

Livret de cours

Physique/Chimie

1^{ère} Enseignement Scientifique

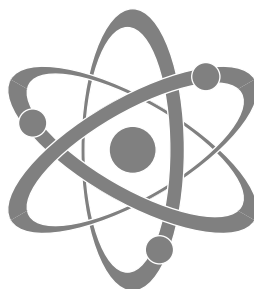
LYCÉE JEAN D'ALEMBERT - ALLIANCE FRANÇAISE DE VALPARAISO - ANNÉE SCOLAIRE 2025

Nom:

Prénom:

Classe:.....

$$P = m \times g$$



$$d = v \times \Delta t$$

Table des matières

1	Un niveau d'organisation : les éléments chimiques.	5
1.1	Formation des éléments chimiques	6
1.2	Abondance des éléments chimiques.	8
1.3	Transformations nucléaires	10
1.4	Radioactivité	12
1.5	Datation au carbone 14	13
1.6	Préparation au DS	14
2	Des édifices ordonnés : les cristaux	17
2.1	Solides cristallins et amorphes	17
2.2	Les cristaux	18
2.3	Où trouve-t-on les cristaux?	21
2.4	Propriétés des cristaux	22
2.5	Préparation au DS	24
3	La forme de la Terre	27
3.1	Un peu d'Histoire	28
3.2	Comment se repérer sur la planète?	31
3.3	Préparation au DS	33
4	La Terre dans l'Univers	37
4.1	L'évolution des modèles autour de la Terre	37
4.2	L'orbite de la Terre	38
4.3	La Lune, satellite naturel de la Terre	39
4.4	Préparation au DS	41
5	Le son : phénomène vibratoire	45
5.1	Émission et propagation d'un signal sonore.	45
5.2	Vitesse de propagation du son	46
5.3	Signal sonore périodique	47
5.4	Perception du son	48
5.5	Hauteur et timbre d'un son	48
5.6	Intensité sonore et niveau d'intensité sonore	49
5.7	Préparation au DS	51
6	Son et musique	55
6.1	Son d'un instrument	55
6.2	La musique, un art organisé	57
6.3	La construction des gammes	59
6.4	Préparation au DS	63

7 Le son, une information à coder	67
7.1 Signaux analogiques et numériques..	67
7.2 Numérisation d'un signal (ou discrétisation d'un signal)..	68
7.3 Compression..	72
7.4 Préparation au DS	74
A Grandeurs physiques, unités et conversions	77
A.1 Unités de base du Système International S.I.	77
A.2 Préfixe des unités	78
B Méthode des 5C : résoudre un problème de PC	81
C Tableau périodique des éléments	83

Préambule

Ce document va vous accompagner pendant votre année de 1^{ère} en enseignement scientifique, partie Physique/-Chimie. Il est à compléter au cours de l'année à l'aide du professeur. Ce document est inspiré, entre autres, des excellents travaux de www.sciensass.net et www.ensciences.fr.

Un niveau d'organisation : les éléments chimiques.

☰ Plan du cours	☺ Humour de physicien
1.1 Formation des éléments chimiques 6 Le Big Bang ■ Les étoiles ■ Les supernovæ ■ Les rayons cosmiques 1.2 Abondance des éléments chimiques 8 L'Univers ■ La croûte terrestre ■ Autres 1.3 Transformations nucléaires 10 Isotope ■ Réaction nucléaire ■ Écriture symbolique d'une réaction nucléaire ■ Réaction de fusion nucléaire ■ Réaction de fission nucléaire 1.4 Radioactivité 12 Stabilité des noyaux ■ Diagramme de Segrè (N-Z) ■ Type de radioactivité ■ Évolution d'une population de noyaux radioactifs 1.5 Datation au carbone 14 13 1.6 Préparation au DS 14 Savoirs et savoir-faire ■ Flashcards	Sodium (Na) • Très réactif, explose au contact de l'eau Chlore (Cl) • Gaz toxique/mortel Chlorure de sodium (NaCl) • Conservateur alimentaire et aromatisant Positivity
◀ Histoire des sciences	
🎧 <i>Big Bang, et l'univers fut! (France Culture)</i>	

1.1 Formation des éléments chimiques

Nous connaissons aujourd'hui, une centaine d'éléments chimiques répertoriés dans la classification périodique :

Mais d'où viennent ces éléments chimiques ?

Nous devons nous plonger dans l'Histoire de l'Univers pour le savoir, du Big-bang à aujourd'hui.

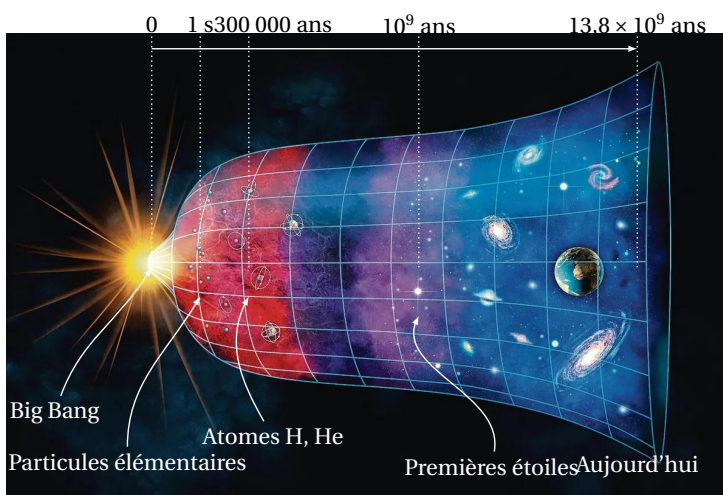


FIGURE 1.1 – Histoire de l'Univers

1.1.1 Le Big Bang

Définition 1.1: Le Big Bang

Le **Big Bang** est une **théorie** qui, à partir de preuves contemporaines, décrit la **naissance de l'Univers** survenue il y a environ **13,8 milliards d'années**. Dans le modèle du Big Bang, l'Univers originel, qui se réduisait à un point très dense et chaud, est rentré en expansion.

La nucléosynthèse correspond à la synthèse de noyaux atomiques par capture de neutrons, de protons, par fusion ou par fission nucléaire.

Définition 1.2: Nucléosynthèse primordiale

A l'origine, au moment du Big Bang, seuls l'hydrogène et un peu d'hélium ont été formés. C'est la **nucléosynthèse primordiale**.

La nucléosynthèse primordiale commence lorsque la température se situe autour de 10^9 K avec la formation de noyaux de deutérium (D) à partir de la réaction entre neutrons et protons « primaires ». Ensuite, cette première phase de nucléosynthèse se poursuit avec formation des éléments légers selon les réactions nucléaires mentionnées ci-contre (γ désigne le photon).

Après environ 15 min, du fait de l'expansion de l'univers, la densité et la température deviennent trop faibles pour permettre la fusion d'autres noyaux et la nucléosynthèse s'arrête. Il faudra attendre l'arrivée des premières étoiles pour voir des éléments plus complexes faire leur apparition.

Les deux éléments principaux à la fin de la nucléosynthèse primordiale sont donc l'hydrogène (les protons) et l'hélium 4 (béryllium et lithium étant présents en très faible quantité) ; la proportion est d'environ un noyau d'hélium pour douze protons.

En résumé, à la fin de cette phase primordiale 98% de la matière dans l'Univers est constituée d'hydrogène et d'hélium. Les noyaux plus lourds résultent de la nucléosynthèse stellaire.

$p + n$	$\rightarrow$	$D + \gamma$
$D + n$	$\rightarrow$	${}^3\text{H} + \gamma$
$D + p$	$\rightarrow$	${}^3\text{He} + \gamma$
$D + D$	$\rightarrow$	${}^3\text{H} + p$
$D + D$	$\rightarrow$	${}^3\text{He} + n$
$D + D$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + \gamma$
${}^3\text{H} + p$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + \gamma$
${}^3\text{He} + n$	$\rightarrow$	${}^3\text{H} + p$
${}^3\text{He} + n$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + \gamma$
${}^3\text{H} + D$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + n$
${}^3\text{He} + D$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + p$
${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + 2p$
${}^4\text{He} + D$	$\rightarrow$	${}^6\text{Li} + \gamma$
${}^4\text{He} + {}^3\text{H}$	$\rightarrow$	${}^7\text{Li} + \gamma$
${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$	$\rightarrow$	${}^7\text{Be} + \gamma$
${}^6\text{Li} + n$	$\rightarrow$	${}^7\text{Li} + \gamma$
${}^6\text{Li} + p$	$\rightarrow$	${}^7\text{Be} + \gamma$
${}^7\text{Li} + p$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + {}^4\text{He} + \gamma$
${}^7\text{Be} + n$	$\rightarrow$	${}^7\text{Li} + p$
${}^7\text{Be} + e^-$	$\rightarrow$	${}^7\text{Li} + \gamma$

FIGURE 1.2 – Formation des éléments légers lors de la nucléosynthèse primordiale

1.1.2 Les étoiles

La nucléosynthèse stellaire se produit lors de la formation d'étoiles due à l'effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz. Cet effondrement s'accompagne d'un échauffement tel que la fusion de l'hydrogène peut se produire. L'énergie dégagée par cette réaction arrête l'effondrement. L'étoile entre alors dans une phase de stabilité, la séquence principale.

Définition 1.3: Nucléosynthèse stellaire

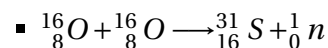
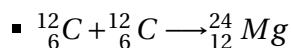
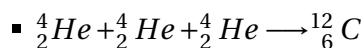
Les étoiles fabriquent des nouveaux éléments par fusion nucléaire, jusqu'au fer (hormis trois : Li, B, Be). C'est la **nucléosynthèse stellaire**.

Pour que l'étoile ne s'effondre pas sur elle-même il est nécessaire que la pression du gaz compense l'action de la gravité : cette pression doit augmenter avec la profondeur. Ceci explique que la température augmente également avec la profondeur : partant de quelques milliers de degrés en surface, celle-ci peut atteindre quelques centaines de millions de degrés dans le cœur de l'étoile.

Ce gradient de température entre le cœur et la surface génère un transfert d'énergie de la région chaude interne vers la région plus froide externe. En surface, ce flux d'énergie s'échappe essentiellement sous forme de rayonnement thermique et l'étoile brille.

À la suite de la transformation de l'hydrogène présent initialement, l'évolution ultérieure d'une étoile dépend essentiellement de sa masse. Plus celle-ci est élevée, plus l'étoile est en mesure d'amorcer des réactions de fusion avec des éléments chimiques de plus en plus lourds. Elle peut ainsi synthétiser du carbone, puis de l'oxygène, du néon, etc. La quasi-totalité des éléments plus lourds que l'hélium est produite dans les étoiles dans les derniers stades de leur évolution.

Exemple 1.1



1.1.3 Les supernovæ

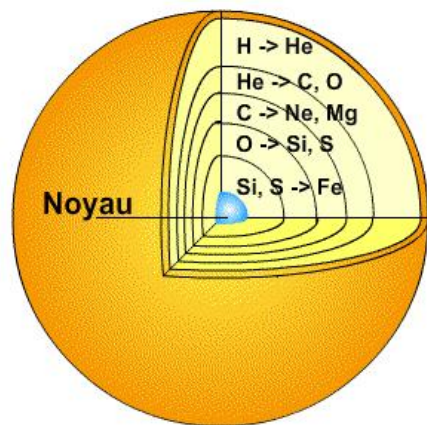
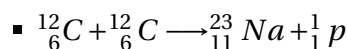
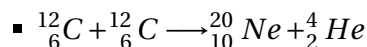
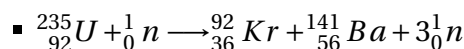
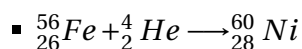
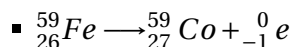
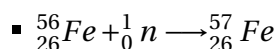


FIGURE 1.3 – Supernova juste avant l'explosion

Si une étoile est suffisamment massive pour synthétiser du fer, alors elle est vouée à connaître une fin sous forme de **supernova** : son cœur implose et ses couches externes sont disloquées par le processus. Le résidu laissé par l'implosion du cœur est un objet extrêmement compact, qui peut être soit une étoile à neutrons, éventuellement détectable sous la forme d'un pulsar, soit un trou noir. Les étoiles moins massives, comme le soleil, connaissent une fin de vie moins violente : elles perdent peu à peu la majeure partie de leur masse, celle-ci se transformant par la suite en une nébuleuse planétaire, et voient leur cœur se contracter lentement pour former une naine blanche. L'explosion d'une supernova libère tellement d'énergie que tous les **autres éléments chimiques** sont produits par fusion, fission ou désintégration. Ils sont expulsés dans l'espace à plusieurs milliers de kilomètres par seconde et ensemencent le vide interstellaire puis formeront des planètes telles que la Terre.

