la vapeur sont en équilibre : c’est l’eau en état d’ébullition.

Les trois lignes séparatrices se joignent en 1 seul point *T,P*. Ce point est $T = 0.0075\ C$, et $P = 6{,}02\ mbar$. Il s’appelle **le point triple de l’eau**. Dans ce point, $G_V = G_L = G_S$ et c’est le seul point où liquide, glace et vapeur sont en équilibre.

On peut considérer des diagrammes de phase pour tout sorte de système où il y a des transformations physiques ou chimiques possibles.

Supplément : Intégrales

La notion d'intégrale

En physique, nous sommes obligés d'utiliser une notion mathématique qui est seulement introduite en terminale dans un cadre très limité : la notion d'intégrale. Malheureusement, les applications nécessaires d'intégrales dans la physique dépassent largement la notion restreinte d'intégrale vue en classe de Terminale, à savoir, l'intégrale d'une fonction réelle d'une seule variable. Vous l'avez remarqué, nous avons besoin d'intégrales de ligne, de surface, de volume, de vecteurs….

Comme il s'agit seulement de notions conceptuelles dans cet ouvrage, nous n'avons, heureusement, pas besoin de développer les mathématiques en détail, et encore moins, d'apprendre des techniques de calcul : il suffit juste d'essayer de comprendre conceptuellement ce que c'est, une intégrale.

Essentiellement, **une intégrale est un cas limite d'une somme de produits**. S'il faut retenir une seule idée, c'est celle-là.

Une intégrale se note avec 3 éléments :

- le signe ∫ qui est un « S » allongé (de « somme ») et qui décrit souvent aussi l'**étendu de la somme**
- l'expression du **facteur « qui change »** du produit.

- l’expression du **facteur « en petits pas »** du produit, précédé de « *d* ».

Le cas le plus simple, celui abordé en Terminale, c’est le cas limite d’une somme de surfaces, surfaces qui sont des rectangles, et dont l’expression est donc la hauteur fois la largeur.

Si on veut connaître la surface d’un morceau de plan, alors on va découper ce morceau de plan en petits rectangles parallèles très minces. La hauteur de chaque petit rectangle sera différente ; c’est le « facteur qui change ». On va décrire cette hauteur variable par une fonction réelle, *h(x),* où *x* est une variable réelle « le long des petites largeurs ».

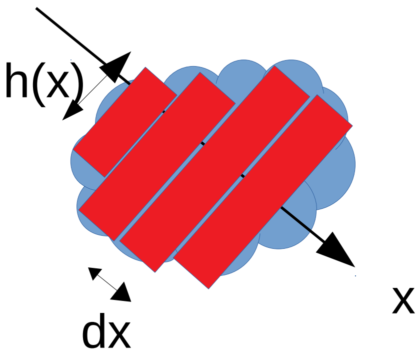

Figure 1: Illustration comment on calcule la surface du nuage bleu en découpant ce nuage en petits rectangles de petite largeur dx et de hauteur h(x), dépendante de x.

On écrira cette somme :

$$\int_{nuage} h(x)dx = \int_{x=0}^{x=8} h(x)dx$$

Le symbole d'intégration indique qu'on fait la somme sur les rectangles du nuage, ce qui correspond aussi à dire qu'on le fait de la valeur $x = 0$ à la valeur $x = 8$, si notre axe x est tel qu'il entame le nuage à $x = 0$, et termine le nuage vers $x = 8$.

Dans la figure, on voit bien que la somme des surfaces des 4 rectangles rouges ne sera égale à la surface du nuage. Mais on peut s'imaginer que cette somme deviendra de plus en plus proche de la valeur de la surface du nuage, quand on augmente le nombre de rectangles, en diminuant dx ; en faisant des rectangles de plus en plus fins. C'est exactement la limite quand dx devient infiniment petit, qui est représentée par la notion d'intégrale. C'est la somme infinie de rectangles infiniment fines.

Dans la pratique, quand on fait des calculs d'intégrales sur un ordinateur, on ne va pas faire une somme infinie qui ne terminera jamais ; on se limitera à une somme de beaucoup de termes avec dx très fin.

Dans le cas spécial où le nuage était en fait un rectangle, et où $h(x)$ ne change pas en fonction de x (c'est la hauteur du rectangle), alors l'intégrale devient simplement un produit :

$$\int_{x=a}^{b} h(x)dx = H(b-a) \quad \text{si } h(x) = H \text{ tout le temps.}$$

Le cas qu'on vient d'introduire est l'intégrale d'une fonction réelle, qui est vue en Terminale. Mais la notion d'intégrale va bien au-delà du calcul d'une surface de nuage.

Intégrale de volume

Un premier exemple est : le calcul d'une masse d'un objet de volume donné, quand on connaît la densité dans l'espace. Vous allez voir que c'est très comparable au calcul de la surface de notre nuage.

D'abord, si la densité volumique est constante, *r*, alors la masse d'un objet de volume *V* est simplement : $m = r\ V$.

