

Les grandeurs physiques utilisées en sciences et leurs unités

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| Avertissement | 2 |
| Introduction | 2 |
| I - La physique : définition. C'est quoi, cette chose ? Un peu d'histoire grecque (mais bien d'autres peuples ont contribué à sa naissance!) | 3 |
| 1) Allons d'abord voir chez les Grecs... | 3 |
| 2) Et maintenant ? | 4 |
| II- Les grandeurs physiques et leurs unités | 4 |
| 1) Les grandeurs physiques | 4 |
| 2) Les grandeurs fondamentales | 5 |
| 3) Les unités des grandeurs fondamentales | 5 |
| Tableau des grandeurs fondamentales et de leurs unités | 7 |
| Deux notes importantes | 8 |
| 4) Et les autres grandeurs, les grandeurs dérivées, où sont-elles passées ? | 8 |
| Surface, volume, angle | 8 |
| Vitesse, accélération, force, pression, charge électrique | 10 |
| Différence de potentiel électrique, tension électrique, potentiel électrique | 11 |
| Précisions supplémentaires sur la force et le poids | 13 |
| Moment d'une force par rapport à un point | 14 |
| Précisions sur l'énergie et le travail. Equivalence entre énergie et travail | 15 |
| 5) Grandeurs physiques scalaires et grandeurs physiques orientées. Notion de vecteur (grandeur orientée) | 16 |
| 6) Travail d'une force et notion de produit scalaire | 22 |
| 7) La puissance : définition et unités | 24 |
| 8) Champ électrique, champ magnétique | 24 |
| 9) Notion de densité de puissance (ou densité de flux d'énergie) | 25 |
| Tableau de conversion du champ électrique en densité de puissance | 27 |
| Tableau de conversion du champ électrique en densité de puissance (suite) | 28 |
| 10) Rappel de quelques notions sur les ondes : cycle, période, fréquence, amplitude, crête | 29 |
| 11) Débit d'absorption spécifique | 31 |
| Tableau des principales grandeurs physiques dérivées (définitions et unités) | 32 |
| Tableau des préfixes de multiples et sous multiples, qui évitent les longs discours... | 33 |
| III-Avant de terminer : et si l'on parlait de la radioactivité ? | 34 |
| 1) Définition de la radioactivité. | 34 |
| 2) Une précision sur la terminologie utilisée : les rayonnements ionisants | 36 |
| 3) Les grandeurs utilisées en radioactivité et leurs unités | 37 |
| 4) Pour évaluer l'impact de la radioactivité sur un être vivant, il existe deux notions: l'exposition et la dose | 37 |
| 5) Encore une minute : j'ai lu quelque part qu'il existe une unité appelée l'électronvolt. Qu'est-ce ? | 39 |
| 6) Un peu de rêve pour terminer | 39 |

Avertissement.

Le présent document est écrit en support des documents « Antennes et ondes, plus simple que vous ne le pensez »¹ et « Nano particules magnétisables, graphène et modifications des comportements, ou Fenêtre entrouverte sur un monde trop méconnu »², et doit être utilisé comme complément si l'on se pose des questions sur les unités utilisées. Il a en effet pour but d'expliciter la notion de grandeurs physiques et surtout les unités qui leur sont associées. Certaines notions mentionnées ici se trouvent déjà développées dans le document « Antennes et ondes... ». Nous détaillerons notamment les grandeurs et les unités qui sont utilisées dans notre « sport favori » : le monde merveilleux des ondes électromagnétiques. Voici un exemple de problème qui peut se poser quand nous sommes sur le terrain. Imaginez-vous à proximité d'un beau pylône de l'opérateur Fribouysfrange, à la demande d'un citoyen inquiet de ce voisinage pas vraiment désiré. Votre appareil de mesure vous indique une valeur de 1,2 volt par mètre (V/m). Vous tournez le bouton « mode », et voici que le faisceau que vous mesurez est instantanément affublé d'une autre unité: le milliwatt par mètre carré (mW/m²), et bien évidemment la valeur lue a changé : vous lisez sur votre écran 3,8 mW/m². Or, c'est toujours le même faisceau ! Vous vous demandez peut-être, et à fort juste titre, pourquoi le faisceau d'une antenne-relais est caractérisé parfois par une unité qui s'appelle le volt par mètre (V/m) et parfois par une autre unité : le milliwatt par mètre carré (mW/m²). Comme vous allez le voir, il est possible de passer d'une unité à l'autre, suivant votre besoin. L'ingénieur (ou le militant RdT) utilisera plus volontiers le volt par mètre, alors que le biologiste, par exemple, sera davantage enclin à utiliser le milliwatt par mètre carré, pour décrire le même être : l'onde électromagnétique. Il est donc important, pour nous permettre de décrypter la documentation technique (par exemple celle fournie par les opérateurs dans le Dossier d'Information en Mairie, décrit dans le document « Antennes et ondes... »), de nous rendre familiers des subtilités relatives aux grandeurs et unités couramment utilisées (en électromagnétisme, mais plus généralement dans tout domaine scientifique). Ces subtilités, vous allez le voir, ne ressortissent pas du tout au domaine de la sorcellerie, même si elles requièrent un peu de patience...

Introduction.

Notre activité sur le front des abus des opérateurs téléphoniques nous amène à avoir souvent plusieurs « facettes » : militants sur le terrain, il nous faut aussi répondre aux nombreuses questions qui nous sont posées. Que faire si une antenne est programmée dans le voisinage ? Quelles actions concrètes ? Quelles sont les lois et dispositions règlementaires qui régissent ces installations ? Faut-il envisager une action en justice, et si oui, quelle action, et quels avocats contacter ? Quels sont les dangers encourus quand nous sommes soumis aux CEM (champs électromagnétiques), et à quel niveau d'exposition ? Et pour commencer, quelle est la nature des ondes électromagnétiques ? Comment, si possible, s'en protéger ? Qu'est-ce qu'une cellule, un nerf, un gliome, un schwannome, les mitochondries ? C'est quoi, les normes sanitaires ? Le Linky rend-il sourd ? La tablette et les écrans, sont-ce forcément des outils de décérébrage³ massif ? Pourquoi ne faut-il pas téléphoner en marchant, en voiture, en train ? Nous ne sommes pas omniscients, mais Robin des Toits, notre

¹ Le document *Antennes et ondes, plus simple que vous ne le pensez* est disponible sur notre site <https://www.robindestoits.org/>

² Le document « *Nano particules magnétisables, graphène et modifications des comportements, ou Fenêtre entrouverte sur un monde trop méconnu* » est disponible sur notre site (voir note ci-dessus)

³ J'ignore si ce mot existe, mais il décrit parfaitement le processus de déliquescence qui se produit si l'on utilise sans prudence ni discernement les outils de la TIC (Technologie de l'Information et de Communication), et principalement les téléphones portables.

association, dispose de divers « spécialistes » (ou supposés tels) qui peuvent, chacun dans son domaine, proposer des éclaircissements. En vue d'apporter une aide aux membres de notre association, nous avons rédigé deux documents, que nous avons cités plus haut : l'un d'entre eux résume le fonctionnement des antennes, des téléphones et autres objets connectés, et l'autre concerne la biologie et les effets sanitaires et sociétaux que les ondes peuvent occasionner quand elles sont associées à une technologie encore très peu connue du public, les **nanoparticules magnétisables**. En vue d'aider à la compréhension de ces deux documents, le présent document vise plus simplement à préciser les notions **de grandeur physique et d'unité de mesure**. On connaît la longueur, la masse, et aussi le mètre et le kilogramme, mais bien d'autres grandeurs et unités existent et il n'est pas inutile de nous y intéresser de plus près.

Nous allons donc commencer par définir les grandeurs physiques pertinentes utilisées actuellement dans le domaine scientifique et technique, et les unités qui leur sont associées. Entrons donc un petit peu dans le monde enchanteur de la physique, cette science qui rebute, hélas, énormément de gens, peut-être parce que l'on n'a pas su, à l'école, en montrer la sombre beauté.

Dans la suite du texte, vous trouverez des encadrés en rouge. Il s'agit soit de compléments, soit de remarques, et si leur lecture vous paraît un peu plus difficile, vous pouvez les sauter dans un premier temps.

I - La physique : définition. C'est quoi, cette chose ? Un peu d'histoire grecque (mais bien d'autres peuples ont contribué à sa naissance!)

1) Allons d'abord voir chez les Grecs...

Le nom « physique » vient du grec « Phusis », qui désigne initialement la nature, y compris la nature vivante. La « phusika », science de la nature au sens large, a été développée par les philosophes grecs, en particulier Platon (428-348 av JC), puis son élève Aristote (384-322 av JC). Ce dernier a écrit un traité monumental qui parle de ... de quoi ? Eh bien, tout simplement de TOUT : un philosophe, en ces temps anciens, doit être capable de parler de tout... enfin, de tout ce que l'on connaît à l'époque, et qu'il se permet magistralement de développer sous forme de diverses disciplines: mathématiques, biologie, métaphysique (étymologiquement : ce qui est à côté ou au-delà de la physique, c'est-à-dire au-delà du monde sensible), astronomie, météorologie, poétique (étymologiquement : science de la *production* artistique en général), éthique, rhétorique (art de bien parler). Bref, un philosophe est alors un vrai génie universel ! Il s'intéresse aussi à l'agriculture, mais cessons ici l'énumération, car en réalité, **tout** intéresse le philosophe. Celui-ci établit une véritable théorie physique basée sur les propriétés supposées des cinq éléments qui composent le cosmos : terre, eau, air, feu, éther (cette substance impalpable mais omniprésente supposée remplir l'espace : en fait, on l'a tenu pour réel jusqu'à l'arrivée d'Einstein, mais restons prudents : absence de preuve n'est pas preuve de l'absence). Cependant, l'approche aristotélicienne est surtout spéculative, car ce ne sera que beaucoup plus tard que la science deviendra expérimentale : théorie et observation marcheront alors de pair. Pour le moment, Aristote reste fidèle à la pensée de Parménide, un philosophe qui vécut au 5^e siècle av. JC. Ce bon Parménide avait une piètre opinion de la recherche expérimentale, car il ne faisait aucune confiance aux sens, qui étaient pour lui source d'erreur ! Il professait que seule la raison est source de vraie connaissance. On le voit, Aristote a eu évidemment des prédécesseurs lointains, comme par exemple Démocrite, auteur de la première théorie atomique (le monde, selon lui, est constitué de *particules insécables*, les atomes). Là encore, c'est

évidemment une théorie purement spéculative, même si elle est très originale, mais les atomes tels que nous les connaissons n'ont pas grand-chose à voir avec ceux imaginés par Démocrite, et ils n'ont été mis en évidence qu'au début du 20^e siècle. Chapeau à l'artiste, quand même ! On n'en finirait pas de citer des noms : Pythagore, Empédocle, Hippocrate (surtout connu comme père de la médecine). Tous ces personnages ont peu ou prou tâté de la physique...au moins en tant qu'ingénieurs. Cependant, mis à part le domaine de la technologie (clepsydres, pompes, poulies, engrenages, ...), répétons que leur science, en particulier la physique, *n'était pas expérimentale*. Il n'empêche que ce sont eux qui ont largement contribué au développement ultérieur des connaissances. Merci à eux !

2) Et maintenant ?

Sautons pas mal de siècles, et arrivons-en à notre époque. La physique moderne a connu bien des tâtonnements, mais ça en valait la peine ! Actuellement, on aborde les sciences avec quelques notions bien affutées, qui nous permettent, avec l'aide des mathématiques (elles sont partout, celles-là !), de décrire et même de prévoir le comportement des objets, depuis la particule subatomique jusqu'aux super-amas de galaxies, en passant par tous les objets du quotidien. Les téléphones aussi ? Les téléphones aussi ! Alors, comme outils, nous disposons d'équations plus ou moins complexes, qui permettent cette description. Rassurez-vous, tel ne sera pas notre sujet ici (si on voit une ou deux équations, il ne s'agira que d'équations très simples !). Fondamentalement, la science manipule des « grandeurs physiques » (la longueur, le temps, la masse, l'énergie, le champ électrique, etc....), et celles-là, nous les rencontrons souvent, quand nous lisons des notices d'appareils ou des fiches de Robins des Toits. Donc, nous allons nous familiariser avec celles qui sont essentielles pour ce qui nous préoccupe. Pas de panique, des grandeurs physiques et leurs unités, vous en connaissez déjà beaucoup, comme vous allez vous en rendre compte, et cela, même si vous n'avez jamais lu leur définition exacte, scientifique. En fait, scientifiques, nous le sommes déjà tous et toutes, lorsque, par exemple, nous prenons en main un appareil jusque là inconnu et que nous nous disons : « Bon, ce bidule, ça marche comment ? ». On apprend alors « sur le tas », avec la notice, avec les copains... on a parfois un peu de mal avec les unités, mais on finit par se débrouiller, et ça, c'est une démarche scientifique : défricher l'inconnu ! Cependant, pour gagner du temps, on peut aussi prendre quelques heures pour lire des documents qui nous éclaireront un peu, comme quand on consulte une carte avant de partir vers une *terra ignota*. Alors, à partir des connaissances que nous possédons tous et toutes, et vous verrez que vous en possédez beaucoup, il nous suffira de compléter et d'ordonner un peu tout ça. C'est là le seul but de ce document. Souhaitons qu'il ne vous déçoive pas...

II- Les grandeurs physiques et leurs unités.

1) Les grandeurs physiques.

Très tôt, les bricoleurs, les inventeurs et les scientifiques (qui sont parfois une seule et même personne) ont cherché à préciser les notions de *grandeur physique* pour décrire les phénomènes auxquels ils se confrontaient. Comme exemples de grandeurs physiques, on connaît depuis longtemps la longueur, la masse (que l'on a longtemps confondue avec le poids, mais n'anticipons pas), le temps... La chaleur était évidemment connue, mais on ne savait pas trop ce que c'était (on a même pensé que c'était une sorte de fluide, le *calorique*, qui s'écoulait du chaud vers le froid comme

un fleuve descend vers la mer... pas bête comme idée, quand même!). La notion de température, quant à elle, a mis du temps à émerger clairement. Et ce n'est pas fini, il y en a d'autres...

Les scientifiques aiment la simplicité (si, si !) et ils ont cherché à définir un nombre restreint de grandeurs pour leurs besoins : juste ce qu'il faut et pas une de plus ! Il y a **les grandeurs fondamentales**, et, à côté, les **grandeurs dérivées, définies à partir des grandeurs fondamentales**. Donnons un exemple : comme grandeurs fondamentales, on a, par exemple, la longueur et le temps. Un exemple de grandeur dérivée est la vitesse : vous le savez, une vitesse, c'est une distance (c'est-à-dire une longueur) divisée par le temps. Poursuivons...

2) Les grandeurs fondamentales.

Actuellement, on utilise sept grandeurs fondamentales dans divers domaines scientifiques : physique, chimie, biologie,... Ces grandeurs sont dites **fondamentales**, car elles ne peuvent pas être déduites les unes des autres : ainsi, la longueur est une grandeur fondamentale qui ne peut pas être déduite du temps, autre grandeur fondamentale, à l'inverse de la vitesse, grandeur **dérivée** de la longueur et du temps, ainsi que nous venons de le voir. Au fil du temps, les scientifiques ont changé plusieurs fois les définitions de ces grandeurs, à mesure que progressaient les sciences et les techniques. En 2023, ces sept grandeurs fondamentales, les voici :

La masse, la longueur, le temps, la température, l'intensité électrique, la quantité de matière et l'intensité lumineuse.

Tout le monde est familier avec les cinq premières : la masse, la longueur, le temps, la température et l'intensité électrique, même si on n'en connaît pas forcément la définition exacte. Par contre, les deux dernières sont beaucoup moins populaires. Finissons-en rapidement avec ces deux là, il ne faudrait pas les vexer, mais ça tombe bien, nous ne les reverrons plus. La quantité de matière, notion le plus souvent utilisée en chimie, c'est le nombre **d'unités élémentaires** qui composent un corps donné : par exemple, le nombre d'atomes ou de molécules (assemblages d'atomes) que l'on trouve dans une éprouvette, ou bien le nombre d'électrons ou d'ions présents dans un gaz à très haute température, etc....Il ne faut surtout pas confondre la quantité de matière avec la masse ! Quant à l'intensité lumineuse, c'est la capacité d'une source de lumière à éclairer dans une direction donnée.

3) Les unités des grandeurs fondamentales.

Dès l'instant où l'on a défini les grandeurs, on s'est posé la question : quelle valeur leur donner ? En clair : quelle unité adopter ? On ne va pas refaire l'histoire des unités, ça prendrait des heures et d'ailleurs, vous pouvez voir ça sur Wikipédia (par exemple) si cela vous dit, l'article est très bien fait. A force de se bouffer le foie, les gouvernements de beaucoup de pays ont fini par adopter les mêmes unités qui définissent le **Systeme International**, lequel est né de la Révolution Française (comme la guillotine, diront les Royalistes, mais les unités, c'est quand-même mieux). Seuls certains pays, et pas des moindres (comme les Etats-Unis) ont résisté à ce mouvement et continuent à utiliser joyeusement *miles, pouces, livres, fahrenheits, gallons* et autres antiquités⁴... Quant aux définitions, certaines vont vous surprendre, car elles ont parfois changé à mesure que la physique et la métrologie (la *métrologie* est la discipline qui s'attache aux techniques de mesure) progressent.

⁴ Il y aurait une raison économique à ce conservatisme: les industriels ont expliqué aux autorités que, par exemple, le fait de changer les appareils de mesure associés à leurs machines et de refaire les documents relatifs à leurs produits aurait conduit beaucoup d'entreprises à la faillite ! Qui veut noyer son chien...