Nous sommes donc des « **poussières d'étoiles** »...

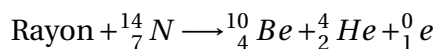
Exemple 1.2**1.1.4 Les rayons cosmiques****Définition 1.4: Rayonnement cosmique**

Le **rayonnement cosmique** est le **flux de noyaux atomiques et de particules de haute énergie** (c'est-à-dire relativistes) qui circulent dans le milieu interstellaire.

Le rayonnement cosmique est principalement constitué de particules chargées : protons (88%), noyaux d'hélium (9%), antiprotons, électrons, positrons et particules neutres (rayons gamma, neutrinos et neutrons).



Les rayons cosmiques génèrent les trois éléments Li, Be et B par interaction avec l'atmosphère.

Exemple 1.3**1.2 Abondance des éléments chimiques**

Les éléments chimiques sont répartis de façon totalement inégale selon "l'endroit".

1.2.1 L'Univers

Quand on observe l'Univers dans son ensemble, on remarque qu'il est essentiellement composé d'hydrogène originel (formé au moment du Big Bang) et d'hélium. Environ 90 % d'hydrogène et 10 % d'hélium.

L'hélium est à la fois originel et produit par les étoiles.

Les autres éléments sont à l'état de traces, ce qui signifie que les étoiles n'ont encore transformé que très peu d'hydrogène originel.

Élément	Hydrogène	Hélium	Oxygène	Carbone	Néon	Azote	Magnésium	Silicium	Fer	Soufre
Symbole	H	He	O	C	Ne	N	Mg	Si	Fe	S
% d'atomes	90	9	0,10	0,06	0,012	0,01	0,005	0,005	0,004	0,002

TABLE 1.1 – Abondance relative des éléments chimiques dans l'univers aujourd'hui

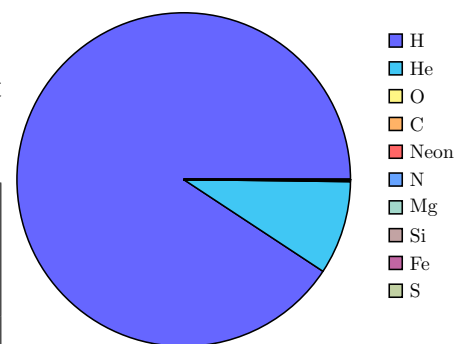


FIGURE 1.4 – Abondance relative des éléments chimiques dans l'univers (% d'atomes)

1.2.2 La croûte terrestre

L'abondance relative change complètement si on s'intéresse à la croûte terrestre : l'hydrogène est quasiment inexistant, tout comme l'hélium alors que les éléments abondants sont l'oxygène (47%), le silicium (28%) et les métaux comme l'aluminium (8%), le fer (4.5%), le calcium (3.5%) ou le sodium (2.5%).

Élément	Hydrogène	Oxygène	Carbone	Magnésium	Silicium	Fer	Aluminium	Calcium	Sodium	Titane
Sym-bole	H	O	C	Mg	Si	Fe	Al	Ca	Na	Ti
% d'atomes	0,22	47	0,19	2,2	28	4,5	8	3,5	2,5	0,46

TABLE 1.2 – Abondance relative des éléments chimiques dans la croûte terrestre

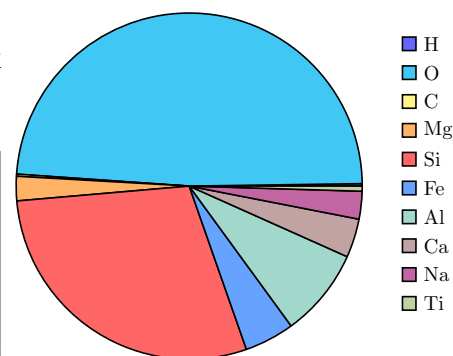


FIGURE 1.5 – Abondance relative des éléments chimiques dans la croûte terrestre (% d'atomes)

1.2.3 Autres

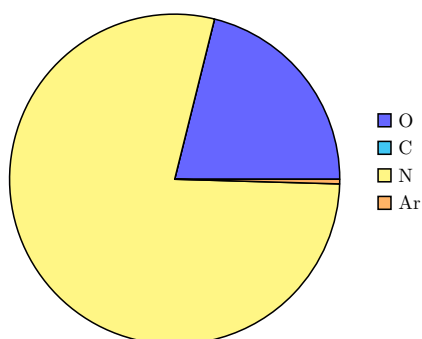


FIGURE 1.6 – Abondance relative des éléments chimiques dans l'atmosphère terrestre (% d'atomes)

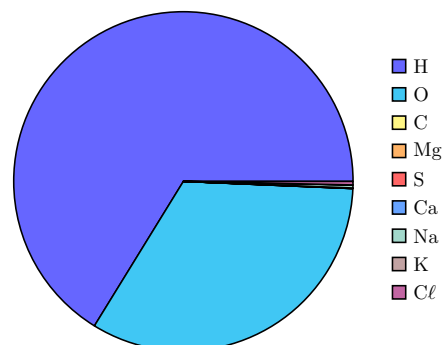


FIGURE 1.7 – Abondance relative des éléments chimiques dans l'eau des océans (% d'atomes)

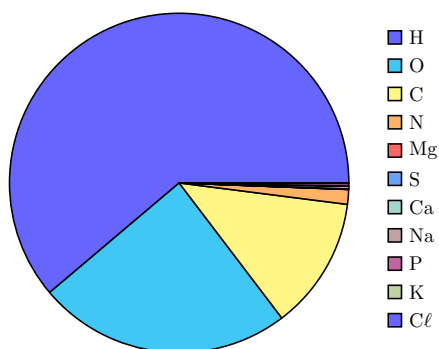


FIGURE 1.8 – Abondance relative des éléments chimiques dans le corps humain (% d'atomes)

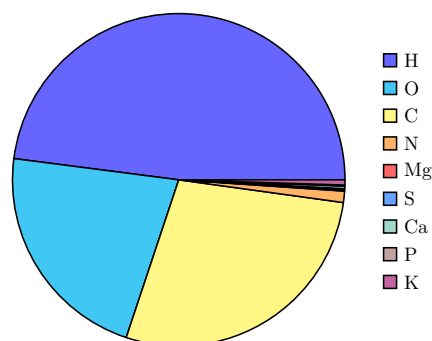


FIGURE 1.9 – Abondance relative des éléments chimiques dans les végétaux (% d'atomes)

1.3 Transformations nucléaires

Une transformation nucléaire **modifie le noyau** même de l'atome.

1.3.1 Isotope

Définition 1.5: Isotope

Les **isotopes** sont des noyaux d'atomes possédant le **même nombre de proton** Z mais un **nombre de neutrons différents**. Ils ont donc les mêmes propriétés chimiques (car ils ont leur cortège électronique identiques), mais des masses très légèrement différentes.

Exemple 1.4

Quelques isotopes de l'élément Titane ($Z = 22$) :

- ${}^{46}_{22}\text{Ti}$ possède 22 protons et $46 - 22 = 24$ neutrons,
- ${}^{47}_{22}\text{Ti}$ possède 22 protons et $47 - 22 = 25$ neutrons,
- ${}^{48}_{22}\text{Ti}$ possède 22 protons et $48 - 22 = 26$ neutrons.

Exemple 1.5

L'argon 40 (${}^{40}_{18}\text{Ar}$) et le calcium 40 (${}^{40}_{20}\text{Ca}$) ne sont pas des isotopes, car leur nombre de protons Z est différent : $Z = 18$ pour l'argon et $Z = 20$ pour le calcium.

1.3.2 Réaction nucléaire

Définition 1.6: Réaction nucléaire

Lors d'une transformation nucléaire :

- un ou plusieurs noyaux se transforment en de nouveaux noyaux,
- les éléments chimiques ne sont pas conservés,
- un rayonnement, dit "gamma" (γ) est émis.

Une réaction nucléaire va modifier le noyau de l'atome, son nombre de protons Z et son nombre de nucléons A vont être modifiés. L'élément va changer puisque Z change.

1.3.3 Écriture symbolique d'une réaction nucléaire

Définition 1.7: Écriture symbolique

On peut décrire une réaction nucléaire par une équation de réaction qui explicite la manière dont les noyaux atomiques changent :



tout en respectant des règles de conservations (règles de Soddy) :

- **conservation de la masse** : $A_1 + A_2 = A_3 + A_4$,
- **conservation de la charge électrique** : $Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$.

Exemple 1.6

Désintégration du carbone 14 pour former de l'azote et éjecter un électron e^- :



Remarque. Dans les réactions nucléaires, des particules peuvent être éjectées (neutron, proton, électron et positron). On va utiliser les notations suivantes pour tenir compte de leur charge et leur masse :

Nom	A	Z	Notation
Proton	1	1	${}_1^1\text{p}$
Neutron	1	0	${}_0^1\text{n}$
Électron	0	-1	${}_{-1}^0e$
Positron	0	1	${}_1^0e$

TABLE 1.3 – Particules intervenant dans des réactions nucléaires.

1.3.4 Réaction de fusion nucléaire

Définition 1.8: Fusion nucléaire

Au cœur du Soleil se produisent des réactions de **fusion nucléaire** qui dégagent une énorme énergie. Elles fusionnent des noyaux d'atomes pour former des noyaux plus lourds.

Pour lutter contre la force électrique répulsive, les deux noyaux ont besoin d'une très grande énergie cinétique : il faut donc une température très élevée (15 millions de degrés dans le cœur de notre Soleil).

Une fusion nucléaire libère alors beaucoup d'énergie.

Exemple 1.7

Quelques réactions de fusions nucléaires se produisant dans le Soleil :

- ${}_1^1\text{H} + {}_1^1\text{H} \longrightarrow {}_1^2\text{H} + {}_1^0e^+$
- ${}_1^2\text{H} + {}_1^1\text{H} \longrightarrow {}_2^3\text{He}$
- ${}_2^3\text{He} + {}_2^4\text{He} \longrightarrow {}_4^7\text{Be}$
- ${}_4^7\text{Be} + {}_1^1\text{H} \longrightarrow {}_5^8\text{B}$
- ${}_6^{12}\text{C} + {}_1^1\text{H} \longrightarrow {}_7^{13}\text{N}$

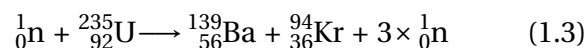
1.3.5 Réaction de fission nucléaire

Définition 1.9: Fission nucléaire

Au cœur d'une centrale nucléaire, des réactions de fission permettent de casser des noyaux atomiques pour former des noyaux plus légers, et elles dégagent beaucoup d'énergie, utilisée pour fabriquer de la vapeur permettant de faire tourner des turbines reliées à des alternateurs qui transforment le mouvement en énergie électrique.

Exemple 1.8

Un neutron ${}_0^1\text{n}$ vient frapper le noyau d'un atome d'Uranium 235 (${}^{235}_{92}\text{U}$) qui va se briser pour former des noyaux plus légers de krypton et de baryum et en éjectant 3 neutrons :



1.4 Radioactivité

1.4.1 Stabilité des noyaux

La stabilité des noyaux résulte de la compétition entre l'interaction forte, responsable de l'attraction entre nucléons, et l'interaction électromagnétique, responsable de la répulsion entre protons.

Si l'interaction forte est la plus intense, le noyau est stable; si l'interaction électromagnétique est la plus intense le noyau est **instable, radioactif**.

Un noyau ${}_Z^AX$ instable subit une transformation aboutissant à la formation d'un nouveau noyau ${}_Z^AY$, c'est le phénomène de **radioactivité**.

1.4.2 Diagramme de Segrè (N-Z)

Chaque élément chimique possède des isotopes qui ont le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent. Certains isotopes sont stables tandis que d'autres sont radioactifs. Le diagramme de Segrè ou diagramme (N,Z) indique les isotopes stables ou radioactifs et fournit le type d'émission radioactive.

1.4.3 Type de radioactivité

Il existe deux types de radioactivités :

- **Radioactivité spontanée** : Elle se produit sans intervention extérieure et est aléatoire (on ne peut pas prévoir quand elle va se produire).
- **Radioactivité provoquée** : Elle est artificielle, provoquée par une intervention extérieure.