Mais quand vous avez une densité qui n'est pas uniforme et constante dans l'espace, comment faire ? Imaginez que vous avez une pyramide de sable, dont le fond est mouillé et qui est de plus en plus sec vers le haut. La densité volumique du sable mouillé en bas sera plus grande que la densité volumique du sable sec en haut. On peut s'imaginer que *la densité volumique est une fonction du point de l'espace.*

Alors, pour calculer la masse de notre pyramide, il faudrait faire des sommes sur des petits volumes *dV* et chaque fois, multiplier ce petit volume avec la densité volumique à cet endroit, *r(P)* (*P* est le point où on se trouve alors).

Nous avons une notion d'intégrale :

$$m = \int_{pyramide} r(P)\, dV$$

Cette fois, une seule variable réelle ne suffira pas, il faudra en utiliser 3 (*x*, *y* et *z*), pour décrire les points *P* de l'espace. Mais nous n'allons pas discuter de ces techniques de calcul.

Sur le plan conceptuel, il suffit juste de comprendre qu'il s'agit d'un volume, ici représenté par «pyramide», qu'on a découpé en petits morceaux de volume, *dV*, et qu'on calcule la petite masse *r(P) dV* pour chacun de ces petits volumes. En faisant la somme de toutes ces contributions, nous retrouvons la masse totale de l'objet, *m*.

Notez que, avec une « densité » égale à 1, l'intégrale devient simplement le volume de l'objet :

$$V = \int_{pyramide} 1\, dV$$

Intégrale de surface I

De la même façon que l'intégrale de volume, nous pouvons considérer une quantité qui est distribuée par une « densité de surface ». Nous pouvons penser à une couche de peinture, ou une densité de surface de charge, par exemple. Nous voulons connaître la quantité totale de peinture, ou de charge électrique sur une surface *S* donnée, par exemple, sur le capot d'une voiture. *S* représente la surface du capot de voiture. La densité de surface de notre quantité recherchée sera notée *t(P)*. Cette fois, *P* est un point de la surface *S*, et *t(P)* est donc la densité de surface de la charge, ou de peinture, près du point *P*.

Si la densité de surface *t(P)* est constante, c'est à dire, que cette densité est la même, *T*, pour tous les points *P* de la surface *S*, alors la quantité totale que nous cherchons, *Q*, sera égale au produit de *T* et de la surface *S* : *Q* = *T* . *S*. Mais si cette densité change de point en point, alors il faut découper la surface *S* en beaucoup de petites surfaces *dS*, multiplier chaque petit *dS* avec la valeur de *t(P)* au point *P* où se trouve le petit *dS* en question, et faire la somme de tout cela. Nous avons alors une intégrale de surface :

$$Q=\int_S t(P)dS$$

Ici aussi, pour une densité égale à 1, l'intégrale devient la surface :

$$S=\int_S 1\,dS$$

Intégrale de surface II

Imaginons maintenant que nous avons toujours notre capot de voiture mais que nous arrosons ce capot d'un jet de peinture. On peut représenter le jet de peinture comme un champs vectoriel *v(P)* au niveau du capot : la direction et le sens indiquent la direction et le sens des gouttelettes de peinture près du capot, et la taille du vecteur représente la quantité de gouttelettes à cet endroit. Effectivement, on s'imagine facilement que le jet de peinture ne sera pas perpendiculaire au capot, et aussi, qu'il y a des endroits où le jet est plus dense (par exemple, au milieu du jet) qu'au bord du jet.

Si nous voulons calculer la quantité de peinture qui arrive sur le capot, il faudra couper la surface du capot *S* en petites surfaces *dS*, mais il faudra aussi prendre *la composante perpendiculaire du vecteur* du jet à cette surface : effectivement, la composante tangentielle ne contribue pas à la peinture de la petite surface.

Ainsi, la quantité de peinture reçue par la petite surface *dS* sera :

$q = 1_n \,.\, v(P)\, dS$

La somme de toutes ces contributions nous donnera la quantité de peinture déposée sur le capot :

$$Q=\int_S v(P)\cdot 1_n dS$$

On appelle cette intégrale de surface aussi **le flux du vecteur *v(P)* vu par la surface *S***.

Le « flux d'un champs vecteur » intervient par exemple quand on veut définir le flux magnétique dans une boucle de conducteur. Le changement dans le temps de ce flux magnétique induira une force électromotrice dans la boucle. Le flux magnétique est justement l'intégrale de surface du champs magnétique (l'induction magnétique en fait) sur la surface à l'intérieur de la boucle.

Intégrale de ligne I

Nous pouvons aussi considérer une notion d'intégrale « le long d'une courbe ». Considérons une courbe dans l'espace, *C*. Cette courbe peut, ou peut ne pas, être fermée.