Elles font appel à des parties de la physique auxquelles beaucoup d'entre nous ne sont pas habitués : rayonnement, électromagnétisme, thermodynamique, mécanique quantique, chimie, ... Plusieurs paraissent extrêmement exotiques, mais peu importe, prenez-les comme telles, et si vous avez besoin de précisions, n'hésitez pas à nous contacter. Un exemple de modification dans la définition des grandeurs fondamentales et des unités : il fut un temps où le mètre était par définition la **dix-millionième partie du quart de la longueur du méridien terrestre**. On avait du mal à aller vérifier, bien sûr, mais ça « parlait », dès l'instant que la mesure exacte (plus ou moins !) avait été réalisée. Les scientifiques (début du 19^e siècle) avaient trouvé pour le mètre une valeur qui était d'environ *une demi-toise* (mesure utilisée jusqu'alors). Quant au kilogramme (unité de masse), il était, jusqu'en 2019, matérialisé par le célèbre et sacro-saint cylindre de platine conservé au BIPM (Bureau International des Poids et Mesures), situé à Sèvres (92310). Inconvénients : la Terre se déforme, donc le mètre aussi. Quant au kilogramme, sa définition dépendait d'un « artefact », c'est-à-dire de ce brave cylindre : pas très universel ! Par suite, toutes les unités ont vu leurs définitions changées, au profit de la précision et de l'universalité, mais adieu la simplicité ! Ceci dit, voici le bestiaire en question, mais on conseille vivement au lecteur non familiarisé avec la physique de ne pas trop regarder, du moins pour le moment, la troisième colonne du tableau en rouge (définitions exactes des unités), car elle contient des notions pas encore explicitées dans ce document ! Enfin, souvent, les unités sont nommées en mémoire des scientifiques qui ont collaboré à la naissance des sciences⁵.

Les unités que nous allons voir dans tout ce qui suit sont les unités légales, d'utilisation obligatoire dans tous les pays qui ont signé la Convention du Mètre. Elles constituent un système d'unités appelé Système International (en abrégé, SI).

La Convention du Mètre est un traité international datant de 1875 et signé par de nombreux pays depuis cette date. Son but statutaire est de préserver *l'unification internationale et le perfectionnement du système métrique*. La première décision découlant de ce traité a été la création du BIPM, le vénérable *Bureau International des Poids et Mesures*, qui est l'une des premières organisations intergouvernementales et qui date aussi de 1875. Cette structure permanente, dont le siège est installé au Pavillon de Breteuil à Sèvres (Hauts de Seine), s'appuie sur deux organes dits « de gouvernance » : la CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures, organe décisionnel de la Convention du Mètre), et le CIPM (Comité International des Poids et Mesures), placé sous l'autorité de la CGPM. Le but de tout ce monde est d'assurer la préservation et, chaque fois que cela est nécessaire, la modernisation de la définition des unités. Pourquoi modernisation ? N'oublions pas qu'à la création de la Convention du Mètre (1875), ni la mécanique quantique ni la relativité n'avaient encore vu le jour, et ces deux branches de la physique, pour ne citer qu'elles, ont largement apporté leur contribution au perfectionnement de la métrologie à la base de nouvelles définitions. La CGPM est l'organe plénier (exécutif) du BIPM. Elle est chargée de prendre les décisions dans le domaine de la métrologie. La CGPM se réunit à intervalles plus ou moins réguliers (tous les quatre ans en ce moment). Le CIPM, pour sa part, coordonne les divers travaux entrepris par les états membres dans le domaine de la métrologie relative aux unités. La première réunion de la CGPM a eu lieu en 1889. La vingt-septième s'est tenue en 2022.

⁵ Et pas une femme ! Le « curie », unité de radioactivité encore parfois utilisée, se réfère non pas à Marie, mais plutôt à Pierre Curie, son époux...

Tableau des grandeurs fondamentales et de leurs unités :

| Grandeur fondamentale | Nom de l'unité (et son symbole entre parenthèses) | Définition de l'unité (ne pas trop s'en préoccuper pour l'instant, vous pouvez sauter cette colonne ! Vous y reviendrez ultérieurement si nécessaire...) |
|-----------------------|--|--|
| Longueur | mètre (m) | Le mètre est le trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée égale à $1/299\,792\,458$ seconde |
| Masse | kilogramme (kg) | Jusqu'il y a peu, la définition du kilogramme était la masse d'un étalon conservé au Pavillon International des Poids et Mesures. Il est maintenant défini à partir de notions de mécanique quantique, mais on peut oublier ça pour le moment. |
| Temps | seconde (s) | Désolé, on fait encore appel à la mécanique quantique : la seconde est la durée de $9\,192\,631\,770$ périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 à une température de 0 Kelvin. |
| Température | kelvin (K) Cependant, vous ne serez pas inquieté par la Justice si vous utilisez le degré Celsius, de symbole °C. En fait, une variation de température de 1 kelvin est exactement égale à une variation de température de 1 degré Celsius. Le zéro absolu correspond à 0 kelvin, et équivaut à la température de $-273,15^{\circ}\text{C}$ | Le kelvin, est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau. Point triple, qu'est-ce ? On sait qu'un corps peut se trouver à l'état liquide, solide ou gazeux. Or, les corps purs, comme l'eau, ont une propriété bizarre : suivant certaines conditions bien précises de température et de pression, un corps peut se trouver dans l'état solide, liquide et gazeux en même temps ! Pour l'eau, cela se passe à une température de $0,01^{\circ}\text{C}$, et la pression doit être faible : $0,006$ fois la pression atmosphérique normale. |
| Intensité électrique | ampère (A) Cette définition est basée sur le fait que deux fils électriques parcourus chacun par un courant électrique exercent l'un sur l'autre une force d'attraction (si les courants sont parallèles, et répulsion s'ils sont de sens opposés). Cette force est d'origine magnétique. L'unité de force est le newton, et $2 \cdot 10^{-7}$ newton représente une force minuscule : $0,2$ millionième de newton ⁶ . La force est une grandeur dite « dérivée », nous allons le voir ci-dessous. | L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance d'un mètre l'un de l'autre dans le vide produirait entre ces conducteurs une force égale à 2×10^{-7} newton par mètre de longueur. |
| Quantité de matière | mole (mol) | La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans $0,012$ kilogramme de carbone 12 |
| Intensité lumineuse | candela (cd) | La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de $\frac{1}{683}$ watt par stéradian. |

⁶ On rappelle que les notations du genre 10^{18} ou 10^{-19} , que l'on appelle **notations en puissance de dix**, sont utilisées pour éviter les longues phrases et les zéros interminables. Ainsi, 10^3 , c'est un 1 suivi de trois zéros, donc c'est mille. Avec le signe moins, 10^{-3} , c'est 1 divisé par mille, soit un millième. Là, ça n'est pas encore trop difficile. Sans la notation en puissances de dix, ça se compliquerait sérieusement pour les très grands (ou les très petits) nombres : ainsi, il est aisé d'écrire 10^{18} plutôt qu'un 1 suivi de dix-huit zéros, ce qui se prononce aussi un milliard de milliard. Inversement, écrivons plutôt 10^{-18} pour un 1 divisé par 1 suivi de dix huit zéros : c'est un milliardième de milliardième.

Deux notes importantes :

- Dans le tableau précédent, vous noterez, que, par exemple, les noms « kelvin », « ampère » ou « newton », *ne sont pas en majuscule*. En effet, quand on écrit le nom d'une unité en toutes lettres, fut-elle issue du nom propre d'un scientifique, elle est toujours écrite *en minuscules*. Désolé pour Lord Kelvin, physicien irlandais qui, avant d'être anobli par Sa Gracieuse Majesté la Reine Victoria pour services rendus à la science, s'appelait William Thomson... Par contre, les symboles des unités qui dérivent d'un nom propre prennent la majuscule. Ainsi, l'ampère se note A, et le kelvin se note avec un K majuscule, ce qui console un peu Lord Kelvin. Par contre, le kilogramme se note kg, sans majuscule, car il n'existe pas de M ou Mme Kilogramme à l'origine de cette unité.
- Dans les calculs scientifiques, en physique par exemple, il est **obligatoire** d'utiliser ces unités, car les formules et équations, pour « fonctionner » correctement au plan numérique, requièrent l'utilisation des unités précédemment décrites. Il en ira de même des unités dérivées, que nous allons à présent définir ci-dessous.

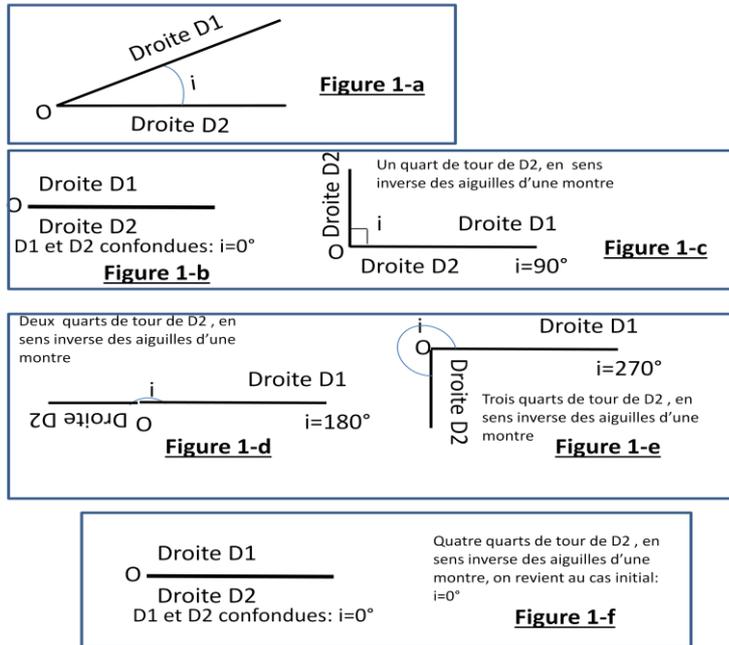
4) Et les autres grandeurs, les grandeurs dérivées, où sont-elles passées ?

C'est bien joli, tout ça, me direz-vous, mais où sont les autres grandeurs qu'on utilise en physique ou dans la vie courante ? Ou sont passées la vitesse et l'accélération ? Qu'avez-vous fait de la force, de l'énergie, de la puissance ? Le champ magnétique et le champ électrique qui nous sont si chers, vous les avez mangés ? Et la fréquence, la tension électrique, la charge électrique, aux oubliettes ?

Non, certes pas ! Toutes ces grandeurs (et d'autres encore) sont ce que l'on appelle des **grandeurs dérivées**, comme on l'a dit plus haut, car elles découlent de définitions qui impliquent les sept grandeurs fondamentales. Ainsi, nous l'avons vu, la vitesse est définie par la longueur divisée par le temps, et son unité est le mètre par seconde (dans la vie courante, on utilise aussi le kilomètre par heure). Voyons les principales grandeurs et unités dérivées.

- **Surface.** On sait que la longueur est la distance qui sépare deux points de l'espace : c'est un objet mathématique à **une dimension**. Par contre, la surface est un objet à **deux dimensions** et ne saurait être décrite par la seule longueur. Sa mesure s'appelle **l'aire**, et l'unité d'aire est le mètre carré (m^2)
- **Volume.** C'est un objet à trois dimensions. Sa mesure s'appelle également « volume », et l'unité utilisée est le mètre cube (m^3).
- **Angle :** cette grandeur mérite un développement important, même si nous sommes familiarisés avec cette notion. Imaginons deux droites D1 et D2 qui se coupent en un point O. Comment définir *l'ouverture* créée par l'intersection de ces deux droites ? Pas par une longueur, bien sûr, ni par autre chose, mais par ce que nous avons, depuis que nous sommes enfants, pris l'habitude d'appeler *un angle*, désigné par i (figure 1-a). Le point O s'appelle le *sommet* de l'angle. On va rappeler ici ce que nous avons appris à l'école primaire, et qui est, heureusement, encore vrai à ce jour, malgré les diverses réformes de l'enseignement, et même si nous devons compléter un peu ces notions dans un instant. Nous avons appris que les angles se mesurent *en degrés (notés °)*. Si les deux droites sont parallèles, l'angle est nul ($i=0^\circ$, figure 1-b). Faisons tourner la droite D2 en sens inverse des aiguilles d'une montre (pour les anciens qui ont encore des montres à aiguille). Si les deux droites sont perpendiculaires, l'angle est *droit* ($i=90^\circ$,

figure 1-c). Tournons encore la droite D2 jusqu'à la retourner complètement, l'angle est *plat* ($i=180^\circ$, figure 1-d). Tournons encore d'un quart de tour, l'angle i vaut 270° (figure 1-e). Un dernier quart de tour, *on revient au cas initial* : l'angle vaut 360° (soit quatre fois 90°), mais on voit bien que ça équivaut à un angle de 0° (figure 1-f)



Figures 1-a à 1-f : les angles, et quelques valeurs remarquables.

Introduisons la notion de radian. Rassurez-vous, tout cela ne va pas trop bousculer nos habitudes ! Considérons un cercle de rayon R et de centre O (figure 2). Suivant une mode traditionnelle chez les mathématiciens, on va considérer deux axes perpendiculaires : OX et OY . Le point A est à l'intersection de l'axe OX et du cercle. Considérons un point B sur le cercle. L'angle compris entre OA et OB est noté i . Comme son sommet est le centre O , on dit que c'est un angle au centre. On se souvient aussi que la portion de cercle délimitée par les points A et B s'appelle un *arc de cercle*. On l'appelle *l'arc AB*.

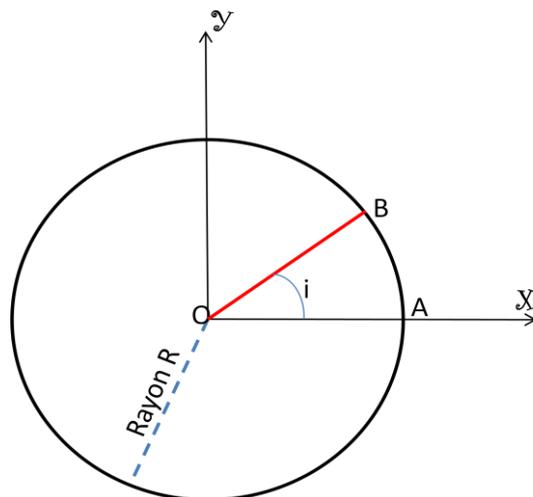


Figure 2 (pour l'introduction de la notion de radian)

A présent, faisons un pas de côté, mais rapide. Si on pose la question : quelle est la longueur de la circonférence de ce cercle, tout le monde répondra que *la circonférence a pour longueur $2 \pi R$* (π étant la lettre grecque *pi*). Tout le monde ajoutera que π vaut 3,14 (à peu de choses près, on laisse tomber les décimales : en réalité, il y a une infinité de décimales, mais peu importe ici). Par contre, si on demande : « *quelle est l'unité de π ?* », il est probable que peu de monde répondra : *π est en radians, et π vaut 3,14 radians*. Par définition, le **radian** (symbole *rd*) est la mesure de l'angle au centre dont les côtés interceptent un arc de cercle dont la longueur est égale au rayon du cercle. Si l'on considère un arc de cercle qui fait tout le tour du cercle, et qui a donc pour longueur la longueur de la circonférence, l'angle de 360° (tour complet, figure 1-f) vaut 2π radians. On en déduit que si 2π radians = 360° , un radian vaut $360/2\pi$, soit un peu plus de 57° . Inversement, on voit que $1^\circ = 0,0174$ rd environ. Un angle droit (90°), le quart du cercle, vaut ainsi $2\pi/4$, soit $\pi/2$. Le radian est la mesure naturelle de l'angle, et les calculs en trigonométrie s'effectuent avec cette unité (la trigonométrie est la branche des mathématiques où interviennent les angles). Cependant, on a toujours le droit d'utiliser le degré, et nos calculettes sont capables d'effectuer pour nous la transformation des degrés en radians, si nous sommes fâchés avec les radians.

Une précision pour finir: en trigonométrie, le sens inverse des aiguilles d'une montre est appelé le sens direct. Le sens des aiguilles est appelé le sens rétrograde.