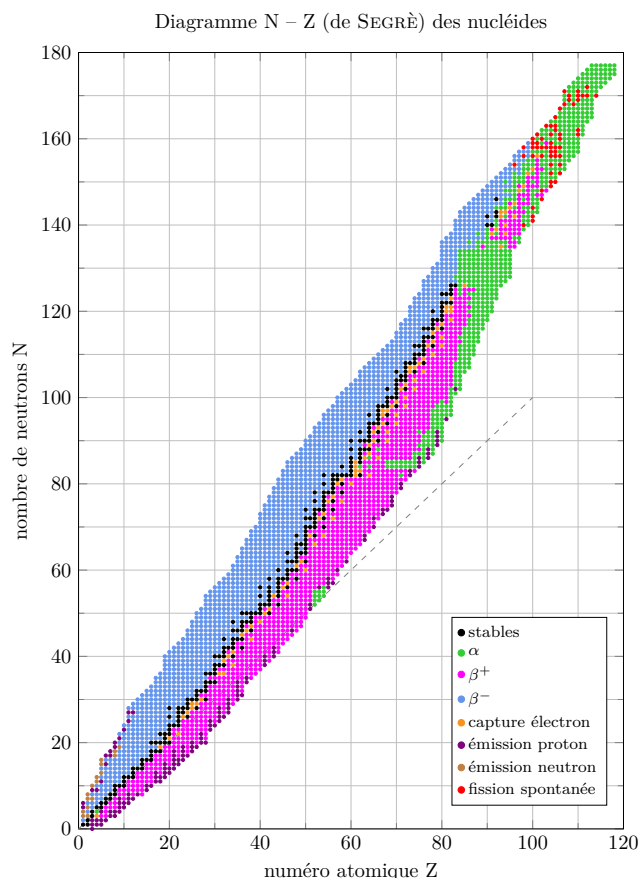


FIGURE 1.10 – Diagramme de Segrè

1.4.4 Évolution d'une population de noyaux radioactifs

Évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs

Un noyau radioactif est un noyau instable subissant spontanément une transformation appelée désintégration permettant un retour à la stabilité. Il ne "vieillit" donc pas puisqu'il se transforme sans subir de modifications progressives.

Pour un noyau donné, le **phénomène de désintégration est donc aléatoire et imprévisible**. Mais l'évolution d'une population de noyaux répond à une loi de probabilité.

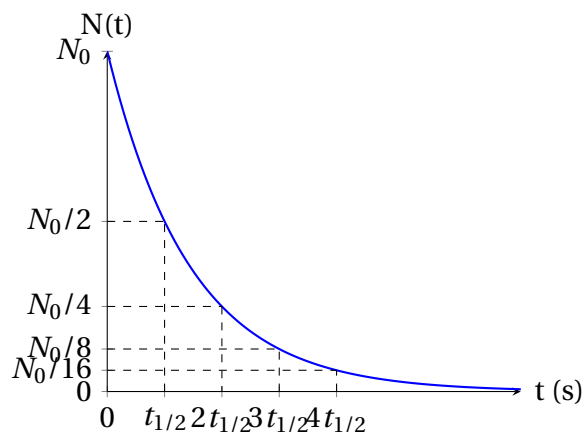


FIGURE 1.11 – Évolution du nombre de noyau en fonction du temps

Demi-vie d'un noyau radioactif

Définition 1.10: Temps de demi-vie

Un noyau radioactif est caractérisé par son **temps de demi-vie** noté $t_{1/2}$. La demi-vie est la **durée** au bout de laquelle la **population initiale** N_0 est divisée par deux.

Dates	Nombre de noyaux
0	N_0
$t_{1/2}$	$N_0/2$
$2t_{1/2}$	$N_0/4$
$3t_{1/2}$	$N_0/8$
$4t_{1/2}$	$N_0/16$
$5t_{1/2}$	$N_0/32$
$nt_{1/2}$	$N_0/2^n$

TABLE 1.4 – Évolution du nombre de noyau en fonction du nombre de demi-vies.

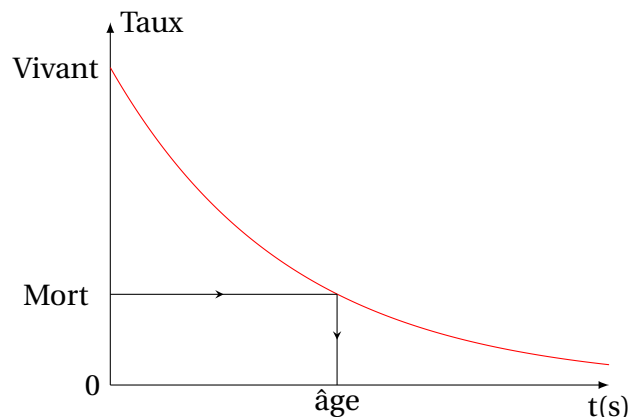
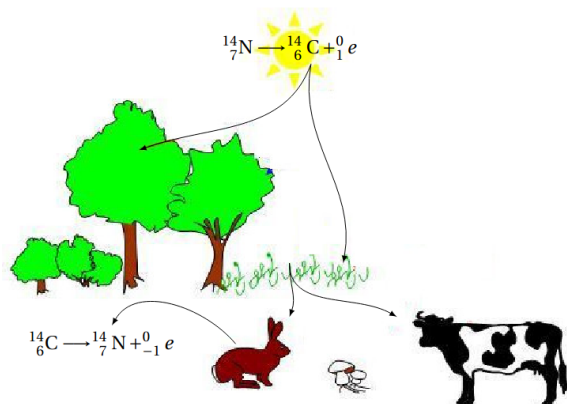
Temps de demi-vie

Uranium 238	$4,5 \times 10^9$ ans
Potassium 40	$1,3 \times 10^9$ ans
Thorium 230	$8,0 \times 10^4$ ans
Carbone 14	$5,7 \times 10^3$ ans
Radium 226	$1,6 \times 10^3$ ans
Plomb 210	22 ans

FIGURE 1.12 – Temps de demi-vie de quelques éléments chimiques.

1.5 Datation au carbone 14

En haute atmosphère, les rayons cosmiques transforment des noyaux d'azote 14 en noyaux de carbone 14. Les êtres vivants absorbent du carbone 14 par photosynthèse et ingestion. Or, le carbone 14 est radioactif et se désintègre en azote 14. Le taux de carbone 14 est constant chez les êtres vivants. Mais, à la mort de l'individu, le taux de carbone 14 diminue puisqu'il n'est plus renouvelé par l'alimentation. **La mesure du taux de carbone 14 d'un individu mort permet de déterminer à quand remonte la mort.**



1.6 Préparation au DS

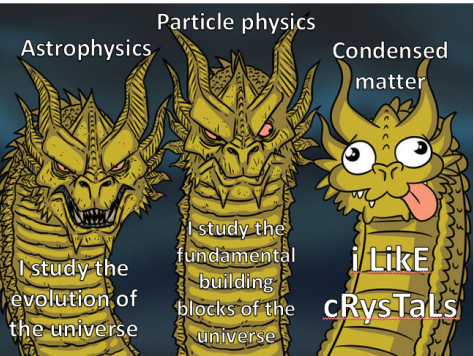
1.6.1 Savoirs et savoir-faire

Je dois savoir :	OK	À revoir
Les noyaux des atomes de la centaine d'éléments chimiques stables résultent de réactions nucléaires qui se produisent au sein des étoiles à partir de l'hydrogène initial. La matière connue de l'Univers est formée principalement d'hydrogène et d'hélium alors que la Terre est surtout constituée d'oxygène, d'hydrogène, de fer, de silicium, de magnésium et les êtres vivants de carbone, hydrogène, oxygène et azote.	☐	☐
Certains noyaux sont instables et se désintègrent (radioactivité).	☐	☐
L'instant de désintégration d'un noyau radioactif individuel est aléatoire.	☐	☐
La demi-vie d'un noyau radioactif est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux initialement présents dans un échantillon macroscopique se soit désintégrée.	☐	☐
Cette demi-vie est caractéristique du noyau radioactif considéré.	☐	☐
Je dois pouvoir :	OK	À revoir
Produire et analyser différentes représentations graphiques de l'abondance des éléments chimiques (proportions) dans l'Univers, la Terre, les êtres vivants.	☐	☐
L'équation d'une réaction nucléaire stellaire étant fournie, reconnaître si celle-ci relève d'une fusion ou d'une fission.	☐	☐
Calculer le nombre de noyaux restants au bout de n demi-vies.	☐	☐
Utiliser une représentation graphique pour déterminer une demi-vie.	☐	☐
Utiliser une décroissance radioactive pour une datation.	☐	☐
Expliquer l'utilisation de noyaux radioactifs dans un contexte médical.	☐	☐
Citer quelques précautions inhérentes à l'utilisation de substances radioactives.	☐	☐
Capacités mathématiques :		
Tableaux croisés, représentations de données.	☐	☐
Calcul algébrique.	☐	☐
Phénomènes aléatoires.	☐	☐
Lectures graphiques (résolution d'équations et d'inéquations, recherche d'images et d'antécédents).	☐	☐
Suites géométriques à termes strictement positifs, décroissance exponentielle.	☐	☐

FLASHCARD 1 Qu'est-ce que le Big Bang ? CHAPITRE 1	FLASHCARD 2 Qu'est-ce que la nucléosynthèse primordiale ? CHAPITRE 1	FLASHCARD 3 Où se forment les éléments plus lourds que l'hélium ? CHAPITRE 1	FLASHCARD 4 Qu'est-ce qu'une réaction nucléaire ? CHAPITRE 1
FLASHCARD 5 Quels sont les types de transformations nucléaires ? CHAPITRE 1	FLASHCARD 6 Qu'est-ce que la radioactivité ? CHAPITRE 1	FLASHCARD 7 Qu'est-ce que la demi-vie d'un noyau radioactif ? CHAPITRE 1	FLASHCARD 8 Quel est le principe de la datation au carbone 14 ? CHAPITRE 1
FLASHCARD 9 Qu'est-ce qu'un isotope ? CHAPITRE 1	FLASHCARD 10 Qu'est-ce que le rayonnement cosmique ? CHAPITRE 1	FLASHCARD 11 Qu'est-ce qu'une supernova ? CHAPITRE 1	FLASHCARD 12 Pourquoi certains noyaux sont-ils instables ? CHAPITRE 1
FLASHCARD 13 Quels éléments constituent majoritairement l'Univers ? CHAPITRE 1	FLASHCARD 14 Comment se produisent les éléments plus lourds que le fer ? CHAPITRE 1	FLASHCARD 15 Lors d'une réaction nucléaire, quelles règles s'appliquent ? CHAPITRE 1	FLASHCARD 16 Quelles sont les applications de la radioactivité ? CHAPITRE 1

Une transformation qui modifie le noyau des atomes en changeant leur nombre de protons et/ou de neutrons.	Ils se forment dans les étoiles par fusion nucléaire et lors des explosions de supernovæ.	C'est la formation des premiers noyaux atomiques (hydrogène et hélium) juste après le Big Bang.	Le Big Bang est une théorie décrivant la naissance de l'Univers il y a environ 13,8 milliards d'années.
Elle repose sur la décroissance radioactive du carbone 14 contenu dans les organismes vivants après leur mort.	Le temps nécessaire pour que la moitié des noyaux initialement présents dans un échantillon se désintègre.	La désintégration spontanée d'un noyau instable en un noyau plus stable avec émission de particules et/ou d'énergie.	Fusion (assemblage de noyaux légers) et fission (division de noyaux lourds).
Un déséquilibre entre le nombre de protons et de neutrons peut rendre un noyau instable.	L'explosion d'une étoile massive en fin de vie, dispersant les éléments chimiques dans l'espace.	Un flux de particules de haute énergie circulant dans le milieu interstellaire, formant certains éléments comme le lithium.	Des atomes ayant le même nombre de protons mais un nombre différent de neutrons.
Médecine (radiothérapie), datation (carbone 14), production d'énergie (nucléaire).	Règles de Soddy: ${}_{Z_1}^{A_1}X_1 + {}_{Z_2}^{A_2}X_2 \longrightarrow {}_{Z_3}^{A_3}Y_3 + {}_{Z_4}^{A_4}Y_4$ Conservation de: • masse: $A_1 + A_2 = A_3 + A_4$, • charge électrique: $Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$.	Ils sont produits lors de l'implosion de supernovæ.	L'hydrogène et l'hélium sont les éléments les plus abondants.