Nous allons considérer « des petits morceaux » de courbe, *dl*, de telle façon que l'union de tous ces petits morceaux sera la courbe même. Ainsi, *dl* représente donc « un petit bout de courbe *C* », à un endroit près du point *P* de l'espace.

Nous pouvons maintenant imaginer que nous avons un champs vecteur *V(P)*, c'est à dire, une fonction qui nous donne un vecteur pour chaque point *P* de l'espace.

Si notre courbe *C* était un segment droit, qui va du point *A* vers le point *B* (le point *A* est le début du segment, et le point *B* est la fin du segment), et que notre champs de vecteurs *V(P)* est un vecteur constant (c.a.d. pour chaque point *P*, le vecteur *V(P)* est le même, disons, le vecteur *W*), alors nous pourrions vouloir calculer **le produit scalaire** $Q=W\cdot\vec{AB}$. L'intégrale de ligne est une généralisation de cette notion. Nous allons vouloir calculer le produit scalaire du vecteur *V(P)* avec chacun des petits bouts de courbe *dl*, vu comme petit vecteur. Ce petit vecteur, c'est le vecteur unitaire tangentiel à la courbe 1_P au point *P*, fois la petite longueur *dl*. Ainsi, pour le petit morceau *dl*, nous avons une contribution $Q_P = V(P) \,.\, 1_P\, dl$. Il faut maintenant faire la somme de toutes ces contributions par petit morceau pour calculer la grandeur qui nous intéresse : c'est **l'intégrale de ligne du champs vecteur *V(P)* sur la courbe *C***.

Cette intégrale de ligne nous donne par exemple la différence de potentiel le long d'un conducteur quand on connaît le champs électrique.

Intégrale de ligne II

Finalement, nous pouvons considérer de sommer des vecteurs le long d'une ligne, vecteurs qui sont le résultat d'un produit vectoriel.

Le produit vectoriel est un vecteur. C'est le résultat du produit de deux autres vecteurs, et on l'écrit ainsi : $W=U\times V$

Le vecteur *W* est perpendiculaire à *U* et à *V*. Il est donc perpendiculaire au plan défini par les deux vecteurs *U* et *V*. Le vecteur *W* est orienté dans le sens « de la main droite » quand on va du vecteur *U* vers le vecteur *V*. On peut aussi le dire que le sens de *W*, c'est le sens dans lequel va aller une vis, quand on tourne sa tête du vecteur *U* vers le vecteur *V*.

La taille du vecteur *W* est égale à la surface du parallélogramme sous-tendu par *U* et *V*. C'est donc la longueur de *U* fois la longueur de *V* fois le sinus de l'angle entre *U* et *V*.

On peut vouloir calculer le produit vectoriel d'un champs vecteur *V(P)* et d'une courbe *C*. Si le champs vecteur est constant (*V*) dans l'espace, et si la courbe *C* est un segment de *A* à *B*, alors notre produit vectoriel sera simplement :

$$W = \vec{AB} \times V$$

Mais si le champs vecteur n'est pas constant, alors il faudra couper notre courbe en petits morceaux *dl*. Chaque morceau contribuera donc un vecteur :

$$w = dl\, 1_P \times V(P)$$

Il faudra faire la somme de tous ces vecteurs : c'est l'intégrale de ligne du produit vectoriel du champs le long de la courbe :

$$W = \int_C 1_P \times V(P)\, dl$$

C'est sans doute la notion d'intégrale la plus complexe que vous avez rencontré. Elle est utilisée dans la loi de Biot et Savart par exemple.

Épilogue

Dans cet ouvrage, j’ai essayé de couvrir toutes *les notions conceptuelles nécessaires* pour pouvoir se former *une image mentale cohérente* des sujets enseignés en physique-chimie. Comme annoncé, certaines de ces notions ne sont pas faciles, et si j’ai essayé de me limiter à des notions mathématiques du lycée, je n’ai pas toujours réussi. Il ne faut pas que le lecteur s’inquiète si certaines notions mathématiques lui dépassent. Il suffit alors d’essayer d’obtenir une vague idée intuitive de ce qui est proposé, c’est toujours mieux que pas d’idée du tout. Le but de cet ouvrage est que le lecteur acquiert *un cadre conceptuel*, dans lequel il pourra placer les éléments du cours du lycée.

Cet ouvrage ne respecte pas « l’esprit » du programme de physique-chimie, qui est très orienté « empirisme, applications commerciales et technologie ». La physique est une science expérimentale, qui a une relation toute particulière avec les mathématiques, et c’est mon intime conviction qu’on rate complètement sa compréhension conceptuelle si on pense que la base de la physique est l’empirisme, mais il faut être conscient que ce n’est pas la chose à dire pour « plaire au correcteur ». Il est facile de faire semblant que la physique est empirique, quand on a, en secret, acquis le cadre conceptuel théorique nécessaire, et c’est l’attitude que je conseille chaleureusement au futur bachelier d’adopter. J’espère que cet ouvrage lui aura permis, justement, d’acquérir ce cadre.