- **La vitesse** est la distance parcourue par unité de temps (unité : le mètre par seconde, ou **m/s**, ou, dans la vie courante, le kilomètre par heure, noté km/h).
- **L'accélération** est la variation de la vitesse par unité de temps (unité : le mètre par seconde par seconde, ou mètre par seconde au carré, que l'on note **m/s²**).
- **La force** est, par définition, **toute cause qui permet de modifier l'état de mouvement d'un corps**. Si ce corps est initialement au repos, la force peut le mettre en mouvement. S'il est en mouvement, elle peut l'accélérer, le ralentir ou lui faire prendre un virage, éventuellement sans changer la valeur de sa vitesse, mais en modifiant le sens du déplacement. En l'absence de toute force, un corps ne verra pas changer son mouvement, c'est un principe fondamental de la dynamique ! Son unité est le **newton**, noté N, (en l'honneur d'Isaac Newton), on en reparle plus bas...
- **La pression** est la force qui s'exerce sur une surface d'aire unité. L'unité de pression est le newton par mètre carré (**N/m²**), mais on utilise plus souvent le **pascal**, noté **Pa**, (du nom de notre Blaise, cher au cœur des Auvergnats). Un pascal vaut 1 N/m^2 .
- **La charge électrique** d'un corps est la quantité d'électricité qui se trouve dans ce corps. Comme la plus petite particule d'électricité est l'**électron**, on pourrait dire que la charge électrique est la quantité d'électrons en excès ou en défaut contenus dans ce corps⁷. Alors, la charge est négative (charge négative, charge positive : tout ceci est

⁷ Il s'agit ici d'électrons **libres**, qui ne sont pas liés aux atomes du corps. En effet, les atomes comportent des électrons (négatifs) et des protons (positifs), et en général, il y a autant d'électrons que de protons : autant de charges positives que de négatives, au total ça fait zéro. Donc, à l'état normal, la matière est électriquement neutre (charge nulle). Elle n'est chargée que s'il y a un excès ou un manque d'électrons.

conventionnel). L'unité de charge électrique est le **coulomb** (C), en l'honneur du physicien français Charles Coulomb. Par définition, une charge électrique de 1 coulomb (1C) est la quantité d'électricité qui traverse une section d'un fil conducteur pendant une seconde (1s) **si l'intensité est de 1 ampère** (1A). Tous calculs faits, cela revient à un nombre de charges élémentaires assez fantastique : ce nombre est égal à $6,24 \cdot 10^{18}$ soit 6,24 milliards de milliards d'électrons! L'électron porte une charge électrique élémentaire, et cette charge vaut environ -0,16 milliardième de milliardième de coulomb (soit $-1,6 \cdot 10^{-19}$ C). Le signe *moins* rappelle que *par convention*, la charge de l'électron est *négative*. Oui, mais alors, que signifie une charge positive? C'est simple : quand il n'y a pas un excès d'électrons, mais au contraire un manque d'électrons, c'est ça, la charge positive. Lorsque des charges électriques parcourent un matériau capable de les laisser passer (on appelle alors ce matériau un **conducteur électrique : fil métallique, liquide électrolyte,...**), on parle alors de **courant électrique**. **L'intensité électrique** est une **grandeur fondamentale**, nous l'avons vu. C'est, au départ, la quantité d'électricité qui passe dans un circuit électrique par unité de temps. Elle se compte en **ampères** (du nom du physicien français André-Marie Ampère). La définition actuelle de l'ampère est donnée dans le tableau des unités des grandeurs fondamentales et peut vous paraître quelque peu étonnante. On la définissait précédemment comme le déplacement d'une charge électrique de 1 coulomb par seconde à travers un conducteur (c'est toujours le cas, mais on a juste changé de **définition**, désormais plus précise : les physiciens sont d'incorrigibles perfectionnistes !). Attention cependant, ne confondons pas : le signal électrique qui passe à travers le conducteur va pratiquement à la vitesse de la lumière, **c'est une onde**, alors que les charges électriques (électrons, par exemple) se déplacent à très faible vitesse, de l'ordre du millimètre par seconde. Einstein veille, ce n'est pas tout le monde qui peut aller à la vitesse de la lumière !

- **Différence de potentiel électrique, tension électrique, potentiel électrique.**

Prenons par exemple une batterie chargée. Elle possède deux bornes : une borne positive et une borne négative. Cela signifie, en simplifiant les choses, que la borne négative est reliée à un excès d'électrons, et la borne positive à un manque d'électrons. Si nous branchons un moteur électrique aux bornes de la batterie, un courant électrique (flux d'électrons) va le traverser. Le moteur va tourner, et si ce moteur et la batterie sont placés dans une voiture, le moteur peut fournir de l'énergie mécanique à la voiture, qui va alors pouvoir se déplacer **si c'est une voiture électrique** ! La batterie possède donc **potentiellement de l'énergie**.

L'énergie, encore elle ! Désolé, on n'a pas encore donné la définition de ce terme, mais elle sera donnée plus loin. Cela dit, l'énergie, nous en avons une notion intuitive et cela est suffisant pour le moment. L'énergie, vous savez bien ce que c'est : intuitivement, c'est une grandeur physique, si on l'utilise judicieusement, qui se révèle capable, par exemple, de mettre en mouvement des objets initialement immobiles (elle est donc intimement liée à la notion de force, nous allons le voir). C'est ce qui se passe si la voiture en mouvement percute une autre voiture à l'arrêt : elle va la faire bouger...La voiture percuteuse possède de l'énergie dite « mécanique », plus précisément « énergie cinétique⁸ ». La batterie, quant à elle, renferme de l'énergie dite « potentielle », car elle va pouvoir se manifester quand on en aura besoin.

Si l'on dispose d'un appareil de mesure appelé « voltmètre » (Pourquoi ce nom ? Voir quelques lignes plus bas) et qu'on connecte ce voltmètre aux bornes de la batterie, on constatera qu'il existe ce que l'on appelle une **tension électrique** : l'aiguille du cadran (ou l'affichage numérique) montrera une certaine valeur, appelée **différence de potentiel électrique**, ou **tension électrique**, qui se mesure en **volts** (en l'honneur du scientifique italien Alessandro Volta⁹). Différence de potentiel et tension électrique sont deux dénominations d'une seule et même chose. La charge qui se trouve dans la batterie représente donc potentiellement de **l'énergie (patience, on va voir la définition exacte de ce mot dans la suite du texte, même si l'on en a une notion intuitive)**. On peut comparer cela à ce que nos heureux ancêtres faisaient quand ils remontaient le poids qui pendait dans la pendule normande du salon: à deux mètres du plancher, ce poids avait, du fait de sa position élevée, accumulé de **l'énergie, qui est du travail en conserve**.

Le travail, qu'est-ce que c'est ? Et en conserve, en plus !! Le travail : voici une autre notion, pas encore définie, re-désolé, mais dont on a une notion intuitive, qui nous suffira provisoirement. En effet, si vous poussez une voiture en panne, c'est dur, ça résiste et vous savez parfaitement que vous êtes en train de produire du travail, même si vous n'avez pas d'équation pour le définir, ce travail. Les gens qui vous voient pousser s'exclament « Quelle énergie ! ». Ils feraient mieux de vous aider, mais ils ont raison. Quelques lignes auparavant, on a provisoirement (mais sagement !) défini l'énergie comme une grandeur physique capable, par exemple, de mettre en mouvement des objets : on réalise donc que travail et énergie sont des notions apparentées. En réalité, les physiciens n'ont pas inventé le travail ni l'énergie, ils ont simplement cherché à quantifier ces choses-là au moyen d'équations.

Cette énergie emmagasinée dans le poids de l'horloge est dite potentielle (au sens de : *qui existe virtuellement, et que l'on pourra utiliser en cas de besoin*). Cette énergie ainsi accumulée permet au poids, en descendant lentement, de faire en sorte que le mécanisme d'horlogerie puisse continuer à tourner malgré les (petits) frottements qui freinent le mécanisme d'horlogerie. Sans cela, ces frottements n'auraient pas manqué d'arrêter l'horloge (sinon le temps, qui, lui, semble toujours fuir, même sans contrepoids !). Autre exemple : l'eau contenue dans un barrage représente une énergie **potentielle** : quand on laisse couler l'eau vers le bas, cette eau va pouvoir faire tourner une turbine en bas dans la vallée, et cette turbine, en tournant, va fournir de l'électricité, quel bonheur ! **On compare souvent l'énergie potentielle accumulée dans le réservoir de barrage à l'énergie électrique accumulée sous forme de tension électrique dans une batterie.**

⁸ Le mot « cinétique » vient du grec « kinesis », qui signifie mouvement. L'énergie cinétique est celle qui est emmagasinée dans un objet en mouvement.

⁹ Le comte Alessandro Volta est l'inventeur de la pile électrique et d'autres trouvailles, dont la mise en évidence de l'influx nerveux, avec son collègue (et ennemi juré) Luigi Galvani...

- **Précisions supplémentaires sur la force et le poids.**

Reprenons l'exemple de l'ancêtre normand (ou franc-comtois) qui remonte le poids de son horloge. Le poids de cette horloge, cela n'étonnera personne, possède un certain poids, sinon on l'aurait appelé autrement. Il y a quelques décennies, en physique, le poids (et non la masse) était une grandeur de base. On le mesurait en kilogrammes. Depuis, on utilise la **masse comme grandeur de base**, et on la compte toujours en kilogrammes (**kg**). Et le poids, que devient-il ? Eh bien, le poids est simplement une grandeur dérivée : **c'est une force comme une autre** ! Isaac Newton (1642-1727), à qui nous devons la première théorie de la gravitation a, en quelque sorte, créé la partie de la physique que l'on appelle « mécanique » ou « dynamique ». Un sacré génie ! Il a notamment exprimé une loi fondamentale qui dit que, suivant certaines conditions que nous n'examinerons pas ici, mais qui sont en général (approximativement) satisfaites sur Terre, **la force qui s'exerce sur un corps est égale au produit de la masse de ce corps par l'accélération que cette force lui fait prendre**. Rappelez-vous la définition de la force : toute cause qui permet de modifier le mouvement d'un corps. Voici comment s'exprime cette formule : si la masse du corps est désignée par **m**, et si la force est **F**, alors le corps prend une accélération **a** et le tout est regroupé dans la formule fondamentale de la mécanique **F = m a**¹⁰.

En toute rigueur, et pour les gens que cela intéresse, cette formule est valable dans un référentiel dit « galiléen » : c'est un référentiel non soumis lui-même à une accélération. La Terre correspond assez bien à ce critère. Un référentiel, qu'est-ce que c'est ? C'est un système d'axes qui sert à repérer les mouvements du mobile que l'on étudie, dans l'espace et aussi dans le temps, car le référentiel est muni d'un chronomètre (les physiciens disent : une horloge, ce qui revient au même). Au fait : vous pouvez oublier tout ça pour le moment!

Pour en revenir au poids, voici quelque chose de fondamental. Une masse de 1 kilogramme, si vous la laissez tomber, prendra une accélération notée traditionnellement **g** égal à 9,81 m/s² à la surface de la Terre.

¹ Si l'on veut être très précis, la valeur de **g** dépend légèrement de la position géographique sur le globe terrestre. En effet, la Terre est ronde, certes, mais elle est un petit peu aplatie aux pôles, si bien qu'un objet au pôle (N ou S) est plus proche du centre de la Terre qu'un objet situé à l'équateur. Le centre de la Terre, c'est le centre attracteur, qui attire à lui les corps situés à la surface du globe. Comme l'attraction gravitationnelle est inversement proportionnelle au carré de la distance entre deux corps, il s'ensuit que le corps situé au pôle (N ou S) est davantage attiré vers le centre de la Terre qu'un corps situé à l'équateur. N'oublions pas que ce qui mesure l'attraction terrestre, c'est le fameux **g**. Donc, la valeur de **g** est de 9,83 m/s² aux pôles et de 9,78 m/s² à l'équateur. La valeur de 9,81 m/s² représente en réalité une moyenne. Il est à noter que la valeur de **g** est de plus en plus faible à mesure que l'on s'éloigne de la surface terrestre. Sa valeur « normale » est 9,80665 m/s². Elle a été établie par la CGPM (Conférence Générale des Poids et mesures, organe décisionnel de la Convention du Mètre) pour normaliser les diverses expériences.

Le poids **p** vaut alors **mg**, puisque dans la formule **F = ma**, on a remplacé la force **F** par le poids **p** et l'accélération **a** par **g**. Donc, **p** vaut 1 kg multiplié par 9,81 m/s². On aurait pu dire que **p** vaut 9,81 kg m/s², mais ce n'est guère commode et on a dit plus haut que l'on a préféré donner à ce bizarre **kg m/s²** le nom de « **newton** » en souvenir du grand Isaac. Par conséquent, notre kilogramme génère

¹⁰ Lire : **F = m** multipliée par **a**, mais attention : on ne met pas de symbole de multiplication comme « x » ou un point « . » dans les formules de physique quand on multiplie deux nombres.

un poids, qui n'est autre que la force d'attraction que la Terre exerce sur lui, et qui est de 9,81 N. Le symbole N représente le newton. Le newton est donc l'unité de poids, mais plus généralement l'unité de force. **Toute force se comptera donc en newtons !** Cette accélération qui vaut 9,81 m/s² est due à la pesanteur.

*Une remarque en passant. Les « g » (au pluriel), vous en avez peut-être entendu parler si vous vous intéressez à l'aviation : si vous avez un cousin ou une fille qui est pilote de chasse et qu'il (elle) dispose d'un Dassault Rafale biplace pour le week-end, et qu'il (elle) vous emmène faire un tour, fasten seat belts ! Vous ferez peut-être un virage serré (les pilotes de chasse adorent ça !). Alors que l'avion volait par exemple à 900 km/h en ligne droite, le pilote engage un virage, c'est-à-dire qu'il incline l'avion, ce qui le force à tourner dans le plan horizontal. Sans entrer dans le détail, la raison qui oblige l'avion à changer le sens de son mouvement (prendre un virage) est la force aérodynamique que l'air exerce sur ses ailes. Cette force est en partie dirigée vers le centre du virage, ce qui change la trajectoire de l'avion, initialement rectiligne, en une trajectoire circulaire pendant le temps que dure le virage. Souvenez-vous : la force est une cause capable de changer l'état de mouvement d'un objet. Ici, l'état de mouvement de l'avion change, puisqu'il effectue un virage : il passe d'un mouvement rectiligne (en ligne droite) à un mouvement circulaire. La vitesse reste de 900 km/h, mais le sens de la vitesse change à chaque instant. Si l'accélération est de 5g¹¹, vous aurez alors l'impression de peser 5 fois votre poids, puisque l'accélération de l'avion vaut cinq fois l'accélération de la pesanteur **g**, à laquelle nous sommes soumis depuis notre naissance ! Un pilote bien entraîné peut supporter des accélérations supérieures à 10 g, mais ne cherchez pas à refaire ça chez vous sans entraînement... Redressez votre siège, on va atterrir...*

- **Moment d'une force par rapport à un point.**

Moment d'une force. « Donnez-moi un point d'appui et un levier, et je soulèverai le monde », aurait dit Archimède, théoricien du levier. Faisons simple, et imaginons plutôt une balançoire constituée par une longue poutre de 4 mètres posée sur un gros billot de bois. Cet après-midi, Tonton Caradoc (de masse $m_C = 120$ kg) va se balancer avec sa petite nièce Aglaé (de masse $m_A = 40$ kg). On sait que le poids est une force, et donc, ce que l'on va dire est généralisable à n'importe quelle force. Le poids d'Aglaé est égal à $m_A g$, et celui de Caradoc est $m_C g$. Les deux personnages sont à présent assis sur la poutre, immobiles, car ils ne se balancent pas encore (figure 2). Bizarre, la poutre reste horizontale malgré la différence des poids en jeu. On comprend évidemment que la longueur OA de la poutre sur laquelle Aglaé est assise est plus longue que celle qui est dévolue à Caradoc, qui est OC. On désigne par « bras de levier » les longueurs OA et OC. On montre, en physique, que l'équilibre sera réalisé (la poutre reste horizontale) si le produit du poids d'Aglaé par le bras de levier relatif à Aglaé est égal au produit du poids de Caradoc par le bras de levier relatif à Caradoc. Permettez une petite équation :

$$m_A g OA = m_C g OC$$

Le produit $m_A g OA$ s'appelle le **moment du poids $m_A g$ par rapport au point O**, et de même, le produit $m_C g OC$ s'appelle le **moment du poids $m_C g$ par rapport au point O**. De l'équation ci-dessus, on déduit que le rapport OA/OC est égal à m_C/m_A , et donc que OA/OC = 120/40, soit 3. Donc, OA est 3 fois plus grand que OC. L'unité du moment est le *newton mètre* (un newton multiplié par un mètre, symbole N m). Notons que la théorie complète des moments est assez longue et met en jeu des vecteurs, mais ce qui précède est suffisant.

¹¹ Ne pas confondre avec la 5G !

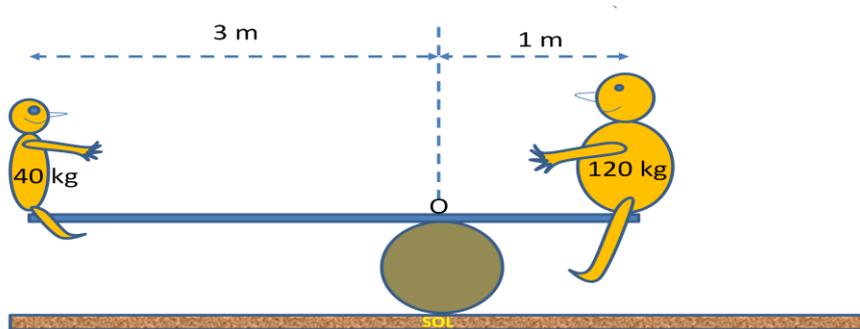


Figure 2 : illustration de l'égalité des moments des forces (ici, les poids)

- **Précisions sur l'énergie et le travail. Equivalence entre énergie et travail.**

Avant l'arrivée des smartphones, les enfants (dont moi) jouaient parfois à un jeu un peu... dangereux, mais sans ondes ! Un petit tour dans les bois : « Tiens voilà un jeune frêne qui m'irait bien », juste une petite tige formant un « y ». On va se faire une belle fronde à élastique, un beau lance-pierre ! Allez hop, on coupe l'arbuste (pardon Idéfix !), on attache un bon élastique aux branches de cet « y », l'élastique passe par deux encoches d'un carré de cuir qui servira à tenir un petit caillou, on tend l'élastique en prenant le carré de cuir entre pouce et index, on vise le zénith, on relâche : le caillou est monté à 20 mètres et redescend, aïe ma tête !...Explication : la force que nous exerçons sur l'élastique a fourni, contre cet élastique, un certain **travail (notion pour le moment intuitive)** quand on le tend. L'élastique a ainsi accumulé de l'**énergie**, c'est-à-dire le pouvoir de restituer un autre travail, ce dernier consistant à lutter contre la pesanteur en envoyant le caillou vers le haut. Conclusion, mais on la savait déjà : **l'énergie et le travail, même nature !** Plus précisément, le travail d'une force se définit ainsi : imaginons une force, par exemple celle que notre main (en fait, la « pince » formée par le pouce et l'index qui enserrant le caillou dans le carré de cuir) exerce sur l'élastique. Cette « pince » matérialise le point d'application de la force. Si on tend l'élastique d'une certaine longueur L (une trentaine de centimètres), le point d'application de la force F que nous exerçons s'est déplacé de la longueur L , ce qui équivaut à un certain **travail**. En physique, le travail d'une force (souvent noté W , pour plaire aux Anglais pour qui le travail s'appelle **work**) est défini comme le produit de la force par la distance parcourue par le point d'application de la force : $W = FL$ (F multiplié par L). Attention : **le déplacement considéré ici est parallèle à la force**. Si le déplacement n'est pas parallèle à la force qui agit, ça change un peu, nous allons voir ça tout de suite. Pour cela, il faut préciser encore une notion : celle de **grandeur orientée**, ou **vecteur**¹². **Patience, c'est un peu long, mais c'est indispensable !**

5) Grandeurs physiques scalaires et grandeurs physiques orientées. Notion de vecteur (grandeur orientée).