Des édifices ordonnés : les cristaux

☰ Plan du cours	☺ Humour de physicien
2.1 Solides cristallins et amorphes. 17 Solides cristallins ▪ Solides amorphes 2.2 Les cristaux. 18 Vocabulaire ▪ Exemples de structures cristallines 2.3 Où trouve-t-on les cristaux? 21 2.4 Propriétés des cristaux 22 2.5 Préparation au DS 24 Savoirs et savoir-faire ▪ Flashcards	
◀ Histoire des sciences	
🎧 <i>La science des cristaux (France Culture)</i> 	

Nous connaissons 4 états de matière : solide, liquide, gaz, plasma. L'état solide est caractérisé par l'absence de liberté entre les atomes, les molécules ou les ions. Parmi ces solides, on trouve les cristaux.

2.1 Solides cristallins et amorphes

Définition 2.1: Solide

L'état **solide** est l'état physique de la matière dans lequel les corps **conservent leur forme** et leur taille (contrairement aux liquides et aux gaz).

2.1.1 Solides cristallins

Définition 2.2: Solides cristallins

Un **solide cristallin** est composé d'entités microscopiques (atomes, ions, molécules) empilées de **manière régulière**.

Remarque. Le solide cristallin est électriquement neutre, il est donc constitué de cations et d'anions ou de molécules ou encore d'atomes.

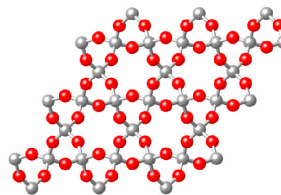
Exemple 2.1

Les cristaux peuvent donc être ioniques comme le chlorure de sodium $\text{NaCl}_{(s)}$, moléculaires comme la glace $\text{H}_2\text{O}_{(s)}$ ou

alors atomiques comme c'est le cas des métaux : un empilement d'atomes de cuivre donne le cuivre métallique de formule $\text{Cu}_{(s)}$.

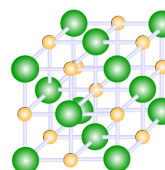
Quartz

- Silicium
- Oxygène



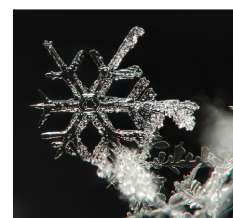
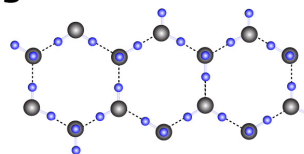
Cristal de sel

- Chlore (Cl^-)
- Sodium (Na^+)



Cristal de glace

- Oxygène
- Hydrogène



©2019 Parlons sciences

FIGURE 2.1 – Exemple de cristaux (Source image : <https://parlonssciences.ca/>)

Les cristaux se forment soit par refroidissement des minéraux en fusion, ou magmas, des minéraux à l'état gazeux ou fumerolles (minéraux formés à hautes températures) ; soit à partir de solutions de minéraux dissous (solutions hydrothermales).

2.1.2 Solides amorphes

Définition 2.3: Solide amorphe

Les **solides amorphes** correspondant à un état liquide figé et pour lesquels il n'y a pas d'ordre au-delà d'une échelle moléculaire.

Exemple 2.2

Les verres représentent la majorité des solides amorphes.

Un magma qui s'échappe du cratère d'un volcan se refroidit très rapidement à la surface de la terre ; les atomes qui le composent se figent d'une manière désordonnée et constituent un solide amorphe.

2.2 Les cristaux

Un cristal est caractérisé par la forme géométrique de la maille, la nature et la position dans cette maille des éléments chimiques. La forme géométrique de la maille détermine la forme du cristal.

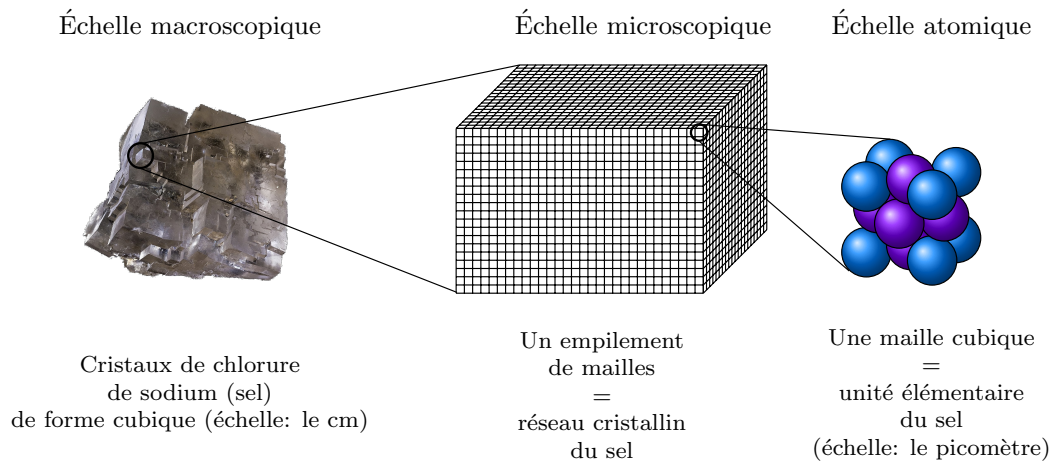


FIGURE 2.2 – Du cristal à la maille

2.2.1 Vocabulaire

Définition 2.4: Maille

La **maille** est la plus petite partie d'un cristal qui permet de reconstituer la structure entière, par des **translations** dans trois directions différentes

Définition 2.5: Paramètre

On appelle **paramètre** de la maille, noté a , la **longueur de l'arête** du cube.

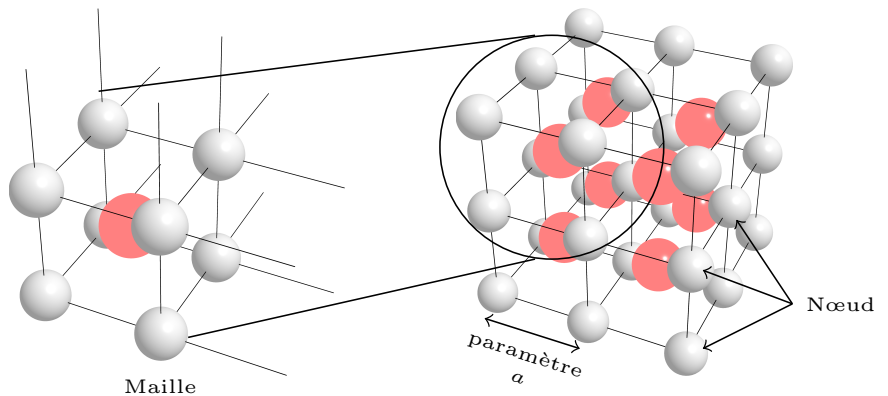


FIGURE 2.3 – Maille, nœud et paramètre d'un cristal

Définition 2.6: Nœud

Un **nœud** de la maille est un **point** du réseau cristallin où se trouve un **motif** (atome, ion ou molécule). Les nœuds définissent la structure périodique du cristal et permettent de reconstruire tout le réseau par translation.

2.2.2 Exemples de structures cristallines

On étudie uniquement deux structures cristallines : la structure dite cubique (C) et la structure dite cubique à faces centrées (CFC).

Structure cubique (C)

Définition 2.7: Structure cubique (C)

La **structure cubique (C)** a pour maille élémentaire un **cube** dont les **huit sommets sont occupés par un atome**.

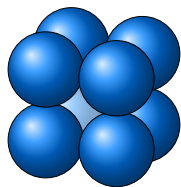


FIGURE 2.4 – Modèle compact

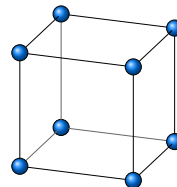


FIGURE 2.5 – Perspective cavalière

Exemple 2.3

Le polonium est le seul métal qui cristallise dans un réseau appelé « réseau cubique simple ». C'est le premier élément découvert par Pierre et Marie Curie, en juillet 1898, au cours de leurs recherches sur la radioactivité. Le mot polonium a été ainsi choisi en hommage aux origines polonaises de Marie Curie, née Maria Skłodowska.

Remarque.

Comptons le nombre d'atomes dans une maille cubique simple. Chaque sommet présente 1/8 de l'atome, et il y a 8 sommets. On a donc un total de :

$$N = 8 \times \frac{1}{8} = 1 \quad (2.1)$$

Il y a l'équivalent d'un atome par maille cubique simple.

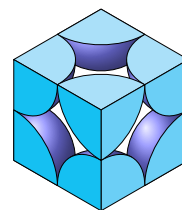


FIGURE 2.6 – Place occupée par les atomes dans la maille cubique

Structure cubique à faces centrées (CFC)

Définition 2.8: Structure cubique à faces centrées (CFC)

La **structure cubique à faces centrées (CFC)** a pour maille élémentaire un **cube** dont les huit sommets et les centres des six faces sont occupés par un atome.

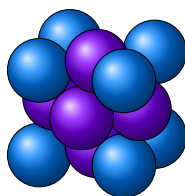


FIGURE 2.7 – Modèle compact

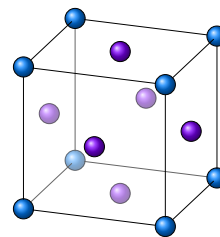


FIGURE 2.8 – Perspective cavalière

Remarque. Il existe de l'espace entre les atomes de la maille CFC : ce sont les sites intersticiels, qui peuvent être occupés par d'autres atomes, comme pour le sel dont on donne l'exemple ci-dessous.

Exemple 2.4

Le sel, de formule NaCl , a une structure cristalline de type CFC où tous les sites interstitiels octaédriques sont occupés. Par exemple si l'on considère que les atomes de chlore sont situés aux sommets de la maille, les atomes de sodium occupent alors tous les sites octaédriques de la maille, et vice-versa.

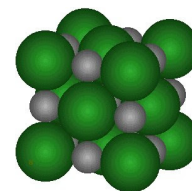


FIGURE 2.9 – Maille de la structure cristalline du sel (en vert, ions chlorure, et en gris les ions sodium)

Remarque.

Comptons le nombre d'atomes dans une maille cubique à faces centrées. Chaque sommet présente $1/8$ de l'atome, et il y a 8 sommets. Pour chaque atome centré sur une face, seule la moitié appartient à la maille, et on a 6 faces au total. On a donc un total de :

$$N = 8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4 \quad (2.2)$$

Il y a l'équivalent de 4 atomes par maille CFC.

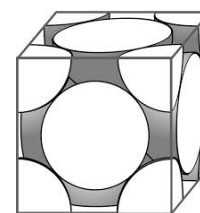


FIGURE 2.10 – Atomes appartenant à la maille CFC

2.3 Où trouve-t-on les cristaux?

Application à la géologie

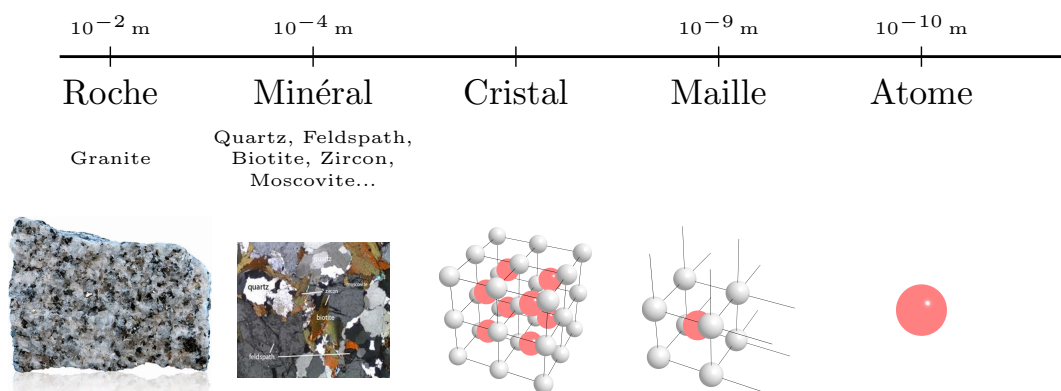


FIGURE 2.11 – Ordre de grandeur de l'échelle de la roche à l'atome

Définition 2.9: Roche

Une **roche** est un matériau naturel solide formé par l'**agrégation de minéraux** et/ou d'autres éléments (verre volcanique, fossiles, matières organiques).

Exemple 2.5

Les roches les plus connues sont le granite, le basalte, le calcaire ou encore le grès.

Définition 2.10: Minéral

Un **minéral** est une substance naturelle, solide et inorganique, ayant une **composition chimique définie** et une **structure cristalline ordonnée**.