¹² En fait, le vecteur, **on en connaît déjà au moins deux jolis** : le champ électrique et le champ magnétique, qui forment le champ électromagnétique et qui sont bel et bien orientés dans l'espace. Reportez-vous au document « Antennes et ondes... », on en parle.

Une question incongrue pour commencer: 500 plus 500, ça fait combien? 1000, évidemment, car 500 est un nombre. Mais si je vous dis que 500 plus 500, ça peut faire 1000, mais aussi zéro, ou tout autre nombre entre zéro et 1000, vous allez vous dire : « Ca y est, notre bon vieil ami est devenu fou, il a dû dormir avec son nouveau *méga-smartphone 9 G plus* sous l'oreiller ! » Eh bien non, parce que $500 + 500 = 1000$ est vrai si l'on a affaire à de **simples nombres**, mais ça se complique si on a affaire à des **forces**, par exemple. Les forces ont une valeur (par exemple 4 newtons), **mais elles ont aussi un sens** (une orientation dans l'espace), contrairement à la masse, par exemple : dans le cas de la masse, 4 kg plus 4 kg, ça fait toujours 8 kg...Ce n'est pas aussi facile pour les forces : **les forces, et c'est ce qui fait leur intérêt, sont des grandeurs orientées**, elles poussent dans **un sens bien déterminé**. Elles sont parfois parallèles entre elles, parfois opposées, parfois elles poussent dans des directions quelconques... Plus généralement : une masse n'est pas orientée spatialement, pas plus qu'une température, ce sont des grandeurs dites « **scalaires** ». Il y en a beaucoup en physique. Une **échelle de valeurs** (basée sur les unités) suffit à les définir (c'est l'origine du mot *scalaire*, qui vient du latin *scala, l'échelle*). Par contre, une force est une **grandeur orientée**. Elle a aussi, bien évidemment, une valeur, mais donner sa valeur en newtons ne suffit plus, car pour une force, **il faut connaître aussi dans quel sens de l'espace elle agit**. Une force, c'est représentable par ce que les mathématiciens appellent un **vecteur**. Un vecteur, c'est tout d'abord un segment de droite particulier, dont la longueur peut représenter, en physique, la valeur de la grandeur (par exemple, la valeur en newtons de la force), **mais attention : un vecteur est un segment, certes, mais qui, en plus, est orienté dans un sens déterminé**. Sa valeur, indépendamment de son sens, est appelée « **module** ». En physique, il y a beaucoup de grandeurs qui sont des vecteurs comme la force. Vous en connaissez déjà d'autres, comme par exemple la **vitesse** : eh oui, ça n'est pas tout de savoir que le mobile se déplace à 15 m/s, il faut aussi savoir s'il va vers Montluçon, vers Rebirechoulet (un gentil village du Gers profond) ou vers Niakaramandougou (une petite préfecture au nord de la Côte d'Ivoire) ! Citons encore le **champ électrique et le champ magnétique** (dont les noces ont engendré le si fameux *champ électromagnétique*), que nous définirons plus loin, mais que nous connaissons si bien !. Insistons : la longueur d'un vecteur, c'est-à-dire son **module**, est une grandeur **positive ou nulle**, qui ne se compte pas en mètres, mais en unités de la grandeur considérée, par exemple en newtons (N) pour une force, en mètres par seconde (m/s) pour une vitesse, en volts par mètre (V/m) pour un champ électrique, etc.... Les opérations qui concernent les vecteurs (addition par exemple), **du fait de leur nature de grandeur orientée**, sont un peu plus complexes que pour les scalaires. Reprenons l'exemple de la force, et voyons comment deux forces peuvent se combiner. Imaginons par exemple deux costauds qui regardent une grosse sphère de pierre, posée sur une surface plane. Ils s'approchent de la sphère et la poussent ensemble dans la même direction, par exemple vers l'est (figure 3). Chacun d'eux développe une force de **module** 500 N (c'est des costauds). La sphère va se déplacer vers l'est, et la force qu'elle subit est simplement la somme des deux, soit 1000 N. Maintenant, supposons qu'ils ne s'entendent plus, nos deux costauds: tandis que l'un pousse vers l'est, l'autre pousse vers l'ouest (figure 4), **et il en résulte une force totale nulle (module nul !)**: la sphère ne bouge pas, car selon Newton, aucune force ne l'amène à sortir de son état de repos. Donc, la combinaison des deux forces fait bien **zéro**, et l'on ne peut pas se contenter d'additionner deux forces comme on le ferait pour deux masses (où 4 plus 4, ça fait toujours 8) ! Plus complexe : maintenant, si l'un pousse vers le nord et l'autre vers l'ouest, on devine que la sphère roulera vers le nord-ouest. Il y a des cas encore plus complexes, comme sur la figure 5, où l'un pousse vers l'ouest et l'autre vers le nord : la sphère roulera vers le nord-ouest. Retenons que les forces **ne s'ajoutent pas comme de simples scalaires**, et que 500 N plus 500 N, ça ne fait pas forcément 1000 N, mais parfois

zéro. Pour vous en faire une idée plus précise, rien ne vaut un schéma. Par souci de simplification, on n'a pas représenté les costauds ni la sphère, mais simplement les **vecteurs-forces**. En d'autres termes, la force que chacun des pousseurs exerce est représentée par une flèche noire. La force résultante de l'action des deux costauds (simplement appelée « **résultante** ») est représentée par une flèche rouge.

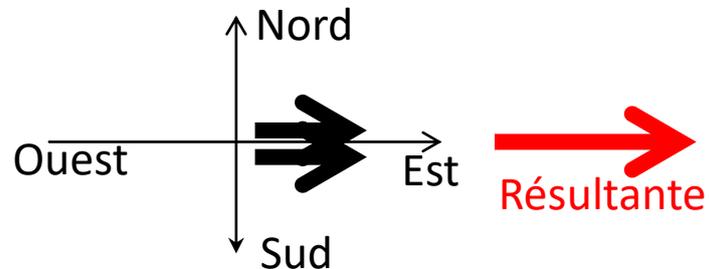


Figure 3 : les deux costauds poussent tous deux vers l'est, les forces s'ajoutent, module de la résultante= 1000 N

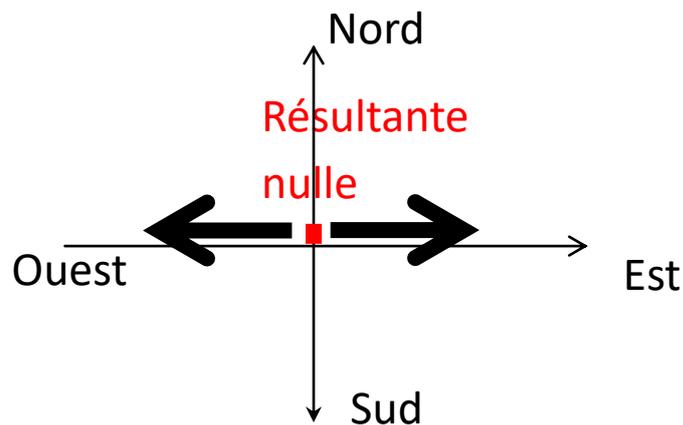


Figure 4: les deux costauds ne s'entendent pas et poussent l'un vers l'est, et l'autre vers l'ouest, donc les forces s'annulent : résultante zéro

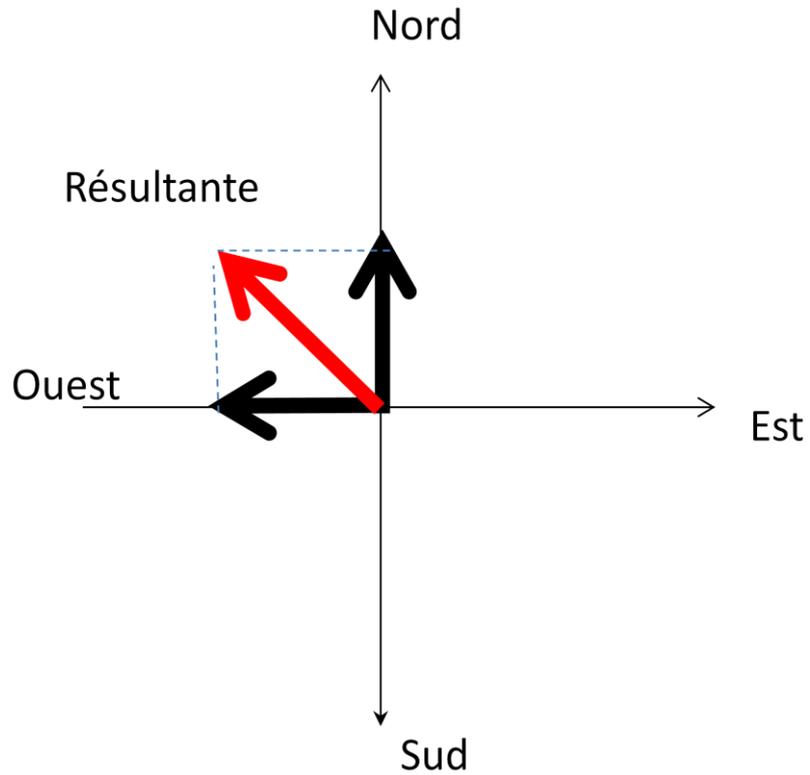


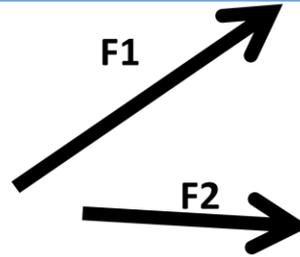
Figure 5: l'un pousse vers le nord, l'autre vers l'ouest, donc, logiquement, la sphère part vers le nord-ouest (sens qu'indique la résultante rouge).

Pour généraliser la méthode de combinaison des vecteurs (on dit aussi **addition vectorielle** ou **somme vectorielle**), voyez la figure 6 ci-dessous.

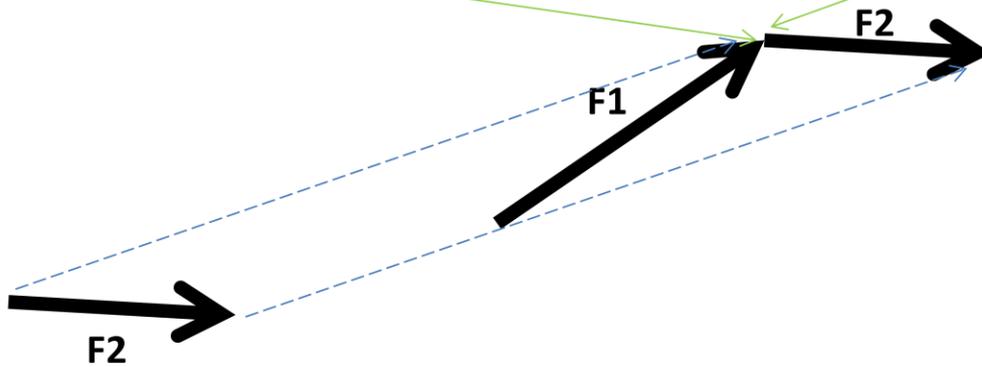
Cas général de combinaison de vecteurs (somme vectorielle) . Quand on veut additionner deux vecteurs quelconques, par exemple deux forces F_1 et F_2 , voici la méthode. Précisons tout d'abord un point de vocabulaire. On parle **d'origine** et **d'extrémité** d'un vecteur pour désigner ces deux points:



Considérons les deux vecteurs F_1 et F_2 ci-contre:
On veut les additionner, comment faire???



Pour additionner (au sens de l'addition des vecteurs) le vecteur F_1 et le vecteur F_2 , faites ceci: faites d'abord glisser F_2 **parallèlement à lui-même** (le long des flèches bleues en tirets) jusqu'à ce que l'origine de F_2 coïncide avec l'extrémité de F_1 .



Tracez alors une flèche entre l'origine de F_1 et l'extrémité de F_2 **ainsi déplacée**, et vous avez la somme (on dit aussi la **résultante**) de ces deux vecteurs (ici en rouge): $R = F_1 + F_2$

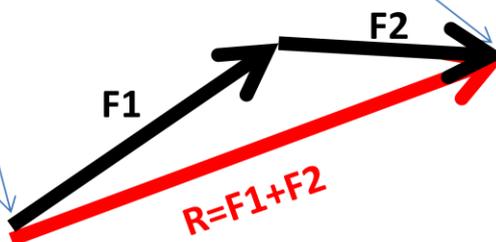


Figure 6 : méthode pour additionner deux vecteurs.

Comment, me demanderez-vous, peut-on exprimer en pratique le fait qu'un vecteur n'est pas un simple scalaire, mais une grandeur orientée ? Pour cela, imaginons (figure 7) un vecteur dans un plan (on peut aussi imaginer un vecteur dans l'espace, mais oublions cela pour le moment, d'autant plus que la méthode reste la même).

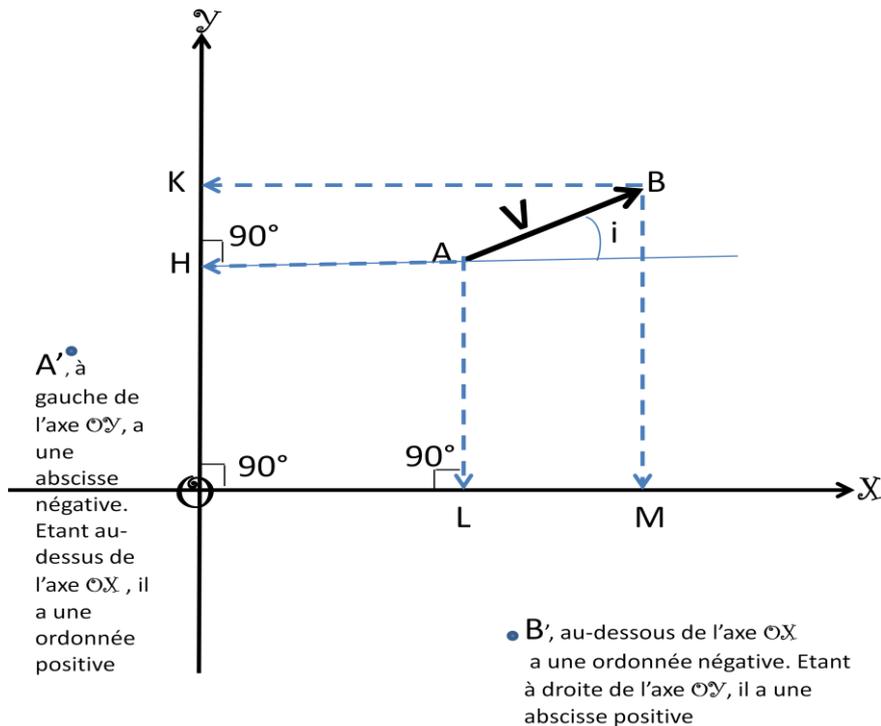


Figure 7 : composantes d'un vecteur

Le plan est matérialisé, **comme c'est la mode en mathématiques**, par un point O , appelé « origine » et deux axes perpendiculaires : Ox (appelé « axe des X ») et Oy (appelé « axe des Y »). Le vecteur V a pour origine A et pour extrémité B . Il fait un angle i avec l'axe Ox . Le point L , sur l'axe Ox , est la **projection orthogonale** de A sur l'axe Ox , c'est-à-dire que le segment AL est perpendiculaire à l'axe Ox et parallèle à l'axe Oy . De même, M est la **projection orthogonale** de B sur l'axe Ox . Pour l'axe Oy , de façon similaire : H est la **projection orthogonale** de A sur l'axe Oy et K est la **projection orthogonale** de B sur l'axe Oy (les segments AH et BK sont perpendiculaires à l'axe Oy et parallèles à l'axe Ox). Notons au passage qu'un point quelconque du plan (A , par exemple) est toujours repéré par ses projections L et H sur les axes. On appelle souvent « **abscisse du point A** » la longueur OL (et cette abscisse peut être positive, comme sur la figure, ou négative, comme par exemple pour le point A'). On appelle « **ordonnée du point A** » la longueur OH , qui dans le cas de la figure est positive (elle est négative pour le point B'). En géographie, OL serait, par exemple, la **longitude** du point A et AL la **latitude** du point A , si l'axe Ox représente l'équateur. Revenons au vecteur V . Par définition, LM est la **projection du vecteur V sur l'axe Ox** , et HK est la **projection du vecteur V sur l'axe Oy** . On dit que le vecteur V a pour **composantes** LM et HK sur, respectivement, les axes Ox et Oy . On a l'habitude de noter $LM = V_x$ et $HK = V_y$, et V_x et V_y sont appelées les **composantes du vecteur V** . **Important** : on doit noter que LM et HK peuvent être positifs ou négatifs : si la longueur OM est plus grande que la longueur OL , alors LM (et donc V_x) est positive, et elle est négative dans le cas inverse. De même, si OK est plus grand que OH , alors la composante V_y est positive (négative si OK est inférieur à OH). Ces composantes V_x et V_y sont aussi appelées « **projections** » du vecteur sur (respectivement) Ox et Oy .