Exemple 2.6

Les minéraux les plus connus sont les silicates (quartz, feldspaths, micas), les carbonates (calcite, dolomite), les oxydes (hématite, magnétite)...

Les cristaux se forment soit par refroidissement des minéraux en fusion, ou magmas, des minéraux à l'état gazeux ou fumerolles (minéraux formés à hautes températures) ; soit à partir de solutions de minéraux dissous (solutions hydrothermales).

Un composé de formule chimique donnée peut cristalliser différemment selon les contraintes physiques (pression, température, vitesse de refroidissement), cela correspond à des empilements différents au niveau microscopique qui entraînent des propriétés différentes.

Exemple 2.7

Dans le cas des roches magmatiques, la vitesse de refroidissement influence la formation des cristaux : le refroidissement rapide d'une lave conduit à une cristallisation partielle. Il se forme alors un verre, solide amorphe ne présentant pas d'organisation cristalline.

Exemple 2.8

En fonction de la profondeur dans la croûte terrestre, les conditions de température et de pression vont favoriser certaines structures cristallines.

Les cristaux dans le vivant

Les cristaux existent aussi chez les êtres vivants.

Exemple 2.9

L'hydroxyapatite dans les os et l'émail dentaire, les cristaux d'aragonite dans la coquille des mollusques et dans le squelette des coraux, les cristaux de calcite dans la coquille des œufs... Ces cristaux assurent la solidité des différentes structures.

Les calculs rénaux sont des cristaux (oxalate de calcium) qui se forment dans les reins et sont à l'origine de vives douleurs.

Il existe même des cristaux chez certaines plantes. Ils constituent un système de défense contre les herbivores car ils blessent la muqueuse de la bouche de l'animal.

2.4 Propriétés des cristaux

Un composé de formule chimique donnée peut cristalliser sous différents types de structures.

Exemple 2.10

Le carbone diamant qui cristallise dans une maille cubique et le carbone graphite, qui cristallise dans une maille hexagonale n'ont pas la même dureté, la même transparence et le même prix!

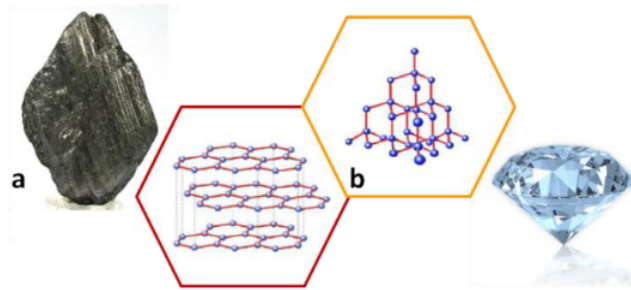


FIGURE 2.12 – Cristallisation du graphite et du diamant
(Source image : Thèse de David Mele, Lille 1, 2014)

La structure microscopique d'un cristal conditionne certaines de ses propriétés macroscopiques (**dureté, densité, conductivité thermique et électrique**), et sa masse volumique :

Définition 2.11: Masse volumique d'un cristal

La masse volumique d'un cristal est le rapport de la masse du cristal par son volume.

Au niveau d'une maille, la masse volumique est le rapport de la masse des entités chimiques d'une maille par le volume de cette maille :

$$\rho = \frac{\text{masse de la maille}}{\text{volume de la maille}} = \frac{\text{masse d'une atome} \times \text{nombre d'atomes}}{(\text{paramètre de la maille})^3} \quad (2.3)$$

L'unité couramment utilisée de la masse volumique est le g/m^3 .

Exemple 2.11

Calculons la masse volumique du polonium cristallisé, sachant que la masse d'un atome de polonium est $m_{pol} = 3,49 \times 10^{-25} \text{ kg}$ et que le rayon de l'atome de polonium est $r = 1,68 \times 10^{-10} \text{ m}$:

$$\rho = \frac{\text{masse d'une atome} \times \text{nombre d'atomes}}{(\text{paramètre de la maille})^3} \quad (2.4)$$

$$= \frac{\text{masse d'une atome} \times \text{nombre d'atomes}}{(2r)^3} \quad (2.5)$$

$$= \frac{3,49 \times 10^{-25} \text{ kg} \times 1}{(2 \times 1,68 \times 10^{-10} \text{ m})^3} \quad (2.6)$$

$$\boxed{\rho = 9200 \text{ kg/m}^3} \quad (2.7)$$

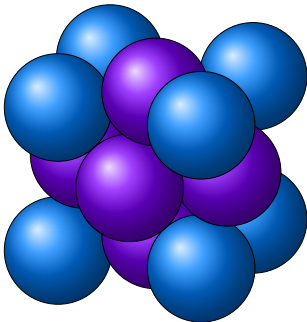
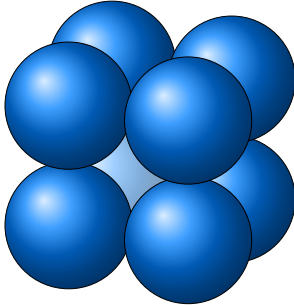
La masse volumique du polonium est de 9200 kg/m^3 .

2.5 Préparation au DS

2.5.1 Savoirs et savoir-faire

Je dois savoir :	OK	À revoir
Le chlorure de sodium solide (présent dans les roches, ou issu de l'évaporation de l'eau de mer) est constitué d'un empilement régulier d'ions : c'est l'état cristallin. Plus généralement, la structure microscopique d'un cristal conditionne certaines de ses propriétés macroscopiques, notamment la masse volumique.	☐	☐
Un composé de formule chimique donnée peut cristalliser sous différents types de structures. Ainsi les minéraux se caractérisent par leur composition chimique et leur organisation cristalline. Une roche est formée de l'association de cristaux d'un même minéral ou de plusieurs minéraux. Des structures cristallines existent aussi dans les organismes biologiques (coquille, squelette, calcul, etc.).	☐	☐
Dans le cas des solides amorphes, l'empilement d'entités se fait sans ordre géométrique. C'est le cas du verre. Certaines roches volcaniques contiennent du verre, issu de la solidification très rapide d'une lave.	☐	☐
Je dois pouvoir :	OK	À revoir
Utiliser une représentation en trois dimensions (3D) informatisée du cristal de chlorure de sodium.	☐	☐
Relier l'organisation de la maille au niveau microscopique à la structure du cristal au niveau macroscopique.	☐	☐
Distinguer, en matière d'échelle et d'organisation spatiale, atome ou molécule, maille, cristal, minéral, roche.	☐	☐
Identifier des structures cristallines sur un échantillon ou une image.	☐	☐
Identifier des structures cristallines chez les êtres vivants.	☐	☐
Mettre en relation la structure amorphe ou cristalline d'une roche et les conditions de son refroidissement.	☐	☐
Capacités mathématiques :		
Représentation dans l'espace. Perspective cavalière.	☐	☐
Grandeurs et mesures.	☐	☐
Grands nombres, petits nombres, puissances de 10.	☐	☐

FLASHCARD 1 Qu'est-ce qu'un cristal ? CHAPITRE 2	FLASHCARD 2 Quelle est la différence entre un solide cristallin et amorphe ? CHAPITRE 2	FLASHCARD 3 Qu'est-ce qu'une maille ? CHAPITRE 2	FLASHCARD 4 Quels sont les types de structures cristallines les plus courantes ? CHAPITRE 2
FLASHCARD 5 Comment se forment les cristaux dans la nature ? CHAPITRE 2	FLASHCARD 6 Quelle est la structure cristalline du sel (NaCl) ? CHAPITRE 2	FLASHCARD 7 Quel est l'effet de la température sur la formation des cristaux ? CHAPITRE 2	FLASHCARD 8 Pourquoi le diamant et le graphite ont-ils des propriétés différentes ? CHAPITRE 2
FLASHCARD 9 Quelle est la relation entre la structure cristalline et les propriétés macroscopiques ? CHAPITRE 2	FLASHCARD 10 Qu'est-ce qu'un minéral ? CHAPITRE 2	FLASHCARD 11 Pourquoi certaines roches contiennent-elles des cristaux bien visibles ? CHAPITRE 2	FLASHCARD 12 Quelle est la différence entre une roche et un cristal ? CHAPITRE 2
FLASHCARD 13 Qu'est-ce que la masse volumique d'un cristal ? CHAPITRE 2	FLASHCARD 14 Schématiser une maille cubique. CHAPITRE 2	FLASHCARD 15 Schématiser une maille cubique à faces centrées. CHAPITRE 2	FLASHCARD 16 Donner les échelles d'une roche, un minéral, une maille et un atome. CHAPITRE 2

Les structures cubique simple, et cubique à faces centrées.	La maille est la plus petite unité répétitive qui permet de décrire l'organisation d'un cristal.	Un solide cristallin possède une structure ordonnée, tandis qu'un solide amorphe n'a pas d'organisation régulière.	Un cristal est un solide dont les atomes, ions ou molécules sont arrangés de manière ordonnée et répétitive.
Ils sont constitués de carbone mais ont des structures cristallines différentes.	Une température plus basse favorise la croissance lente des cristaux et une meilleure organisation.	Le chlorure de sodium (NaCl) a une structure cubique à faces centrées.	Par refroidissement des magmas, précipitation en solution ou dépôt chimique.
Une roche est un assemblage de minéraux, tandis qu'un minéral est un ensemble de cristaux organisés de manière ordonnée.	Parce qu'elles se sont refroidies lentement, laissant le temps aux cristaux de croître.	Un minéral est une substance naturelle solide ayant une composition chimique définie et une structure cristalline.	La structure influence la dureté, la densité, la conductivité thermique et électrique tout comme la masse volumique.
• Roche: 10^{-2} m • Minéral: 10^{-4} m • Maille: 10^{-9} m • Atome: 10^{-10} m			C'est le rapport entre la masse des entités chimiques d'une maille et son volume: $\rho = \frac{\text{masse de la maille}}{\text{volume de la maille}}$ $\rho = \frac{m_{\text{atome}} \times N_{\text{atomes}}}{(\text{paramètre de la maille})^3}$

La forme de la Terre

☰ Plan du cours	☺ Humour de physicien
3.1 Un peu d'Histoire 28 Interprétation d'Anaxagore (500-428 av. J.C.) ■ Interprétation d'Ératosthène (276-194 av. J.C.) ■ Delambre et Méchain (XVIIIème siècle) 3.2 Comment se repérer sur la planète? 31 Lignes imaginaires ■ Coordonnées géographiques ■ Mesurer des distances à la surface de la Terre ■ Distance à l'horizon 3.3 Préparation au DS 33 Savoirs et savoir-faire ■ Flashcards	  SEPHKO.COM
◀ Histoire des sciences	
🎧 <i>Débuts de la Terre : une histoire sous le manteau (France culture)</i>  🎥 <i>Eratosthène - Un bâton et un chameau pour mesurer la Terre (e-penser)</i> 	

3.1 Un peu d'Histoire

Tout commence par une observation historique de voyageurs égyptiens durant l'Antiquité. Ils constatent que :

- Syène (aujourd'hui Assouan) et Alexandrie sont situés sur le même méridien (même axe pôle Nord/pôle Sud) ;
- La distance entre Syène et Alexandrie est d'environ 788 km ;
- Au solstice d'été (autour du 21 juin), le Soleil est à la verticale à Syène (car aucune ombre n'est observée) mais à Alexandrie les rayons du Soleil sont quant à eux inclinés de $7,2^\circ$ par rapport à la verticale.

Plusieurs interprétations sont alors proposées au fil de l'Histoire afin de justifier ces observations.