Puisqu'on est en train d'abuser un peu de votre patience, offrons-nous un tout petit peu de **trigonométrie** (on rappelle que la trigonométrie est la branche des mathématiques où interviennent les angles). On peut écrire l'équation suivante : $V_x = V \cos(i)$, où le symbole « $\cos(i)$ » représente le

cosinus de l'angle i . Cette équation permet de calculer la projection du vecteur \mathbf{V} sur un axe avec lequel il fait un angle i . Pour V_y , c'est une autre fonction, le **sinus**, qui est utilisée et on écrit alors: $V_y = V \sin(i)$. Pas de panique : cosinus et sinus sont des fonctions mathématiques **présentes sur toutes les calculettes, tablettes et autres smartphones**.

Donc, quand on aura à manipuler des vecteurs (mais ça ne vous arrivera pas tous les jours !), on se souviendra que ce sont des **grandeurs orientées**. On les définit par leurs composantes V_x et V_y , et cela suffit non seulement à préciser leur orientation dans l'espace, mais aussi leur **module** (leur longueur). En effet, examinons la figure 8.

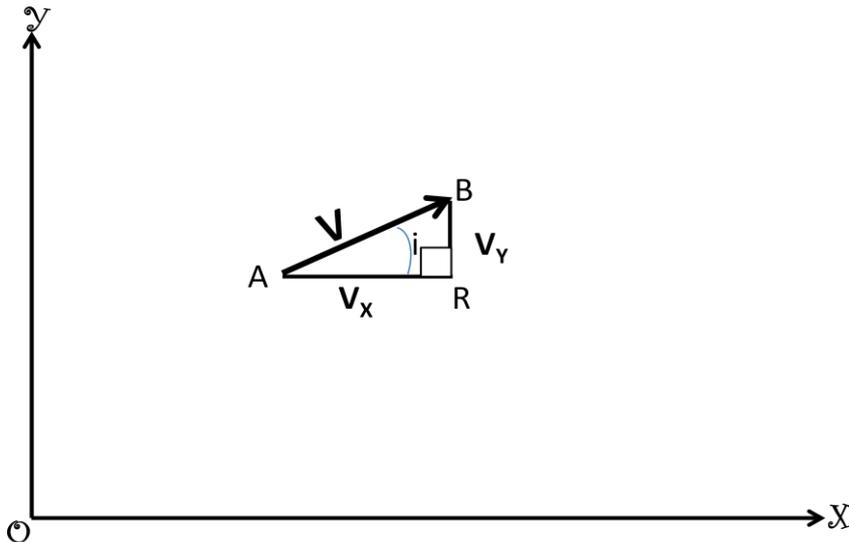


Figure 8 : les projections d'un vecteur \mathbf{V} .

Le triangle ARB est un triangle rectangle en R, et l'on peut appliquer le **théorème de Pythagore** : le carré de l'hypoténuse AB (c'est-à-dire V) est égal à la somme des carrés des côtés AR (donc V_x) et RB (donc V_y), soit donc $V^2 = V_x^2 + V_y^2$, soit enfin $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ (le symbole \sqrt{g} représente la racine carrée de la quantité g , et Dieu merci, cette fonction racine carrée est, elle aussi, présente sur toutes les calculettes).

Si l'on considère un vecteur \mathbf{V} non plus dans un plan, mais dans l'espace orienté par trois axes : Ox , Oy et Oz , la méthode est la même, le vecteur est défini par trois composantes V_x , V_y et V_z , mais restons-en là, si vous le voulez bien, on en a assez vu pour aujourd'hui...

On peut aussi considérer que **ces projections sont des vecteurs à part entière**, et, en les notant en caractères gras (souvent, les vecteurs sont notés en caractères gras, mais dans certains livres, vous les trouverez surmontés d'une flèche), on peut écrire la somme vectorielle $\mathbf{V} = \mathbf{V}_x + \mathbf{V}_y$ (attention : on rappelle que c'est une **addition vectorielle**, et les modules ne s'ajoutent pas : on procède comme sur la figure 6. Les projections considérées comme des vecteurs sont alors identiques aux composantes.

Remarque : si on multiplie un vecteur \mathbf{V} par un scalaire r , on obtient un autre vecteur $\mathbf{V}' = r\mathbf{V}$, parallèle à \mathbf{V} et dont le module est multiplié par r : le module de \mathbf{V}' est rV . Par exemple, si un opérateur téléphonique comprend qu'en un certain point M, par exemple dans ma chambre à coucher, le vecteur champ électrique est égal à \mathbf{E} (de module 3 V/m), et que dans sa bonté il trouve

que c'est trop peu et veut le multiplier par 2, il va régler son antenne de telle sorte que vous aurez un nouveau champ $E' = 2 E$ en ce point M (le module de E' est alors de 6 V/m), avec toujours la même orientation dans l'espace. Merci qui ? Ne riez pas, je parle d'un cas concret...

6) Travail d'une force et notion de produit scalaire.

A présent, nous avons tous les outils **pour définir avec précision ce qu'est le travail** : il était temps, depuis le temps qu'on en parle ! Imaginons un individu (appelons-le Hercule) qui a décidé de tirer un petit wagon sur un rail horizontal et rectiligne, entre le point P (départ) et le point Q (arrivée). Comme Hercule a décidé aussi de ne pas se faire écraser, il marche à côté des rails, et le câble de traction qui est attaché au wagon et qui matérialise la force de traction fait un angle i avec l'axe des rails. Hercule exerce en permanence la force F sur le wagon. Le segment PQ est orienté de P vers Q, donc, puisqu'il est orienté, c'est un vecteur, le vecteur PQ , noté L . Quel travail Hercule a-t-il produit entre le point P et le point Q ?

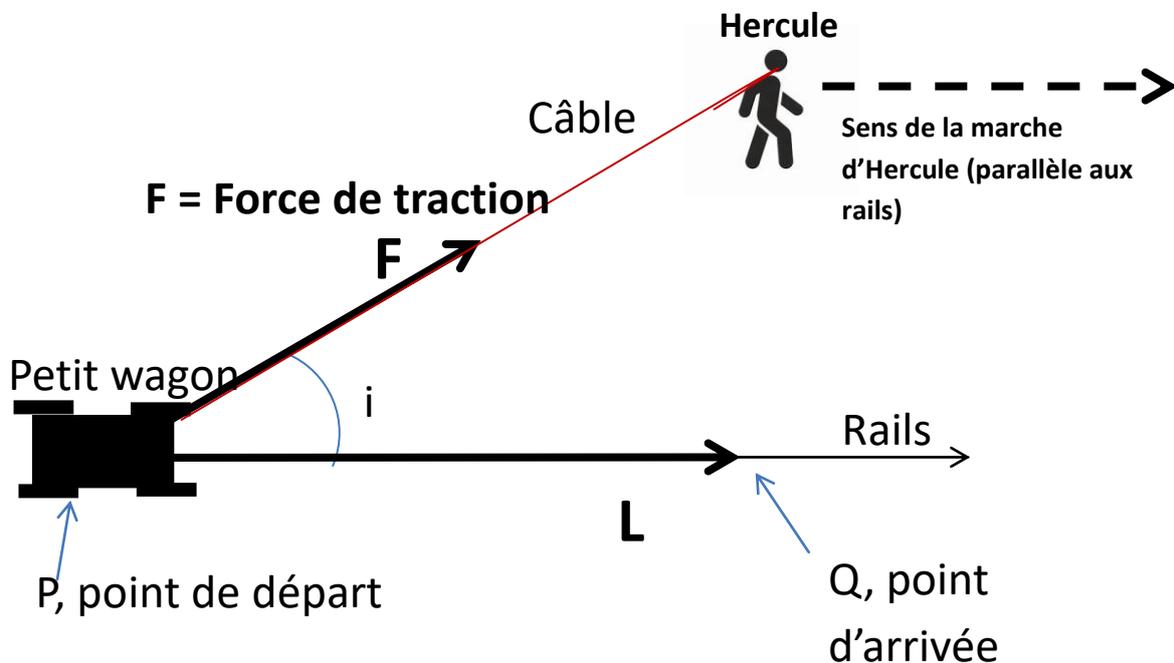


Figure 9 : Hercule découvre le train

On se rend tout de suite compte, en regardant la figure 9, que tout ça n'est pas optimal : en effet, si Hercule marchait entre les rails, toute sa force servirait à mouvoir ledit wagon, mais s'il trébuche, il sera écrasé ! Donc, on lui pardonne, mais alors, comment calculer le travail ? Tout simplement en regardant quelle fraction de la force F est utilisée pour le déplacement du wagon sur les rails.

Attention : par manque d'habitude, notre pauvre Hercule avait commencé par essayer de tirer le wagon comme ci-dessous (figure 10), perpendiculairement aux rails : il n'était pas près d'arriver en Q ! Comme il est costaud, il a fait dérailler le wagon, mais ce dernier n'a pas avancé d'un centimètre vers Q ! Aucun travail, à refaire...

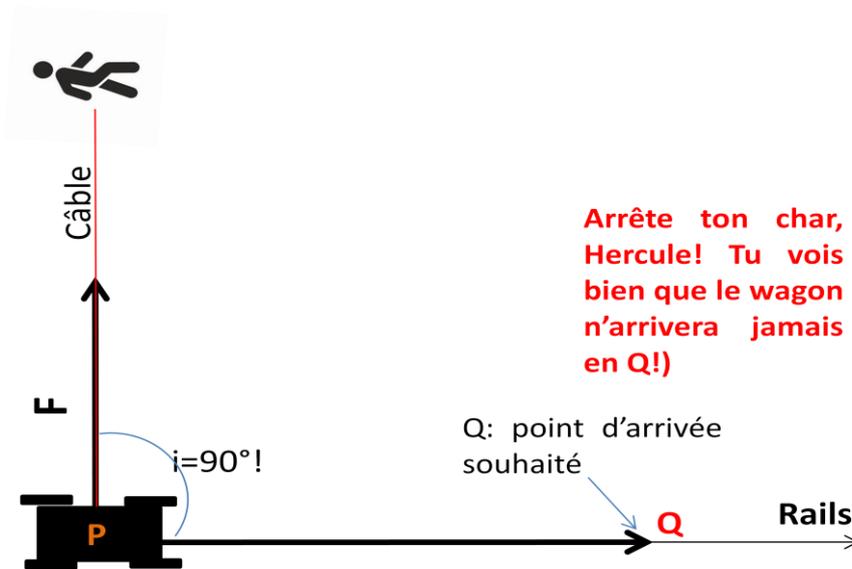


Figure 10 : Au départ, Hercule n'avait rien compris au chemin de fer, il a tout fait dérailler !

Alors, Hercule, reviens à la raison, comme dans la figure 9 !

On a vu il y a un instant la définition des projections d'un vecteur, c'est le moment de les utiliser. La force F peut se décomposer en deux flèches : F_x et F_y , les rails représentant l'axe des X .

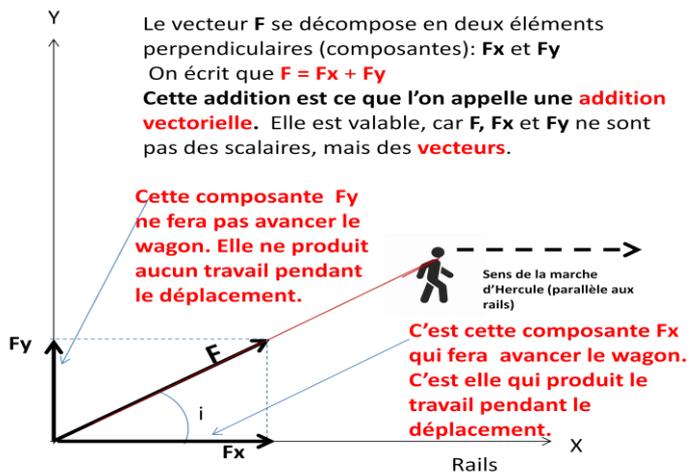


Figure 11 : Hercule a enfin compris, il tire le wagon parallèlement aux rails ! On va considérer le travail de la composante F_x , puisque F_y ne travaille pas (le déplacement du mobile est parallèle à F_x et perpendiculaire à F_y)

La force étant en newtons et la longueur en mètres, logiquement, le travail pourrait avoir une unité qui serait le **newton mètre**, mais on a préféré donner à cette unité le nom de **joule** (en hommage à James Prescott Joule, scientifique anglais). Comme il y a équivalence entre travail et énergie, ces deux grandeurs ont la même unité, le joule. **Le joule (noté J) est par définition le travail d'une force d'un newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force.** Par conséquent, le travail W produit sur le parcours $L = AB$ est égal à $F_x L$, où F_x est la projection de la force F sur l'axe des X , et comme on a vu plus haut que $F_x = F \cos(i)$, on peut écrire $W = F L \cos(i)$.

Cette équation porte en mathématiques le nom de « produit scalaire ». Considérons deux vecteurs, **F** et **L**, qui font entre eux un angle i :

Par définition, leur produit scalaire est noté **F.L** et est égal à $FL \cos(i)$

Donc, le travail W est donné par l'équation $W = \mathbf{F.L} = FL \cos(i)$. Il est à noter que, comme son nom l'indique, le produit scalaire de deux vecteurs est un **scalaire** (nombre), et **non pas un vecteur** (donc W n'est pas écrit ici en caractère gras).

Supposons qu'Hercule, dans cet exercice, développe une force constante de 2000 N (en module), qu'il traîne le wagon sur 10 m et que l'angle i est de 30 degrés, votre calculatrice vous apprendra que le travail est égal à environ 17000 joules. Notons que la force de 2000 N est nécessaire pour vaincre les frottements liés au déplacement (les roulements manquent sans doute de lubrifiant).

7) La puissance : définition et unités.

Un humain normal veut remplacer Hercule, bon courage ! S'il veut déplacer le wagon sur 10 m lui aussi, il devra produire le même travail, soit 17000 J. Notre Hercule a réalisé ce travail en 1 seconde, mais le pauvre humain va mettre exactement 1000 secondes (un peu plus d'un quart d'heure). Même si on n'est pas familier avec la physique, on n'aura aucun mal à dire qu'Hercule est plus puissant que l'humain. En physique, la puissance P développée pendant un processus quelconque (ici, le fait de pousser le wagon sur 10 m) est, par définition, **le quotient du travail W fourni par la durée T du processus.**

$$P = \frac{W}{T}$$

La puissance a pour unité le **watt** (symbole **W**, **mais ne confondez pas avec le travail !**), qui équivaut à un travail d'un joule exécuté en une seconde. Cette unité rend hommage au scientifique écossais James Watt, dont les travaux ont permis, notamment, le développement de la machine à vapeur. Quelle est la puissance développée ici par notre Hercule ? On a vu que le travail W qu'il fournit est égal à 17000 J et le temps mis pour son exploit est $T = 1s$. Donc, en ce qui concerne sa puissance, on voit que $P = 17000/1=17000$ W. On peut aussi parler en kilowatts (kW), et comme 1 kilowatt=1000 watts, alors la puissance développée ici par Hercule est de 17 kW. Pour l'humain, comme le temps mis est de 1000 secondes, sa puissance ici n'est que de 17000/1000 soit 17 watts. Notons au passage qu'il ne s'est pas trop foulé, car un athlète humain peut développer jusqu'à 200 watts pendant un temps relativement long (c'est même de l'ordre de plus de 250 watts pour un coureur moyen du Tour de France).

A présent, nous allons définir en détail les champs qui nous intéressent :

8) Champ électrique, champ magnétique.

En électricité, un **condensateur plan idéal** est formé par deux plaques de grandes dimensions, parallèles et dont l'une est chargée positivement et l'autre négativement. Imaginons que la différence de potentiel entre ces deux plaques est constamment de 1 volt, et que leur distance est de 1m. Alors, il règne entre ces deux plaques un **champ électrique** constant égal à 1 volt par mètre (1 V/m). Dans le cas où la différence de potentiel ne change pas dans le temps, il s'agit d'un champ **électrostatique**. Au contraire, si on fait varier le potentiel des plaques, le champ sera variable, mais

ce sera toujours un champ électrique. Plus généralement, la définition de l'unité du champ électrique, le volt par mètre (V/m), est celle-ci : **c'est la valeur du champ électrique qui, s'exerçant sur une charge électrique de 1 coulomb supposée immobile, lui imprime une force de 1 newton, selon une loi due à Coulomb**, et qui s'exprime par $F = q E$. Ici, q est la charge (un scalaire), E est le champ électrique (vecteur) et F la force (vecteur).

Plus généralement, si vous consultez un ouvrage de physique, vous serez heureux d'apprendre que le champ électrique se définit par la relation $E = - \text{grad}(V)$, où V est la distribution spatiale du potentiel, et « **grad** » est l'opérateur « gradient », **mais vous pouvez oublier ça pour l'instant...**

Quant au champ magnétique B (certains livres l'appellent *induction magnétique*, ne vous étonnez pas), c'est une grandeur que l'on détecte soit dans les aimants permanents (magnétostatique), soit au voisinage de conducteurs électriques. L'unité de champ magnétique est le tesla (T), en l'honneur du scientifique serbe Nikola Tesla. La définition de cette unité est la suivante : le tesla, c'est la valeur du champ magnétique qui, réparti normalement et uniformément sur une surface de 1 mètre carré, produit à travers cette surface un flux d'induction magnétique total de 1 weber (1wb). Rassurez-vous, il n'est pas nécessaire d'approfondir ici cette notion, car, vous le savez, dans les antennes-relais, on va s'intéresser principalement au champ électrique. On rappelle que dans l'onde électromagnétique émise par une antenne-relais, le champ électrique E et le champ magnétique B sont amis pour la vie, vibrent en phase et sont réunis par la relation de proportionnalité : $E = B c$, où c est la vitesse de la lumière, E le module du champ électrique et B le module du champ magnétique. **Attention, ce n'est pas une relation vectorielle** : en effet, en permanence, le champ E et le champ B ne sont pas parallèles, mais sont perpendiculaires entre eux! En pratique, on a pris l'habitude de représenter le champ électromagnétique par la seule valeur (module) du champ électrique. Par contre, en ce qui concerne les champs émis par des courants de basse fréquence (lignes THT, par exemple, de fréquence 50 Hz), on s'intéresse également au champ magnétique, sur le plan sanitaire. Selon les vrais scientifiques (indépendants) il serait judicieux de ne pas dépasser une exposition de l'ordre de $0,5 \mu\text{T}$.

Remarque : la valeur du champ magnétique terrestre, en surface, dépend du lieu où on le mesure. En moyenne, elle est de l'ordre de $0,5 \mu\text{T}$ (microtesla), et elle ne varie que très lentement dans le temps. Notons que les lignes de moyenne tension (20 kV), que nous voyons un peu partout, y compris au-dessus de zones peuplées, induisent (juste en dessous) des champs magnétiques de l'ordre $0,4 \mu\text{T}$ en moyenne, mais ils oscillent à une fréquence de 50 Hz (50 oscillations par seconde). Les lignes THT sont beaucoup plus « agressives » !

9) Notion de densité de puissance (ou densité de flux d'énergie).

En été, sous les latitudes « tempérées », le Soleil envoie sur la Terre une puissance électromagnétique correspondant à plusieurs centaines de watts sur chaque mètre carré de surface (s'il n'y a pas trop de nuages). Insistons sur le fait que la lumière solaire est une onde électromagnétique, mais bénéfique, celle-là, à condition de ne pas s'exposer inconsidérément. On parle alors d'une « **densité de puissance** », dont l'unité est le **watt par mètre carré** (W/m^2). Pour une antenne-relais, cette densité de puissance est véhiculée par le « vecteur de Poynting ». Sans trop entrer dans les détails (au besoin, rapportez-vous au document *Antennes et ondes, plus simple que vous ne le pensez*), ce vecteur de Poynting, noté P , est un vecteur perpendiculaire au plan qui

contient **E** et **B**. Ce plan définit localement l'onde électromagnétique qui se propage à la vitesse de la lumière, suivant le sens matérialisé par **P** (l'onde électromagnétique est en effet une onde transversale, parce qu'elle correspond à des vibrations de E et de B perpendiculaires au sens de propagation). Le module de ce vecteur est donné par la relation $P = \frac{E^2}{377}$ avec un résultat en W/m² si E est en V/m. Ainsi, si E = 0,61 V/m, la densité de puissance est d'environ 1 milliwatt (1 millième de watt) par mètre carré : 1 mW/m². On sait que cette valeur de 0,61 V/m marque, pour les vrais scientifiques, le point où ça commence à être inquiétant avec les ondes téléphoniques. Par contre, pour le Soleil, une valeur de 1 mW/m² représente une densité de puissance infime : on peut aisément supporter des centaines de watts par mètre carré, avec une bonne crème solaire. Eh bien non, chers électrosceptiques, toutes les ondes ne se valent pas ! Ce n'est pas parce qu'on baigne dans les ondes solaires depuis que nos lourds ancêtres sont sortis des marécages et des mers il y a 400 millions d'années pour se chauffer au bon Soleil que l'être humain peut supporter les ondes téléphoniques à haute dose!

Les deux pages suivantes (27 et 28) vous permettront de passer aisément de la valeur du champ E en V/m à la densité de flux P qu'il occasionne. La première colonne représente E, et la colonne immédiatement à sa droite est la valeur P de la densité de flux correspondant à la valeur du champ E (ne pas confondre ce P avec le vecteur de Poynting !). La densité de flux est donnée en milliwatts par mètre carré (mW/m²).

| Colonne1 | Colonne2 | Colonne3 | Colonne4 | Colonne5 | Colonne6 |
|----------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| E(V/m) | P(mW/m2) | E (V/m) | P (mW/m2) | E (V/m) | P (mW/m2) |
| 0,01 | 0,0003 | 0,43 | 0,49 | 2 | 10,61 |
| 0,02 | 0,0011 | 0,44 | 0,51 | 2,2 | 12,84 |
| 0,03 | 0,0024 | 0,45 | 0,54 | 2,4 | 15,28 |
| 0,04 | 0,0042 | 0,46 | 0,56 | 2,6 | 17,93 |
| 0,05 | 0,0066 | 0,47 | 0,59 | 2,8 | 20,80 |
| 0,06 | 0,0095 | 0,48 | 0,61 | 3 | 23,87 |
| 0,07 | 0,013 | 0,49 | 0,64 | 3,2 | 27,16 |
| 0,08 | 0,017 | 0,5 | 0,66 | 3,4 | 30,66 |
| 0,09 | 0,021 | 0,51 | 0,69 | 3,6 | 34,38 |
| 0,1 | 0,027 | 0,52 | 0,72 | 3,8 | 38,30 |
| 0,11 | 0,032 | 0,53 | 0,75 | 4 | 42,44 |
| 0,12 | 0,038 | 0,54 | 0,77 | 4,2 | 46,79 |
| 0,13 | 0,045 | 0,55 | 0,80 | 4,4 | 51,35 |
| 0,14 | 0,052 | 0,56 | 0,83 | 4,6 | 56,13 |
| 0,15 | 0,060 | 0,57 | 0,86 | 4,8 | 61,11 |
| 0,16 | 0,068 | 0,58 | 0,89 | 5 | 66,31 |
| 0,17 | 0,077 | 0,59 | 0,92 | 5,2 | 71,72 |
| 0,18 | 0,086 | 0,6 | 0,95 | 5,4 | 77,35 |
| 0,19 | 0,096 | 0,62 | 1,02 | 5,6 | 83,18 |
| 0,2 | 0,106 | 0,64 | 1,09 | 5,8 | 89,23 |
| 0,21 | 0,117 | 0,66 | 1,16 | 6 | 95,49 |
| 0,22 | 0,128 | 0,68 | 1,23 | 6,2 | 101,96 |
| 0,23 | 0,140 | 0,7 | 1,30 | 6,4 | 108,65 |
| 0,24 | 0,153 | 0,72 | 1,38 | 6,6 | 115,54 |
| 0,25 | 0,166 | 0,74 | 1,45 | 6,8 | 122,65 |
| 0,26 | 0,179 | 0,76 | 1,53 | 7 | 129,97 |
| 0,27 | 0,193 | 0,78 | 1,61 | 7,2 | 137,51 |
| 0,28 | 0,208 | 0,8 | 1,70 | 7,4 | 145,25 |
| 0,29 | 0,223 | 0,82 | 1,78 | 7,6 | 153,21 |
| 0,3 | 0,239 | 0,84 | 1,87 | 7,8 | 161,38 |
| 0,31 | 0,255 | 0,86 | 1,96 | 8 | 169,76 |
| 0,32 | 0,272 | 0,88 | 2,05 | 8,2 | 178,36 |
| 0,33 | 0,289 | 0,9 | 2,15 | 8,4 | 187,16 |
| 0,34 | 0,307 | 0,92 | 2,25 | 8,6 | 196,18 |
| 0,35 | 0,325 | 0,94 | 2,34 | 8,8 | 205,41 |
| 0,36 | 0,344 | 0,96 | 2,44 | 9 | 214,85 |
| 0,37 | 0,363 | 0,98 | 2,55 | 9,2 | 224,51 |
| 0,38 | 0,383 | 1 | 2,65 | 9,4 | 234,38 |
| 0,39 | 0,403 | 1,2 | 3,82 | 9,6 | 244,46 |
| 0,4 | 0,424 | 1,4 | 5,20 | 9,8 | 254,75 |
| 0,41 | 0,446 | 1,6 | 6,79 | 10 | 265,25 |
| 0,42 | 0,468 | 1,8 | 8,59 | 10,2 | 275,97 |

Tableau de conversion du champ électrique en densité de puissance

| Colonne1 | Colonne2 | Colonne3 | Colonne4 | Colonne5 | Colonne6 |
|----------|-----------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|
| E(V/m) | P(mW/m ²) | E (V/m) | P (mW/m ²) | E (V/m) | P (mW/m ²) |
| 10,4 | 286,8966 | 18,8 | 937,51 | 28 | 2079,58 |
| 10,6 | 298,0371 | 19 | 957,56 | 29 | 2230,77 |
| 10,8 | 309,3899 | 19,2 | 977,82 | 30 | 2387,27 |
| 11 | 320,9549 | 19,4 | 998,30 | 31 | 2549,07 |
| 11,2 | 332,7321 | 19,6 | 1018,99 | 32 | 2716,18 |
| 11,4 | 344,7215 | 19,8 | 1039,89 | 33 | 2888,59 |
| 11,6 | 356,923 | 20 | 1061,01 | 34 | 3066,31 |
| 11,8 | 369,337 | 20,2 | 1082,33 | 35 | 3249,34 |
| 12 | 381,963 | 20,4 | 1103,87 | 36 | 3437,67 |
| 12,2 | 394,801 | 20,6 | 1125,62 | 37 | 3631,30 |
| 12,4 | 407,851 | 20,8 | 1147,59 | 38 | 3830,24 |
| 12,6 | 421,114 | 21 | 1169,76 | 39 | 4034,48 |
| 12,8 | 434,589 | 21,2 | 1192,15 | 40 | 4244,03 |
| 13 | 448,276 | 21,4 | 1214,75 | 41 | 4458,89 |
| 13,2 | 462,175 | 21,6 | 1237,56 | 42 | 4679,05 |
| 13,4 | 476,286 | 21,8 | 1260,58 | 43 | 4904,51 |
| 13,6 | 490,610 | 22 | 1283,82 | 44 | 5135,28 |
| 13,8 | 505,146 | 22,2 | 1307,27 | 45 | 5371,35 |
| 14 | 519,894 | 22,4 | 1330,93 | 46 | 5612,73 |
| 14,2 | 534,854 | 22,6 | 1354,80 | 47 | 5859,42 |
| 14,4 | 550,027 | 22,8 | 1378,89 | 48 | 6111,41 |
| 14,6 | 565,411 | 23 | 1403,18 | 49 | 6368,70 |
| 14,8 | 581,008 | 23,2 | 1427,69 | 50 | 6631,30 |
| 15 | 596,817 | 23,4 | 1452,41 | 51 | 6899,20 |
| 15,2 | 612,838 | 23,6 | 1477,35 | 52 | 7172,41 |
| 15,4 | 629,072 | 23,8 | 1502,49 | 53 | 7450,93 |
| 15,6 | 645,517 | 24 | 1527,85 | 54 | 7734,75 |
| 15,8 | 662,175 | 24,2 | 1553,42 | 55 | 8023,87 |
| 16 | 679,045 | 24,4 | 1579,20 | 56 | 8318,30 |
| 16,2 | 696,127 | 24,6 | 1605,20 | 59 | 9233,42 |
| 16,4 | 713,422 | 24,8 | 1631,41 | 60 | 9549,07 |
| 16,6 | 730,928 | 25 | 1657,82 | 61 | 9870,03 |
| 16,8 | 748,647 | 25,2 | 1684,46 | 62 | 10196,29 |
| 17 | 766,578 | 25,4 | 1711,30 | 63 | 10527,85 |
| 17,2 | 784,721 | 25,6 | 1738,36 | 64 | 10864,72 |
| 17,4 | 803,077 | 25,8 | 1765,62 | 75 | 14920,42 |
| 17,6 | 821,645 | 26 | 1793,10 | 70 | 12997,35 |
| 17,8 | 840,424 | 26,2 | 1820,80 | 75 | 14920,42 |
| 18 | 859,416 | 26,4 | 1848,70 | 80 | 16976,13 |
| 18,2 | 878,621 | 26,6 | 1876,82 | 85 | 19164,46 |
| 18,4 | 898,037 | 26,8 | 1905,15 | 90 | 21485,41 |
| 18,6 | 917,666 | 27 | 1933,69 | 95 | 23938,99 |

Tableau de conversion du champ électrique en densité de puissance (suite)

10) Rappel de quelques notions sur les ondes : cycle, période, fréquence, amplitude, crête.

Comme la notion d'onde est extrêmement importante dans nos activités, nous allons reprendre ici une partie de ce que nous avons développé dans le document « Ondes et antennes... ».

Le mot « onde » désigne un ébranlement qui se propage dans un milieu donné. C'est de l'énergie qui se propage. Cet ébranlement peut être complexe, mais l'analyse de ce phénomène fait apparaître des composantes périodiques sinusoïdales, lesquelles sont le modèle le plus simple d'une propagation ondulatoire. Pour éclairer notre propos, et bien que les ondes électromagnétiques sont différentes des ondulations dans l'eau, nous allons prendre un exemple simple.

Cycle de l'onde: Imaginons un bouchon de liège qui flotte sur l'eau et oscille de haut en bas et inversement, quand on a jeté un caillou. Quand, partant du haut, il descend puis remonte, on dit qu'il a accompli un *cycle*. Un cycle, c'est plus généralement le mouvement complet accompli par la grandeur qui oscille, qui vibre.

Période de l'onde : c'est le temps mis pour effectuer un cycle complet. On la note T, et on la compte en secondes.

Fréquence de l'onde : c'est le nombre de cycles par seconde qui s'effectuent. Si T est la période, il est facile de vérifier que la fréquence f de l'onde est égale à l'inverse de T, donc $f = \frac{1}{T}$. Exemple : si la période de l'onde est d'un quart de seconde (0,25 s), en une seconde, il y aura eu 4 cycles.

En effet, $\frac{1}{0,25} = 4$. L'unité de fréquence est le hertz (abréviation : Hz), qui vaut l'inverse d'une seconde. Ici, $f = 4$ Hz.

Amplitude de l'onde : une grosse pierre fera de plus grosses vagues qu'un petit caillou. Le bouchon peut monter plus haut dans le cas de la grosse pierre. On dira que l'*amplitude* de l'onde est plus importante. L'*amplitude* est donc la différence de hauteur entre l'état de repos (on n'a pas encore lancé de pierre) et la hauteur maximum atteinte par la vague.

Crête : la crête désigne le point le plus haut atteint par le bouchon (la valeur maximum de la grandeur qui oscille).

La figure 12 illustre ces définitions, dans le cas d'un bouchon oscillant sur l'eau quand une pierre a été lancée. **Ces définitions s'appliquent à tous les types d'onde, y compris aux ondes électromagnétiques.**

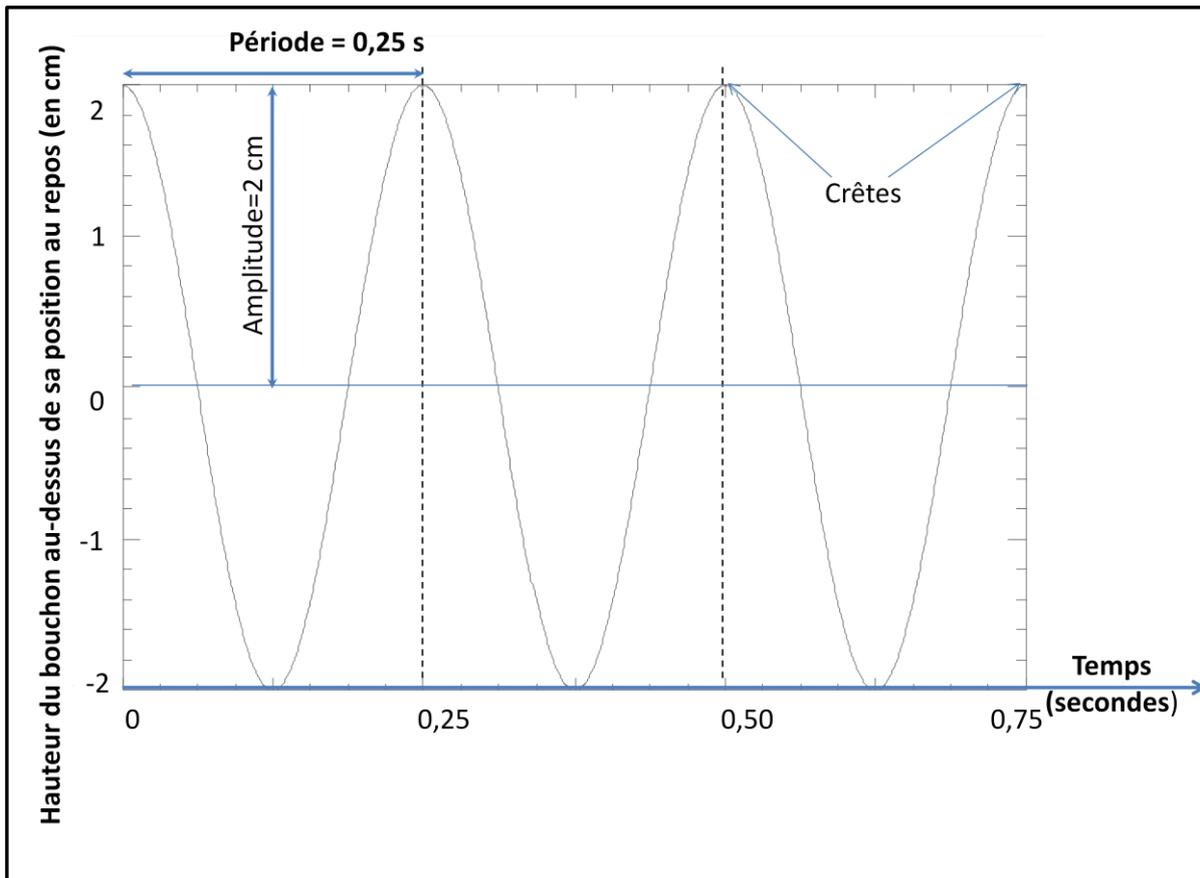


Figure 12 : Exemple d'une onde (sinusoïde) avec définitions.