3.1.1 Interprétation d'Anaxagore (500-428 av. J.C.)

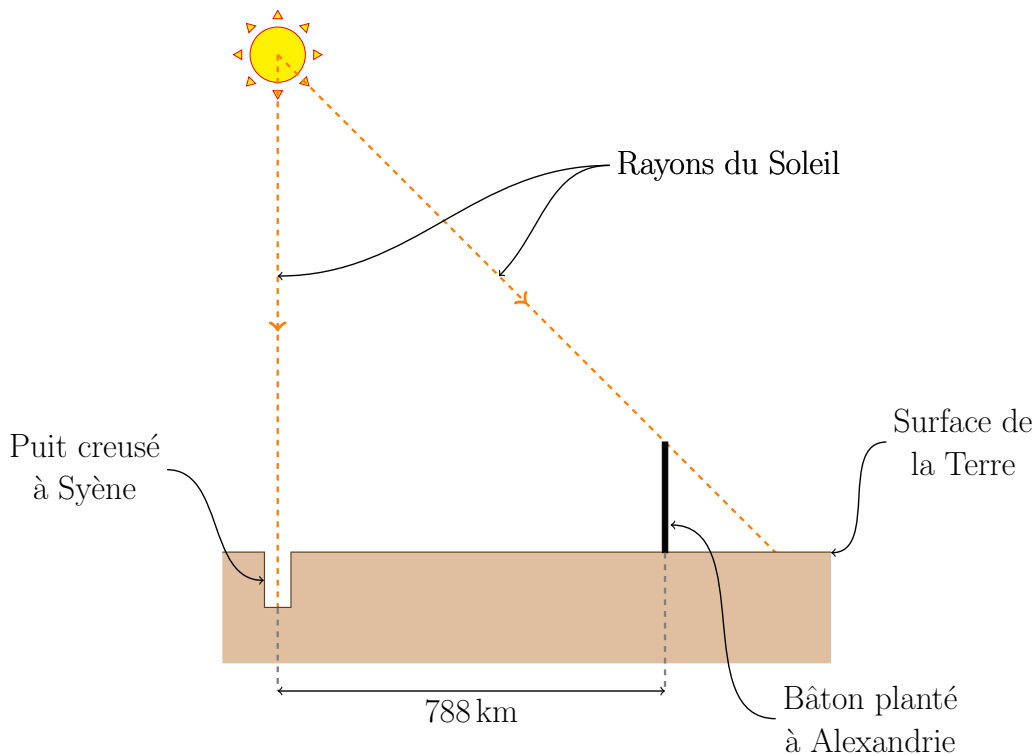


FIGURE 3.1 – Situation proposée par Anaxagore

Anaxagore pensait que la Terre était plate. En se basant sur cette hypothèse, il propose un calcul estimant la distance entre la Terre et le Soleil à partir des observations des voyageurs égyptiens (non détaillé ici).

Ce modèle semble donc bien expliquer le fait que l'**on observe une ombre à Alexandrie et pas à Syène**. Cependant, ce modèle n'arrive pas à expliquer d'autres phénomènes tels que la **variabilité du jour et de la nuit** au fil de l'année ou même la **disparition sous l'horizon des bateaux** qui s'éloignent en mer.



FIGURE 3.2 – Anaxagore de Clazomènes, peinture murale (Source : wikipedia.org)

3.1.2 Interprétation d'Ératosthène (276-194 av. J.C.)

Ératosthène reprend lui aussi les observations des voyageurs égyptiens et pose plusieurs hypothèses :

- La Terre est une sphère ;
- Les rayons envoyés par le Soleil arrivent sur la Terre parallèles entre eux.

Il y s'appuie sur le principe mathématique des angles alternes-internes :

Propriété 3.1: Angles alternes-internes

Si deux droites parallèles (d) et (d') sont coupées par une sécante (d'') , alors elles forment des angles alternes-internes de même mesure (α) .

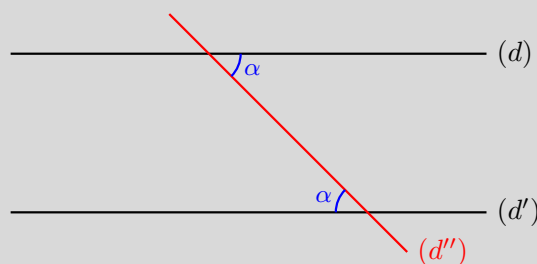


FIGURE 3.3 – Angles alternes internes



FIGURE 3.4 – Portrait d'Ératosthène

Il entreprend alors de mesurer la circonférence de la Terre et modélise alors la situation selon la figure 3.5. Cette modélisation permet à Ératosthène de proposer une première estimation de la longueur d'un méridien. L'arc de cercle formé entre Syène et Alexandrie mesure 788 km de long et correspond à un angle $\alpha = 7,2^\circ$. Par un raisonnement de proportionnalité, il en déduit la circonférence de la Terre :

Angle	longueur de l'arc
$7,2^\circ$	788 km
360°	circonférence de la Terre

En effectuant un produit en croix, il obtient :

$$\frac{788 \text{ km}}{7,2^\circ} \times 360^\circ = 39\,400 \text{ km} \quad (3.1)$$

Cette estimation est très proche de la valeur mesurée actuellement ($\triangleq 1,2\%$ de différence!).

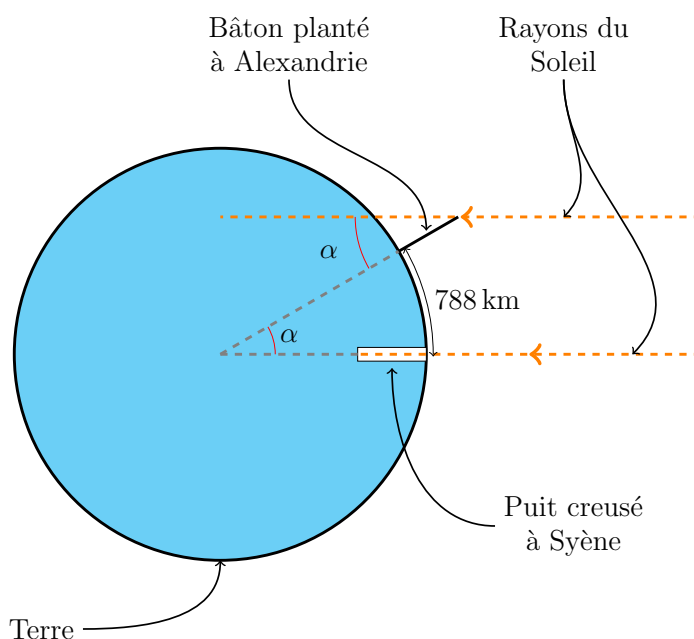


FIGURE 3.5 – Modèle géométrique de la proposition d'Ératosthène

3.1.3 Delambre et Méchain (XVIIIème siècle)

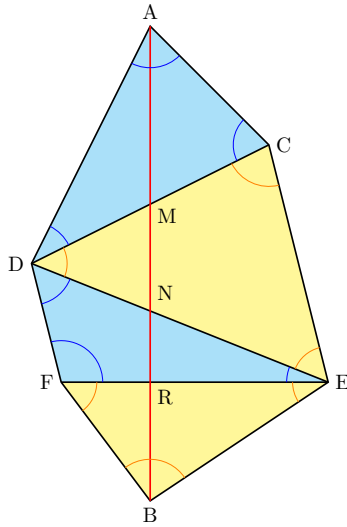
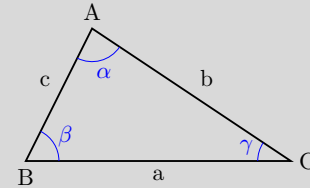


FIGURE 3.6 – Méthode de triangulation

Après la Révolution, Delambre et Méchain affinent la mesure d'Ératosthène et mesurent par la méthode de triangulation la longueur du méridien terrestre. Cette méthode consiste à créer autant de triangles que nécessaires pour relier deux points.

Cette méthode s'appuie sur la loi des sinus :

Propriété 3.2: Loi des sinus



$$\frac{a}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)} \quad (3.2)$$

Méthode 3.1: Méthode de triangulation - Mesure de la distance AB

1. Intéressons nous au triangle ACD. On connaît la distance AC. On peut également mesurer les angles $\widehat{A}$, $\widehat{M}$ et $\widehat{C}$. On peut d'ailleurs, si on connaît la mesure de deux angles, retrouver le troisième puisque la somme des angles d'un triangle donne 180° .

2. En utilisant la loi des sinus, on en déduit la longueur AM :

$$\frac{AM}{\sin(\widehat{C})} = \frac{AC}{\sin(\widehat{M})} \quad \text{donc} \quad AM = AC \times \frac{\sin(\widehat{C})}{\sin(\widehat{M})} \quad (3.3)$$

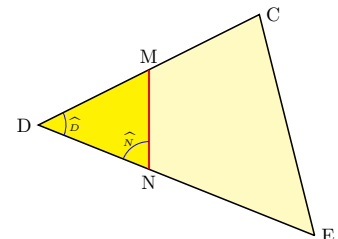
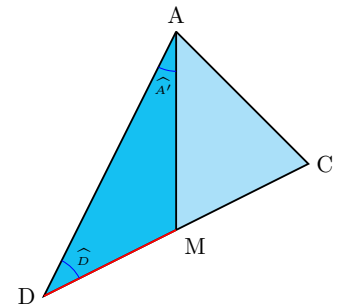
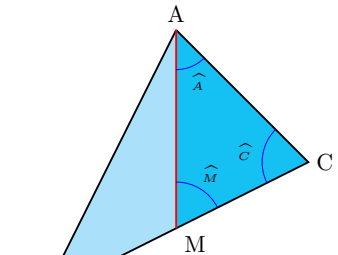
3. De la même manière on peut mesurer la longueur DM :

$$\frac{DM}{\sin(\widehat{A})} = \frac{AM}{\sin(\widehat{D})} \quad \text{donc} \quad DM = AM \times \frac{\sin(\widehat{A})}{\sin(\widehat{D})} \quad (3.4)$$

4. Passons aux longueurs dans les triangles suivants. Nous connaissons DM et pouvons mesurer les angles dans le triangle DMN. On en déduit MN toujours à l'aide de la loi des sinus :

$$\frac{MN}{\sin(\widehat{D})} = \frac{DM}{\sin(\widehat{N})} \quad \text{donc} \quad MN = DM \times \frac{\sin(\widehat{D})}{\sin(\widehat{N})} \quad (3.5)$$

5. On continue jusqu'à obtenir la longueur AB.



3.2 Comment se repérer sur la planète?

3.2.1 Lignes imaginaires

Définition 3.1: Parallèles et méridiens

Afin de se repérer, l'Homme a tracé des lignes imaginaires sur la sphère terrestre. Il en existe deux sortes :

- Les parallèles (en bleu) qui sont des cercles parallèles à l'équateur;
- Les méridiens (en rouge) qui sont des demi-cercles joignant les deux pôles.

On a aussi choisit des lignes imaginaires de référence :

- L'équateur : parallèle se situant à mi-chemin entre les pôles;
- Le méridien de Greenwich : méridien passant par la ville de Greenwich (Royaume-Uni).

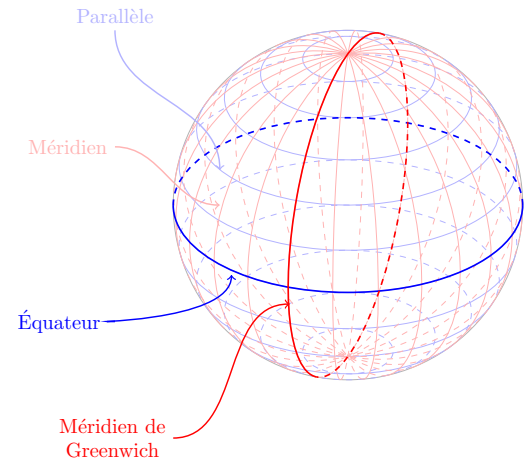


FIGURE 3.7 – Méridiens et parallèles

3.2.2 Coordonnées géographiques

Définition 3.2: Coordonnées géométriques

Un point M à la surface de la Terre possède trois coordonnées géographiques :

- la longitude (notée λ) : angle entre le méridien de Greenwich et le méridien du point M qui varie entre -180° et 180° , ou respectivement de 180° ouest à 180° est.
- la latitude (notée φ) : angle entre l'équateur et le parallèle au point M qui varie entre -90° et 90° ;
- L'altitude h .

On a aussi choisit des lignes imaginaires de référence :

- L'équateur : parallèle se situant à mi-chemin entre les pôles;
- Le méridien de Greenwich : méridien passant par la ville de Greenwich (Royaume-Uni).

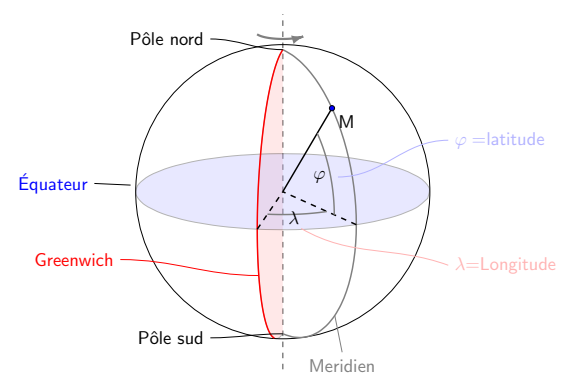


FIGURE 3.8 – Coordonnées géographiques

3.2.3 Mesurer des distances à la surface de la Terre

Définition 3.3: Grand cercle

Un **grand cercle** est un cercle sur la sphère terrestre ayant le **même centre** qu'elle (par exemple l'équateur).