Longueur d'onde : une manière complémentaire de voir les choses est de considérer la *longueur d'onde*. La longueur d'onde (représentée souvent par la lettre grecque *lambda* : λ) est la distance qui sépare deux crêtes voisines (Figure 13).

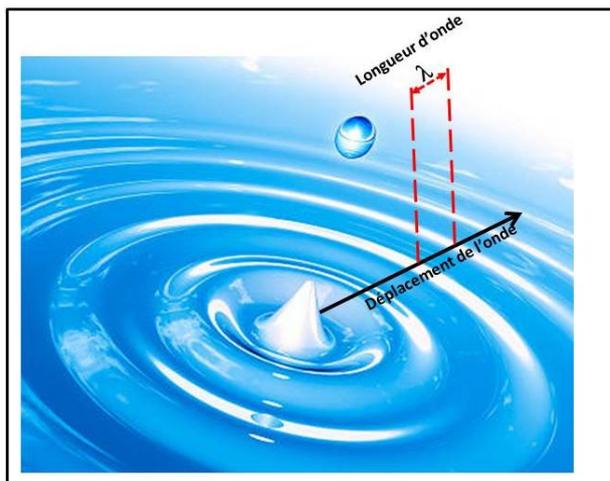


Figure 13 : La longueur d'onde λ est la distance qui sépare deux crêtes voisines.

Si les ronds dans l'eau se propagent vers le bord de la mare à la vitesse v de 2 m par seconde (2 m/s), par exemple, et si la période T est de 0,25 secondes, la distance λ entre deux crêtes est égale au

produit de la vitesse par la période, soit $\lambda = v T$. Donc : $\lambda = 2 \times 0,25 = 0,50 \text{ m}$ (50 cm). Comme $f = \frac{1}{T}$, alors inversement $T = \frac{1}{f}$ et la formule devient $\lambda = \frac{v}{f}$

A retenir donc : $\lambda = v T = \frac{v}{f}$

Retenons que toutes ces notions s'appliquent aussi aux ondes électromagnétiques. La fréquence est le nombre d'oscillations par seconde et son unité est l'hertz (Hz), en hommage à Heinrich Hertz, le scientifique allemand qui a notamment mis en évidence l'existence d'ondes électromagnétiques qui sont depuis lors utilisées pour les transmissions (radio, TV, téléphonie, ...), même si elles existent depuis toujours à l'état « naturel ». A noter que le Soleil émet aussi des ondes électromagnétiques (sa lumière), mais avec des fréquences beaucoup plus élevées (10^{12} à 10^{16} Hz) que les ondes utilisées en télécommunications, qui vont de quelques milliers de hertz (quelques kilohertz ou kHz) à plus de 1 milliard de Hertz ou gigahertz (1 gigahertz, ou GHz, vaut 10^9 Hz).

11) Débit d'absorption spécifique.

Le *DAS*, ou *débit d'absorption spécifique*, est la quantité d'énergie qui pénètre dans le corps humain quand il est exposé aux rayonnements électromagnétiques émis par tout type d'appareil radioélectrique fonctionnant avec des fréquences comprises entre 100 kHz et 10 GHz. Comme appareil, il peut s'agir évidemment d'un téléphone portable (smartphone ou autre), mais aussi de tablettes, téléphones DECT (sans cordon), montres connectées ou tout objet connecté que vous pouvez imaginer... Le DAS se mesure en watts par kilogramme (W/kg). Il n'est pas question ici de faire la critique en règle de cet indice: à ce sujet, vous pourrez notamment consulter l'excellent livre collectif du Pr Belpomme, *Le Livre Noir des Ondes*, éditions Marco Pietteur. Outre le fait que les spécifications sanitaires officielles relatives au DAS ne considèrent que les effets thermiques (les effets non thermiques à long terme étant allègrement niés par nos autorités, pourquoi en tiendrait-on compte ?), on peut se poser la question : il s'agit de watts par kilogramme, mais par kilogramme de quoi ? L'ANFR rappelle qu'il y a trois types de DAS : le *DAS tête* quand on téléphone avec l'appareil à l'oreille (mais à quelle distance ?) : maximum 2 W/kg ; le *DAS tronc* : appareil collé au tronc car posé dans une poche (on recommande le cœur !), ou dans une poche de veste ou un sac (encore une fois : à quelle distance de la peau ?) : maximum 2 W/kg ; le *DAS membre* (appareil tenu à la main ou mis dans la poche, pauvre « membre » !) : maximum 4 W/kg. Oui, mais : toutes les têtes tous les troncs et tous les membres auraient-ils la même masse ? Autre point : Le *Livre Noir des Ondes* cité plus haut montre que cet indice appliqué à un enfant n'a aucun sens. Le cerveau d'un enfant est pénétré plus profondément que celui d'un adulte... On peut aussi critiquer la méthodologie de mesure de cet indice (avec des mannequins remplis de paraffine !). Cela étant, cet indice a tout de même un certain avantage : tous les téléphones du commerce étant tenus de présenter un certificat donnant la valeur de leur DAS, on peut tenir ce DAS comme une donnée relative, qui donne le classement des ces appareils, *du moins mauvais au plus catastrophique*.

III-Avant de terminer : et si l'on parlait de la radioactivité ?

1) Définition de la radioactivité.

Bien que la radioactivité ne semble pas directement située dans le domaine de préoccupation de Robin des Toits, cette question ne peut qu'interpeller notre association, toujours soucieuse de la santé publique, et cela va aussi nous permettre de distinguer les rayonnements non-ionisants (issus de « nos » antennes) et les rayonnements ionisants, que nous allons découvrir.

Le mot « *radioactivité* » définit un phénomène dans lequel *un noyau atomique* se désintègre, c'est-à-dire se transforme en un ou plusieurs noyaux de masse plus faible. Cette désintégration s'accompagne d'une émission de *particules* telles que des *électrons*, des *neutrons*, des *particules alpha*, par exemple, ou des *rayonnements* comme les *rayons gamma*. Cette désintégration s'accompagne également d'un dégagement de chaleur. C'est ce dégagement de chaleur qui est à la base du fonctionnement des *centrales nucléaires à fission* (qui sont simplement des machines à vapeur sans charbon ni gaz), ou encore, hélas, trois fois hélas, à l'origine du fonctionnement des *bombes atomiques* ! La radioactivité a été découverte au 19^e siècle, et son étude a largement contribué à la connaissance de la structure intime de la matière : c'est une branche de la science, qui ne saurait donc être condamnée en tant que telle. Seuls ses applications parfois néfastes posent problème... Nous ne détaillerons pas les divers types de radioactivité (alpha, beta et gamma). On va néanmoins revenir ci-dessous sur les termes que nous venons d'employer, même si le lecteur les a rencontrés maintes fois : atomes, protons, neutrons, noyau atomique, électrons...

Les pionniers de la physique atomique (comme Niels Bohr, physicien danois) ont, initialement, proposé de représenter *l'atome comme une planète* (le noyau) entourée de *satellites*, les électrons. Certes, cette représentation peut être trompeuse, car aux échelles incroyablement petites où tout cela se passe, nos représentations macroscopiques sont vraiment « à côté de la plaque », mais cela n'a pas empêché la science de progresser, et ce modèle simple nous permet d'imaginer un peu ce qui se passe dans l'infiniment petit.

On pourrait dire que la nature est *essentiellement composée de vide*, et nous allons voir pourquoi. Enfin, « *voir* », c'est beaucoup dire, car il est évidemment impossible pour notre esprit de se représenter des êtres aussi minuscules que les atomes. Essayons, cependant. Les atomes qui composent notre environnement et notre corps sont constitués d'un assemblage de protons, de neutrons et d'électrons. *Protons et neutrons* sont des *particules élémentaires* qui se trouvent au centre de l'atome et en constituent le *noyau*, d'où leur nom de *nucléons*, tandis que les *électrons* se situent à la *périphérie de l'atome*¹³. Les protons portent une charge électrique positive, les neutrons n'en ont pas, et les électrons ont une charge négative. Commençons par les nucléons : quelle est leur taille, vous demandez-vous ? Difficile à dire de façon exacte, mais c'est de l'ordre du *femtomètre*, plus précisément environ 0,85 femtomètre. Le femtomètre (fm) vaut 10^{-15} m, soit un milliardième de milliardième de mètre. On ne peut se représenter cette taille sans être tenté mentalement de se rapetisser magiquement et de s'approcher du proton, muni d'une règle minuscule et... ? Stop, malheureux ! Une règle et vous-même êtes composés d'un énorme assemblage d'atomes : une règle, c'est bien trop gros pour descendre à ces échelles de taille ! En réalité, cette valeur de 0,85 fm est déduite d'expériences et de calculs, car ça n'est pas observable directement. Continuons dans le

¹³ Il faut noter que les propriétés **chimiques** des divers éléments sont gouvernées par ce cortège d'atomes. Le noyau de l'atome n'intervient pas dans les réactions chimiques.

domaine du minuscule : la masse d'un nucléon (proton ou neutron) est incroyablement petite, environ $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. Ensuite, quelle est la taille du noyau ? Quelques femtomètres. Si l'on veut, par souci de simplicité, se représenter l'atome comme une *sphère* au centre de laquelle se trouve le *noyau* et dont la *surface* serait occupée par les *électrons*, le rayon de cette sphère a une taille de l'ordre du dixième de nanomètre, soit 10^{-10} m. Insistons : les valeurs de dimensions sont *floues*, *fluctuantes*, comme tout ce qui se passe à ces échelles minuscules, où règne la délicieuse *mécanique quantique*... Les électrons se trouvent environs à cette distance de 10^{-10} m du noyau, sur ce qui serait la surface de la sphère. Leur masse a pu être déterminée : environ $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, soit moins du millièbre de celle d'un nucléon ! La taille de l'électron ? Pour l'instant, elle est *indéterminée*, mais ça ne doit pas être très gros ! Un point important : dans leur état *neutre*, les atomes possèdent un nombre d'électrons égal au nombre de protons, donc *leur charge totale est nulle* (autant de charges positives que de charges négatives). Si un atome perd ou gagne un ou plusieurs électrons, il devient un *ion* (charge électrique globale non nulle). On a parlé de *vide*, au début de ce paragraphe : en effet, si la taille de l'atome est de 10^{-10} m et si le noyau a une taille de 10^{-15} m, on peut faire une analogie : imaginez que le noyau soit une bille d'un centimètre de rayon, il serait au centre d'une sphère d'un kilomètre de rayon (10^5 cm), et cette sphère représenterait l'atome ! Il y a de la place... Cela veut-il dire qu'entre le noyau (le centre de l'atome) et les électrons périphériques, il n'y a ... rien ? Disons plutôt qu'il y a du *vide*, et la mécanique quantique nous *interdit de dire que le vide est du néant*, mais revenons à notre sujet. Oui, un atome, c'est essentiellement du *vide*, et pourtant, c'est du solide, car les *forces électromagnétiques* et les *forces dites « nucléaires »* agissent à ces échelles, et maintiennent cet édifice atomique de façon stable. Enfin, pas toujours, et c'est là que nous retrouvons la *radioactivité* : certains atomes sont plus ou moins instables et leur durée de vie est limitée. Par exemple, le célèbre uranium 235 (ainsi appelé car il est constitué de 92 protons et 143 neutrons, dont la somme est 235) peut se désintégrer en émettant de la chaleur. Cette désintégration est naturelle, mais elle peut être provoquée par un bombardement de neutrons dans les centrales nucléaires à fission¹⁴ : les « débris » de la fission sont par exemple le krypton et le baryum. Le premier élément radioactif étudié (par Pierre et Marie Curie¹⁵) est le radium 226, qui possède 88 protons et 138 neutrons. Notons enfin qu'un certain nombre d'atomes possèdent des « isotopes » : ils ont le même nombre de protons, et donc le même nombre d'électrons. Ils diffèrent simplement par le nombre de neutrons. Par exemple, il existe trois isotopes de l'uranium : l'uranium 234 (très peu répandu), l'uranium 235 (un peu plus répandu) et l'uranium 238, qui représente plus de 99% de l'uranium que l'on trouve dans la nature. C'est l'uranium 235 qui est utilisé dans les centrales nucléaires à fission¹⁶. On connaît aussi le carbone 14 (6 protons et 8 neutrons), alors que le carbone « normal » (carbone 12) possède 6 protons et 6 neutrons. Ce carbone 12 est très stable, contrairement au carbone 14 qui se désintègre lentement, phénomène qui est d'ailleurs à la base de la datation des objets en archéologie.

¹⁴ Dans les futures (??) centrales nucléaires à fusion, le processus est différent: le cœur du mécanisme est la création d'un atome lourd à partir de la collision d'atomes plus légers, qui fusionnent, et il se produit un dégagement de chaleur.

¹⁵ Pierre Curie (1859-1906) et Marie Skłodowska-Curie (1867-1934) : ces deux noms sont indissociables et sont liés à des recherches pionnières et fondamentales sur la radioactivité. Ils furent lauréats du prix Nobel de physique en 1903 avec Henri Becquerel. Notons que Marie Curie reçut un second prix Nobel, de chimie cette fois, pour sa découverte du radium et du polonium. Hélas, son époux Pierre était mort en 1906, et ne put donc partager ce prix avec elle. Notons aussi que les super-génies de l'Académie des Sciences refusèrent son entrée à ladite Académie en 1911. Pourquoi ? C'est simple, Marie Curie était une femme. Ah, bon... Science sans conscience n'est que ruine de l'âme, dirait Rabelais !

¹⁶ Comme rien n'est parfait en ce bas monde, l'uranium 235 extrait des mines est naturellement très peu concentré dans le minerai : normal, il se désintègre tout seul. Donc, pour qu'il puisse bien chauffer l'installation, il faut **enrichir** le combustible nucléaire en uranium 235, mais ceci est une autre histoire...

2) Une précision sur la terminologie utilisée : les rayonnements ionisants.

Les éléments (particules ou rayonnements électromagnétiques) issus des désintégrations radioactives font partie de ce que l'on appelle les « *rayonnements ionisants* » : ils sont capables de transformer une molécule en ion, en lui arrachant des électrons ! Rappelons que *les rayonnements issus des antennes relais sont heureusement non-ionisants (on ne peut pas tout avoir !)*, et que ce sont des *ondes*. Aux débuts des études de la radioactivité, on avait pris l'habitude de désigner par « *rayonnements* » des émissions qui, en fait, pouvaient être *non pas des ondes, mais des particules*, car on n'avait pas encore identifié tout ce bestiaire fantastique. Cet abus de langage est resté : on parle, par exemple, de *rayonnement alpha* pour désigner l'émission de *particules alpha*, lesquelles sont en fait *des noyaux d'hélium 4* (deux protons et deux neutrons). De même, le *rayonnement bêta* correspond en réalité à une émission *d'électrons* très énergétiques.

3) Les grandeurs utilisées en radioactivité et leurs unités.

On a parlé de désintégration des noyaux atomiques dans le phénomène de radioactivité. Dans la nature, cette désintégration est spontanée. Il existe également une radioactivité artificielle, dans laquelle un noyau atomique se désintègre sous l'action d'un bombardement de particules. Ainsi, l'uranium 235 se désintègre lorsqu'il est agressé par des neutrons. Quoiqu'il en soit, la première grandeur qui vient à l'esprit, face à un échantillon de matière radioactive, est de caractériser son activité radioactive par le nombre de désintégrations par seconde. Ceci s'appelle d'ailleurs ***l'activité radioactive***. Son unité est le *becquerel* (du nom du physicien français Henri Becquerel, qui a découvert la radioactivité en 1895). Un becquerel (abréviation *Bq*) est une activité qui correspond à une désintégration par seconde¹⁷. On a longtemps utilisé le curie (*Ci*), qui est l'activité d'un gramme de radium. Les deux unités sont très différentes : en effet, $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^7 \text{ Bq}$. On utilise parfois la *désintégration par seconde (dps)* : $1 \text{ dps} = 1 \text{ Bq}$. La *radioprotection* (ensemble des mesures visant à protéger les humains et leur environnement des dangers des rayonnements ionisants) utilise les notions *d'activité massique* et *d'activité volumique* c'est-à-dire le nombre de désintégrations par unité de masse (pour un solide) ou par unité de volume (pour un liquide ou un gaz) de la substance suspecte, pour évaluer s'il y a danger ou pas : on utilise le *becquerel par kg (Bq/kg)* ou le *becquerel par mètre cube (Bq/m³)* suivant le cas. A présent, supposons que l'on se trouve dans une zone pleine de radioactivité, suite à un accident nucléaire ou un bombardement, et que l'on veuille évaluer l'étendue de la catastrophe. Pour quantifier la pollution nucléaire de la zone, la notion pertinente sera *l'activité surfacique*, en *becquerels par mètre carré (Bq/m²)* ou, de façon plus parlante, le *becquerel par kilomètre carré (Bq/km²)*. Comment l'évaluer ? Par exemple, avec un *détecteur Geiger*. Ce compteur détecte les rayonnements ionisants, et donne le résultat en *coups par seconde (cps)*. Le compteur ne détecte qu'une partie de l'activité, car des désintégrations radioactives ont pu se produire sans que les rayonnements qui en résultent passent par l'appareil et ne seront donc pas comptés. Pour passer du comptage en coups par seconde à l'activité en becquerels par mètre carré, il existe des procédures assez complexes, que nous ne détaillerons pas.

¹⁷ En 1986, après l'accident nucléaire de Tchernobyl, un haut personnage ironisait sur une brave personne qui se demandait *si on avait assuré la protection des « becquerels »*. Elle pensait qu'il s'agissait d'oiseaux... Vu le nom, on peut confondre. Eh non, messire, il est inconvenant de se moquer : à cette époque, on affirmait, en haut lieu, que le nuage radioactif avait renoncé à pénétrer en France.

4) Pour évaluer l'impact de la radioactivité sur un être vivant, il existe deux notions, l'exposition et la dose.

L'exposition, tout d'abord. Cette grandeur était utilisée dans les débuts des études de radioactivité, car elle ne nécessitait pas d'appareillage complexe pour la mesurer. L'exposition est le rapport de la charge électrique déposée *dans un centimètre cube* d'air et la *masse de ce centimètre cube* (qui vaut environ 1,3 milligrammes dans les conditions normales de température et de pression¹⁸, mais peut varier suivant la température et la pression locales). L'unité d'exposition était anciennement le *röntgen* (symbole *R*), en l'honneur du physicien allemand Wilhelm Röntgen (qui a notamment découvert les rayons X en 1895). Actuellement, l'unité d'exposition est le *coulomb par kilogramme d'air* (C/kg). Voici la valeur de l'unité ancienne, le röntgen : $1 R = \text{charge de } 1/3 \text{ de nanocoulomb (soit } 10^{-9} \text{ C) / masse de } 1 \text{ cm}^3 \text{ d'air}$, ce qui, en unités SI, est égal à *0,258 millicoulomb par kilogramme d'air*, toujours dans des conditions normales de température et de pression.

La dose, c'est l'énergie déposée par unité de masse par les rayonnements radioactifs. Certes, mais la question se pose : de quelle masse parle-t-on, et pour quel organe ? On va voir que cela rappelle un peu le fameux DAS, ou « débit d'absorption spécifique » des téléphones portables, même si c'est certainement moins fumeux que le DAS. On entre ici dans des considérations physiologiques, terrain miné ! L'unité légale (SI, système international) utilisée pour la dose est le *gray* (symbole *Gy*) en hommage au physicien anglais Louis Gray. Par définition, $1 Gy = 1 \text{ joule déposé par kilogramme de matière vivante exposée}$. On utilise parfois encore une ancienne unité, *le rad* (*rd*), qui vaut *1 centième de gray*. Pour fixer les idées, une séance de radiothérapie (généralement, cela consiste en une forte exposition aux rayons X) équivaut à quelques grays, et un passage à la radiologie (rayons X) représente une dose bien plus faible, de l'ordre du milligray.

Voilà pour la définition de la dose. Oui, mais quel est l'effet physiologique d'une dose donnée, et l'effet physiologique dépend-il du type de radiation ? La dose que nous venons de définir, c'est la dose absorbée. Pour estimer son effet physiologique, on a dû définir les notions de *dose équivalente* et *dose efficace*. La dose équivalente tient compte d'une donnée depuis longtemps reconnue par la médecine : *tous les rayonnements ionisants n'ont pas la même nocivité*. Les rayons X, les rayons beta et les rayons gamma sont moins nocifs que les neutrons, lesquels sont battus en nocivité par les particules alpha.

Les rayons X ont une longueur d'onde comprise entre 0,03 nanomètre (nm) et 10 nm. Rappelons que le nanomètre est égal à 10^{-9} m, et que le spectre visible s'étend de 380 nm à 780 nm environ (0,38 à 0,78 μm si vous préférez, c'est la même chose). Les rayons gamma, quant à eux, ont des longueurs d'onde allant de quelques fractions de picomètre, lequel vaut 10^{-12} m, jusqu'à 0,03 nm. Bien évidemment, les frontières sont floues et les spectres peuvent se chevaucher un peu, mais l'important est de considérer les ordres de grandeur.

La dose équivalente tient compte de ces différentes nocivités. Ainsi, pour une dose donnée sur une partie du corps (échantillon de masse), on affecte un *coefficient ou facteur de type* (de rayonnement), encore appelé *facteur de qualité* : ce facteur vaut 1 pour les rayons X et les rayons

¹⁸ Par définition et par usage courant en physique, les conditions normales de température et de pression (en abrégé CNTP) sont les suivantes : température égale à 0°C (soit 273,15 K) et pression égale à 1 atmosphère, soit 101 325 Pa.

beta ou gamma, 10 (en moyenne) pour des neutrons et 20 pour des particules alpha. *Pour avoir la dose équivalente, on multiplie la dose absorbée par ce coefficient.*

La dose efficace tient compte du fait que pour une dose efficace donnée, les dommages ne sont pas les mêmes suivant le tissu touché. On parlera alors de *dose efficace par organe*. Pour la définir, on part de la dose efficace, mais on lui attribue un nouveau facteur, appelé facteur de pondération, allant de 0,01 à 0,12. Les valeurs de ce facteur augmentent en fonction de la vulnérabilité du tissu considéré. Curieusement (car ça n'est pas intuitif !), la valeur de 0,01 concerne le cerveau, et la plus élevée est affectée à la moelle osseuse. Enfin, comme l'être humain est constitué de tout un ensemble d'organes, on définit la *dose efficace-corps* par la somme des doses efficaces par organe. Pour des raisons de cohérence, la somme de tous les facteurs de pondération est égale à 1.

L'unité de dose efficace, que ce soit la dose équivalente ou les doses par organe ou la dose efficace-corps est le *sievert (Sv)*, en l'honneur du physicien suédois Rolf Sievert. Elle est définie par la relation : 1 sievert = 1 gray pour le rayonnement gamma. Aux USA, on utilise aussi le *rem (röntgen equivalent man)*, qui vaut 0,01 Sv.

Pour caractériser la *dangérosité d'un site radioactif*, on utilise souvent la notion de « niveau de radioactivité », ce qui équivaut à estimer la vitesse à laquelle un individu présent sur le site va absorber la radioactivité. Pour chiffrer ce risque, on définit le « débit de dose efficace ». Son unité est le sievert par seconde (Sv/s), mais on peut aussi utiliser le sievert par heure (Sv/h) si on est vraiment imprudent...

Bon, en conclusion, la radioactivité, c'est un vaste sujet, non ? Oui, mais le nôtre (antennes et ondes) n'est pas mal non plus, et puis... tout se tient, n'est-ce pas ?

5) Encore une minute : j'ai lu quelque part qu'il existe une unité d'énergie (toute petite) appelée l'électronvolt. Qu'est-ce ?

Avant de quitter l'infiniment petit, voici en effet une unité d'énergie que vous pouvez rencontrer si vous lisez des articles relatifs aux particules : *l'électronvolt (symbole eV)*. Cette unité ne fait pas partie du système international (SI), mais est couramment utilisée par les physiciens des particules. Il s'agit de l'énergie cinétique acquise par un électron qui, partant du repos, serait accéléré par une différence de potentiel de 1 volt. C'est, vous le devinez, minuscule : $1 \text{ eV} = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ J}$, que vous pouvez arrondir à $1,6 \cdot 10^{-19}$ joule. Dans les accélérateurs de particules, les énergies acquises sont nettement supérieures à l'électronvolt. Aussi, on utilise couramment les multiples de cette unité : le mégaélectronvolt (MeV), soit 10^6 eV, le gigaélectronvolt (GeV), soit 10^9 eV, et même le téraélectronvolt (TeV), soit 10^{12} eV. Le grand collisionneur du CERN (LHC) est capable d'accélérer des protons au-delà de plusieurs TeV. Rappelons que c'est cet instrument qui a permis la détection du boson de Higgs en 2012.

Tableau des principales grandeurs physiques dérivées (définitions et unités).

| Grandeur | Nom de l'unité et son symbole | Définition de l'unité |
|--|--|--|
| Vitesse | mètre par seconde (m/s) | Vitesse d'un mobile qui, animé d'un mouvement uniforme, parcourt une longueur d'un mètre (1m) en une seconde (1s). |
| Accélération | mètre par seconde carrée (m/s ²) | Accélération d'un mobile animé d'un mouvement uniformément varié, dont la vitesse varie, en 1 seconde (1s), de 1 mètre par seconde (1m/s) |
| Angle | radian (rd) Le degré (°) est aussi utilisé et vaut environ 0,0174533 rd | Dans un cercle, angle au centre dont les côtés interceptent un arc de cercle dont la longueur est égale au rayon du cercle. |
| Force | newton (N) | Force qui, appliquée à une masse d'un kilogramme (1kg), lui communique une accélération d'un mètre par seconde au carré (1m/s ²) |
| Pression | pascal, ou newton par mètre carré (N/m ²) | Force d'un newton (1N), appliquée sur une surface de 1m ² |
| Moment d'une force | newton mètre (N m) | Moment d'une force de 1 N appliquée perpendiculairement à un bras de levier de longueur 1m |
| Travail, énergie | joule (J) | Travail d'une force d'un newton (1 N) dont le point d'application se déplace d'un mètre (1m) dans la direction de la force |
| Puissance | watt (W) | Travail égal à 1J exécuté en 1 seconde (1s) |
| Charge électrique | coulomb (C) | Le coulomb est la quantité d'électricité qui traverse une section d'un fil conducteur pendant une seconde si l'intensité est de 1 ampère (1A). |
| Tension électrique, différence de potentiel | volt (V) | Le volt est la différence de potentiel électrique qui existe entre deux points d'un fil conducteur transportant un courant constant de 1 ampère (1A), lorsque la puissance dissipée entre ces points est égale à 1 watt. |
| Champ électrique | volt par mètre (V/m) | C'est la valeur du champ électrique qui, s'exerçant sur une charge électrique de 1 coulomb (1 Cb) supposée immobile, lui imprime une force de 1 newton (1N) |
| Champ magnétique | tesla (T) ou weber par mètre carré (Wb/m ²) | C'est la valeur du champ magnétique qui, réparti normalement et uniformément sur une surface de 1 mètre carré, produit à travers cette surface un flux d'induction magnétique total de 1 weber (1wb) |
| Densité de puissance | watt par mètre carré (W/m ²) | Puissance d'un watt (1W) arrivant sur une surface d'un mètre carré (1m ²) |
| Fréquence | hertz (Hz) | Un cycle par seconde (1s) |
| (DAS) Débit d'absorption spécifique (rayonnements non ionisants) | watt par kilogramme (W/kg) | Puissance électromagnétique de 1W entrant dans 1 kg de corps humain |

Tableau des principales grandeurs et unités relatives à la radioactivité et aux particules

| Grandeur | Nom de l'unité et son symbole | Définition de l'unité |
|---|---|---|
| Activité | becquerel (Bq) | 1Bq= 1 désintégration/seconde |
| | curie (Ci) | 1 Ci= activité d'un gramme de radium 226 = 3,7 10 ¹⁰ Bq |
| | désintégration/seconde (dps) | 1 dps = 1 Bq |
| Activité volumique | becquerel par kg (Bq/kg) | 1 dps par kg de matière |
| Activité volumique (gaz) | becquerel par m ³ (Bq/m ³) | 1 dps par m ³ de gaz |
| Activité volumique (liquide) | becquerel par litre (Bq/l) | 1 dps par litre de liquide |
| Activité surfacique | becquerel par m ² | 1 dps par m ² de surface |
| | becquerel par km ² | 1 dps par km ² de surface |
| Exposition (unité ancienne) | röntgen (R) | Dépôt de 1/3 de nC dans la masse de 1 cm ³ d'air (CNTP) ¹⁹ |
| Exposition (unité actuelle) | coulomb par kg d'air (C/kg) | Dépôt de 1 C dans la masse de 1 cm ³ d'air (CNTP) |
| Dose (unité actuelle) | gray (Gy) | 1 J déposé par kg exposé |
| Dose (unité ancienne) | rad | 1 rad = 0,01 Gy |
| Dose équivalente et dose efficace | sievert (Sv) | 1 Sv = 1 Gy pour du rayonnement gamma. |
| | Au USA, on utilise aussi le <i>rem</i> (röntgen equivalent man) | 1 rem = 0,01 Sv |
| Débit de dose efficace | sievert par seconde (Sv/s) | 1 sievert de dose de radioactivité absorbée par seconde (ou par heure) |
| | sievert par heure (Sv/h) | |
| Energie (domaine des particules élémentaires) | électron volt (eV) | Energie cinétique acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 volt. 1 eV = 1,602 176 634 × 10 ⁻¹⁹ J |

On s'en doute, il existe encore beaucoup de grandeurs dérivées que nous ne citons pas ici, mais nous avons vu les plus importantes pour ce qui nous concerne. Evidemment, il existe des multiples, et aussi des sous-multiples de toutes les unités (grandeurs fondamentales ou grandeurs dérivées). Voici (merci Wikipédia!) les préfixes à utiliser si vous voulez éviter les longues phrases. En bleu dans le tableau des préfixes, ceux qui sont souvent utilisés. Ainsi, on parlera plus volontiers de *gigahertz* si l'on veut éviter de dire « milliards d'hertz », et de *microvolt par mètre* pour éviter de parler de milliardième de volt par mètre. Certains préfixes (légaux, colonne de gauche) semblent quand même un peu exotiques ! Si vous voulez découper une longueur de 1 mètre en mille milliards de milliards de milliards de morceaux égaux et nommer chaque morceau, vous risquez de ne pas être compris : chaque morceau mesurera un quectomètre (10⁻³⁰ m)... Les rayons gamma, quant à eux, ont des fréquences de plusieurs dizaines d'exahertz (EHz, 10¹⁸ Hz) et peuvent atteindre le zettahertz (ZHz), dans les 10²¹ Hz. Heureusement, « nos » antennes ne rayonnent pas ce genre d'horreur.

¹⁹ On rappelle que l'exposition correspond à la charge électrique déposée dans un centimètre cube d'air divisé par la masse de ce centimètre cube. Le symbole nC représente le nanocoulomb (10⁻⁹ C). La masse du cm³ d'air est évaluée dans les conditions normales de température et de pression (CNTP) et vaut 1,295 g

Tableau des préfixes de multiples et sous multiples, qui évitent les longs discours...

| | | | | |
|-----------------------|-------|-------------------|-----------|---|
| Quetta | Q | 2022 | 10^{30} | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 |
| Ronna | R | 2022 | 10^{27} | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 |
| Yotta | Y | 1991 | 10^{24} | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 |
| Zetta | Z | 1991 | 10^{21} | 1 000 000 000 000 000 000 000 |
| Exa | E | 1975 | 10^{18} | 1 000 000 000 000 000 000 |
| Péta | P | 1975 | 10^{15} | 1 000 000 000 000 000 |
| Téra | T | 1960 | 10^{12} | 1 000 000 000 000 |
| Giga | G | 1960 | 10^9 | 1 000 000 000 |
| Méga | M | 1960 | 10^6 | 1 000 000 |
| Kilo | k | 1795 | 10^3 | 1 000 |
| Hecto | h | 1795 | 10^2 | 100 |
| Déca | da | 1795 | 10^1 | 10 |
| (aucun) | — | — | 10^0 | 1 |
| Déci | d | 1795 | 10^{-1} | 0,1 |
| Centi | c | 1795 | 10^{-2} | 0,01 |
| Milli | m | 1795 | 10^{-3} | 0,001 |
| Micro | μ | 1960 ^d | 10^{-6} | 0,000 001 |

| | | | | |
|-----------------------|---|------|------------|---|
| Nano | n | 1960 | 10^{-9} | 0,000 000 001 |
| Pico | p | 1960 | 10^{-12} | 0,000 000 000 001 |
| Femto | f | 1964 | 10^{-15} | 0,000 000 000 000 001 |
| Atto | a | 1964 | 10^{-18} | 0,000 000 000 000 000 001 |
| Zepto | z | 1991 | 10^{-21} | 0,000 000 000 000 000 000 001 |
| Yocto | y | 1991 | 10^{-24} | 0,000 000 000 000 000 000 000 001 |
| Ronto | r | 2022 | 10^{-27} | 0,000 000 000 000 000 000 000 000 001 |
| Quecto | q | 2022 | 10^{-30} | 0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 001 |

6) Un peu de rêve pour terminer.

A l'attention de ceux qui aiment le fantastique (même quand ce dernier devient réel) : voici un conseil. Si vous voulez découper très finement (vraiment, très finement !) une longueur, alors, attention ! La physique actuelle prévoit qu'il existe une limite inférieure à l'échelle des longueurs. Une longueur, appelée « longueur de Planck », qui vaut environ $1,6 \cdot 10^{-35}$ m (donc un cent millième de quectomètre), serait cette limite, la plus petite longueur imaginable, comme un atome de longueur, au vrai sens du terme de « que l'on ne peut pas couper ». Une longueur inférieure à la longueur de Planck n'aurait donc aucune signification physique. Bon, c'était juste une remarque en passant ...

Document rédigé par :

Guy Cautenet, docteur es-sciences physiques, professeur retraité (Université de Clermont Ferrand),

Membre du Conseil Scientifique de Robin des Toits

Sylvie Cautenet, docteur es-sciences physiques, professeur retraitée (Université de Clermont Ferrand),

Membre du Conseil Scientifique de Robin des Toits