Le **plus court chemin** à la surface de la Terre est l'**arc du grand cercle** qui les relie.

Grâce à la méthode de la triangulation, et en mesurant la distance (1111,11 km) entre Dunkerque (latitude 51° Nord) et Barcelone (latitude 41° Nord), il a été possible de mesurer la longueur d'un méridien terrestre :

$$\text{Longueur du méridien} = \frac{360^\circ \times 1111,11 \text{ km}}{51^\circ - 41^\circ} = 40\,000 \text{ km} \quad (3.6)$$

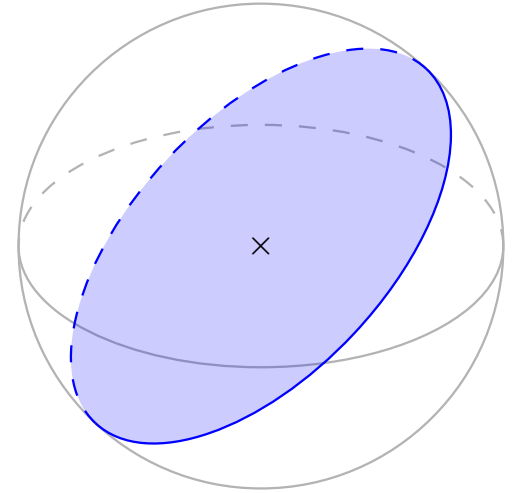


FIGURE 3.9 – Exemple de grand cercle : le plan du grand cercle en bleu contient le centre de la Terre

3.2.4 Distance à l'horizon

Soit un observateur P situé à une altitude h , et regardant à l'horizon. On se propose dans cette partie de déterminer la distance à laquelle se situe l'horizon soit la distance HP (voir figure 3.10).

Dans le triangle OHP , rectangle en H , et d'après le théorème de Pythagore :

$$OP^2 = OH^2 + HP^2 \quad (3.7)$$

donc

$$HP = \sqrt{OP^2 - OH^2} = \sqrt{(R_T + h)^2 - R_T^2} = \sqrt{h^2 + 2hR_T} \quad (3.8)$$

On en déduit que la distance à l'horizon est donnée par la formule $HP = \sqrt{h^2 + 2hR_T}$.

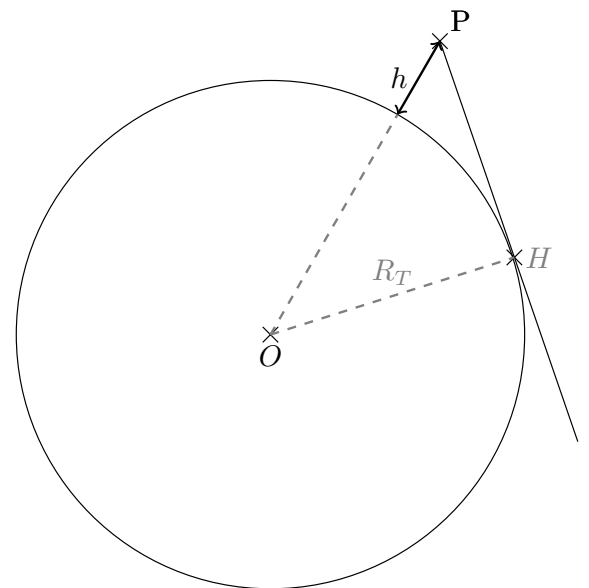


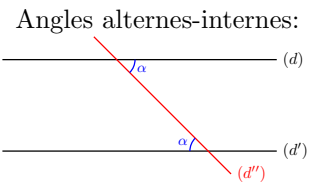
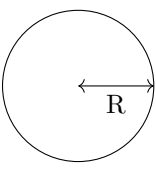
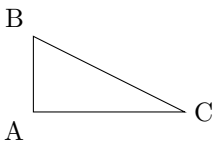
FIGURE 3.10 – Exemple de grand cercle : le plan du grand cercle en bleu contient le centre de la Terre

3.3 Préparation au DS

3.3.1 Savoirs et savoir-faire

Je dois savoir :	OK	À revoir
Dès l'Antiquité, des observations de différentes natures ont permis de conclure que la Terre était sphérique, alors même que, localement, elle apparaît plane dans la plupart des expériences quotidiennes.	☐	☐
Historiquement, des méthodes géométriques ont permis de calculer la longueur d'un méridien à partir de mesures d'angles ou de longueurs : méthode d'Ératosthène et principe de triangulation plane de Delambre et Méchain.	☐	☐
On repère un point à la surface de la Terre par deux coordonnées angulaires, sa latitude et sa longitude, et par son altitude par rapport à un niveau de référence.	☐	☐
Le plus court chemin entre deux points à la surface de la Terre, assimilée à une sphère parfaite, est l'arc du grand cercle qui les relie.	☐	☐
Je dois pouvoir :	OK	À revoir
Donner des preuves de la rotondité de la Terre de l'Antiquité à nos jours.	☐	☐
Calculer la longueur du méridien terrestre par la méthode d'Ératosthène.	☐	☐
Expliquer la méthode de triangulation utilisée par Delambre et Méchain.	☐	☐
Calculer le rayon de la Terre à partir de la longueur du méridien.	☐	☐
Calculer la distance à l'horizon à partir du rayon de la Terre.	☐	☐
Utiliser un système d'information géographique, pour comparer les longueurs de différents chemins reliant deux points à la surface de la Terre.	☐	☐
Capacités mathématiques :		
Calcul algébrique.	☐	☐
Géométrie du cercle, du triangle et de la sphère.	☐	☐
Théorème de Pythagore.	☐	☐
Grandeurs quotients.	☐	☐
Géométrie de la sphère.	☐	☐

FLASHCARD 1 Quelle est la forme de la Terre ? CHAPITRE 3	FLASHCARD 2 Qui a mesuré la circonférence de la Terre en premier ? CHAPITRE 3	FLASHCARD 3 Quelle propriété sur les angles Ératosthène utilise-t-il ? CHAPITRE 3	FLASHCARD 4 Qu'est-ce qu'un méridien ? CHAPITRE 3
FLASHCARD 5 Qu'est-ce qu'un parallèle ? CHAPITRE 3	FLASHCARD 6 Quel est le parallèle de référence ? CHAPITRE 3	FLASHCARD 7 Quel est le méridien de référence ? CHAPITRE 3	FLASHCARD 8 Quelles sont les coordonnées géographiques d'un point ? CHAPITRE 3
FLASHCARD 9 Qu'est-ce qu'un grand cercle ? CHAPITRE 3	FLASHCARD 10 Comment mesure-t-on une distance entre deux points à la surface de la Terre ? CHAPITRE 3	FLASHCARD 11 Pourquoi la Terre semble-t-elle plate localement ? CHAPITRE 3	FLASHCARD 12 Comment prouver que la Terre est ronde ? CHAPITRE 3
FLASHCARD 13 Avec quelle loi la triangulation permet-elle de mesurer des distances ? CHAPITRE 3	FLASHCARD 14 Qu'est-ce que la distance à l'horizon ? CHAPITRE 3	FLASHCARD 15 Énoncer le théorème de Pythagore. CHAPITRE 3	FLASHCARD 16 Comment calcule-t-on le périmètre d'un cercle ? CHAPITRE 3

Un méridien est un demi-cercle imaginaire joignant les pôles Nord et Sud.	Angles alternes-internes:  Si deux droites parallèles (d) et (d') sont coupées par une sécante (d''), alors elles forment des angles alternes-internes de même mesure (α).	Ératosthène a mesuré la circonférence de la Terre au IIIe siècle av. J.-C. en utilisant l'ombre d'un bâton.	La Terre a une forme approximativement sphérique, légèrement aplatie aux pôles (on parle de géoïde).
Latitude (angle par rapport à l'équateur) et longitude (angle par rapport au méridien de Greenwich).	Le méridien de Greenwich est le méridien de référence, situé à longitude 0°.	L'équateur est le parallèle de référence, situé à latitude 0°.	Un parallèle est un cercle imaginaire perpendiculaire à l'axe de rotation terrestre et parallèle à l'équateur.
Observations des bateaux disparaissant à l'horizon, photos satellites, expérience d'Ératosthène...	À notre échelle, la courbure terrestre est trop faible pour être perceptible.	En utilisant l'arc de cercle d'un grand cercle passant par les deux points.	Un cercle ayant le même centre que la Terre et représentant le plus court chemin entre deux points.
 $P = 2\pi R$	 Dans un triangle ABC rectangle en A, le carré de l'hypothénuse est égal à la somme des carrés des deux autres côtés: $BC^2 = AB^2 + AC^2$	C'est la distance maximale qu'un observateur peut voir avant que la courbure terrestre ne bloque la vue.	En utilisant la loi des sinus, et connaissant deux angles et une la largeur d'une base.

La Terre dans l'Univers

☰ Plan du cours	☺ Humour de physicien
4.1 L'évolution des modèles autour de la Terre 37 De l'Antiquité au Moyen-Âge ■ De Nicolas Copernic à Isaac Newton 4.2 L'orbite de la Terre 38 4.3 La Lune, satellite naturel de la Terre 39 Quelques données ■ Les phases de la Lune 4.4 Préparation au DS 41 Savoirs et savoir-faire ■ Flashcards	 Galilée discute de ses découvertes avec l'église
◀ Histoire des sciences	
🎧 <i>Héliocentrisme, la révolution qui fait tourner la Terre (France culture)</i> 	

4.1 L'évolution des modèles autour de la Terre

4.1.1 De l'Antiquité au Moyen-Âge

Définition 4.1: Modèle géocentrique

Les philosophes de l'Antiquité, en s'appuyant sur des observations, proposèrent un tout premier modèle : le **modèle géocentrique**. Dans ce modèle, la **Terre est le centre de l'Univers**, immobile, et le Soleil, les planètes et la Lune tournent autour de la Terre.

Afin d'expliquer les trajectoires des astres dans le ciel, Ptolémée construisit un système d'épicycles (Figure 4.1) permettant de justifier la trajectoire singulière de certaines planètes appelée mouvement rétrograde des planètes (Figure 4.2).

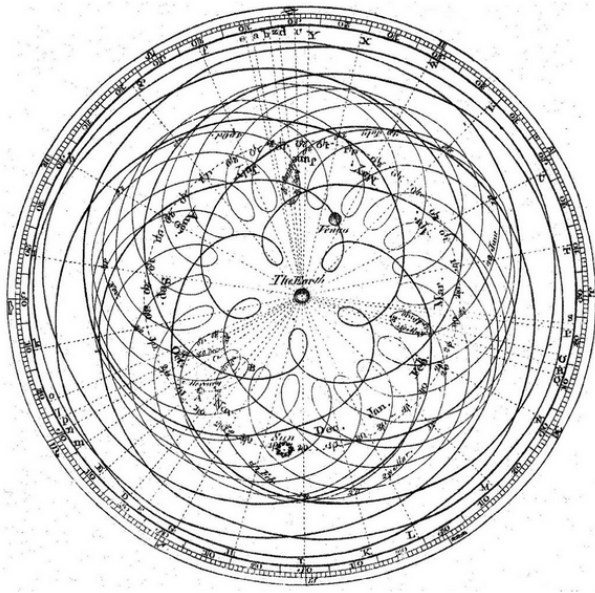


FIGURE 4.1 – Complexité des trajectoires dans le référentiel géocentrique (Source : www.wikipedia.org)



FIGURE 4.2 – Rétrogradation de Mars

4.1.2 De Nicolas Copernic à Isaac Newton

Au XVème siècle, Copernic décrit un modèle héliocentrique du mouvement des planètes (les planètes gravitent autour du Soleil). Ce modèle présente l'avantage de simplifier considérablement les trajectoires des astres.

Définition 4.2: Modèle héliocentrique

L'**héliocentrisme** est une théorie physique qui s'oppose au géocentrisme en plaçant le Soleil (plutôt que la Terre) au centre de l'Univers. Ainsi, les planètes, dont la Terre, tournent autour du Soleil.

Cependant, Copernic rencontre une vive opposition de la part des religieux mais aussi des scientifiques! En effet, comme aucun mouvement de la Terre n'est ressenti par ses habitants, ce modèle semblait inconcevable.

À l'aide de sa lunette astronomique, Galilée fait de nouvelles découvertes. En observant les quatre satellites de Jupiter, il en conclut que la rotation d'astres autour d'une planète est tout à fait plausible et semble conforter ainsi le modèle géocentrique. Cependant, lors de ses observations vers Venus, Galilée constate des phases qui ne peuvent être expliquées que par un modèle héliocentrique.

Par la suite, Kepler construit un modèle héliocentrique dans lequel la trajectoire des planètes est elliptique. Ce modèle semblait alors proposer de très bonnes prédictions des phénomènes.

Finalement, Newton appliquera ses lois aux mouvements des planètes dans un référentiel héliocentrique et confortera la communauté scientifique vers ce modèle.

4.2 L'orbite de la Terre

Si on décrit son mouvement dans le cadre du modèle héliocentrique, la Terre possède une trajectoire quasiment circulaire de rayon $R = 1,50 \times 10^{11}$ m en une durée de 365,25 jours dans le sens trigonométrique (si l'on regarde le Nord de la Terre). La Terre tourne aussi sur elle-même en 23h 56min 4s. Le plan de l'orbite terrestre s'appelle écliptique. L'axe de la Terre est incliné de $23,5^\circ$ par rapport à la normale de l'écliptique et pointe vers l'étoile polaire.

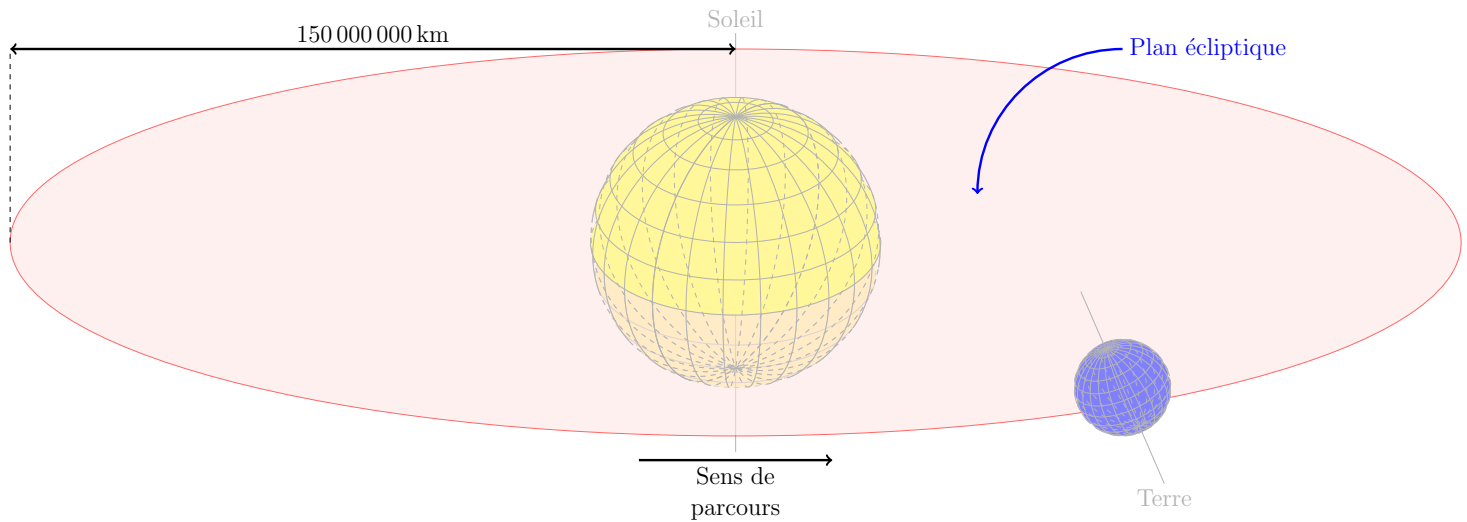


FIGURE 4.3 – Définition du plan écliptique

4.3 La Lune, satellite naturel de la Terre

4.3.1 Quelques données

- La Lune est un satellite naturel de la Terre qui ne possède pas d'atmosphère. En effet sa masse ($7,35 \times 10^{22}$ kg) est insuffisante pour retenir une atmosphère.
- La Lune décrit une trajectoire presque circulaire autour de la Terre, tournant dans le sens trigonométrique (en regardant depuis le Nord). Le rayon est de 385000 km et son orbite est inclinée de 5° par rapport au plan écliptique.
- La Lune exécute une orbite complète autour de la Terre en 27,3 jours tout comme une rotation sur elle-même, ce qui explique qu'elle nous présente toujours la même face.
- Par contre, la durée qui sépare deux pleines lune successives est de 29 jours.
- L'orbite de la Lune n'est pas tout à fait circulaire, mais plutôt elliptique.
- La distance Terre-Lune varie de 356 à 400 mille km pour une moyenne de 384 000 kilomètres.

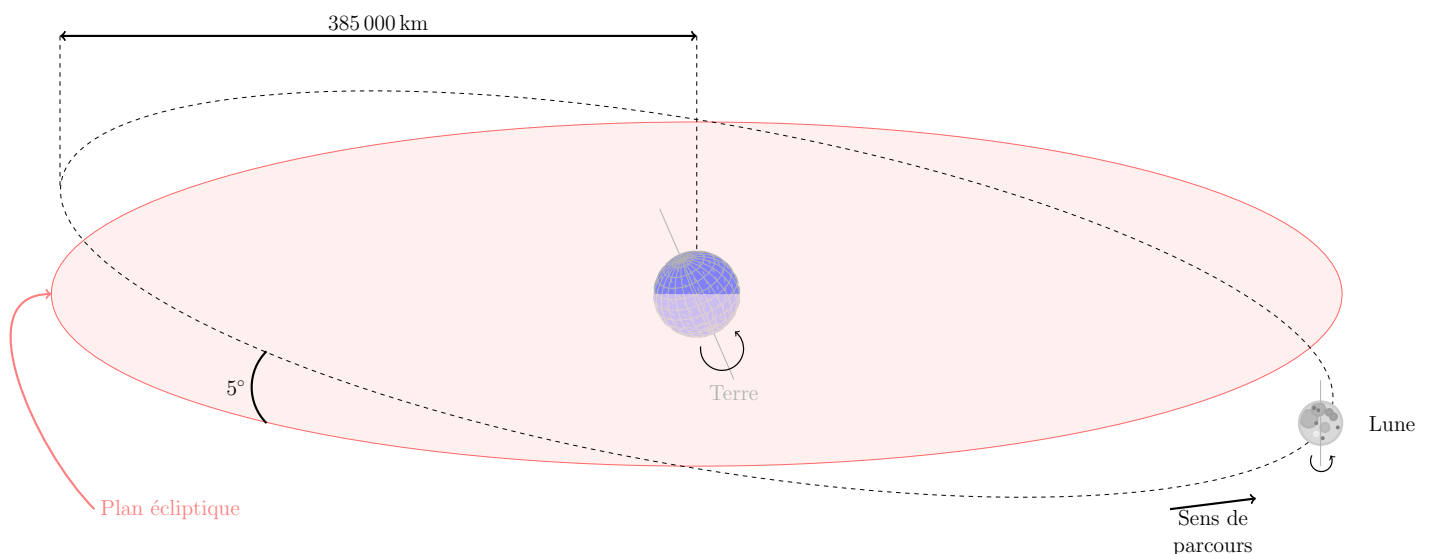


FIGURE 4.4 – Révolution de la Lune autour de la Terre

4.3.2 Les phases de la Lune

La Lune n'émet pas de lumière : elle diffuse simplement la lumière qu'elle reçoit du Soleil. C'est pour cela que nous sommes amenés à observer différentes phases. Dans l'hémisphère nord, les premiers quartiers sont toujours vus le soir, les derniers le matin (dans l'hémisphère sud, c'est le contraire) et la pleine Lune la nuit seulement. Quant à la nouvelle Lune, impossible de la voir puisqu'elle est dans la direction du Soleil.

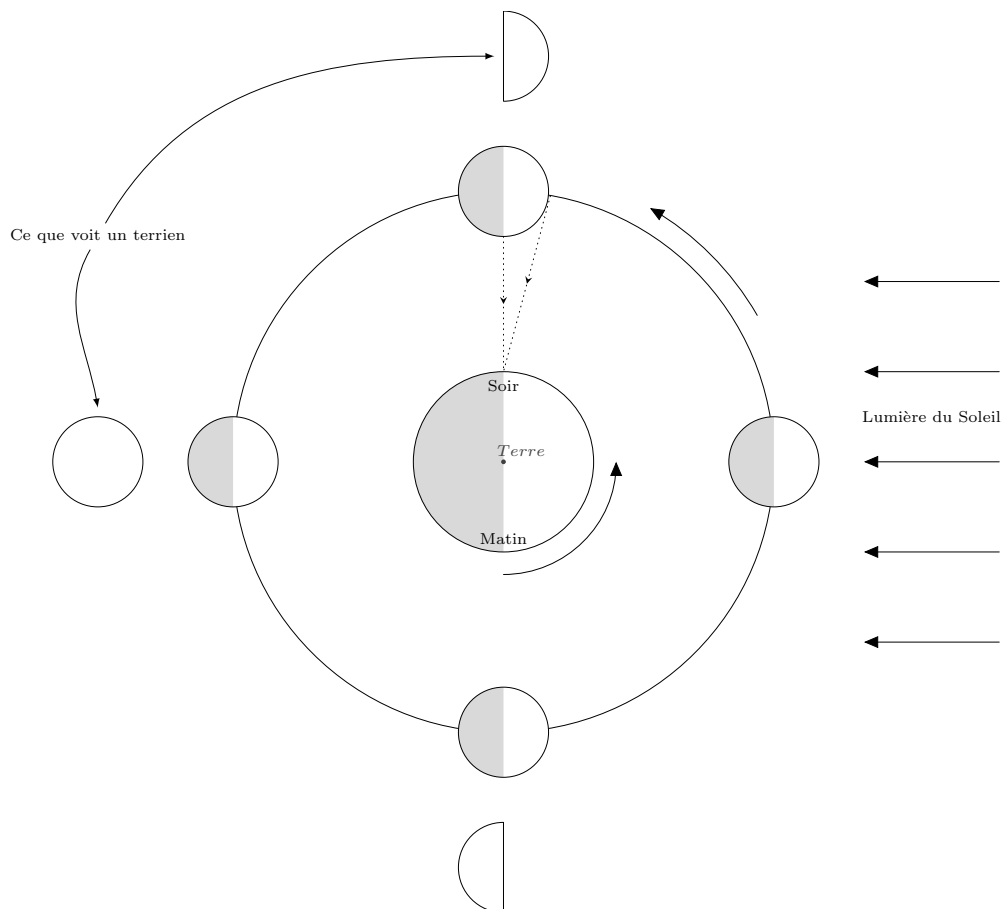


FIGURE 4.5 – Phases de la Lune

4.4 Préparation au DS

4.4.1 Savoirs et savoir-faire

Je dois savoir :	OK	À revoir
Observée dans un référentiel fixe par rapport aux étoiles, la Terre parcourt une trajectoire quasi circulaire autour du Soleil.	☐	☐
Le passage d'une conception géocentrique à une conception héliocentrique constitue l'une des controverses majeures de l'histoire des sciences.	☐	☐
Observée dans un référentiel géocentrique, la Lune tourne autour de la Terre sur une trajectoire quasi circulaire. Elle présente un aspect qui varie au cours de ce mouvement (phases).	☐	☐
La Lune tourne également sur elle-même et présente toujours la même face à la Terre.	☐	☐
Je dois pouvoir :	OK	À revoir
Interpréter des documents présentant des arguments historiques pour discuter la théorie héliocentrique.	☐	☐
Interpréter l'aspect de la Lune dans le ciel en fonction de sa position par rapport à la Terre et au Soleil.	☐	☐
Capacités mathématiques :		
Rotation.	☐	☐
Géométrie : cercle, sphère et disque ; rotation.	☐	☐
Proportionnalité.	☐	☐

FLASHCARD 1 Qu'est-ce que le modèle géocentrique ? CHAPITRE 4	FLASHCARD 2 Qu'est-ce que le modèle héliocentrique ? CHAPITRE 4	FLASHCARD 3 Qui a défendu le modèle héliocentrique ? CHAPITRE 4	FLASHCARD 4 Quelle est la contribution de Galilée à l'astronomie ? CHAPITRE 4
FLASHCARD 5 Quelle est l'orbite de la Terre autour du Soleil ? CHAPITRE 4	FLASHCARD 6 Quelle est la durée d'une révolution terrestre ? CHAPITRE 4	FLASHCARD 7 Pourquoi y a-t-il des saisons ? CHAPITRE 4	FLASHCARD 8 Qu'est-ce que le plan de l'écliptique ? CHAPITRE 4
FLASHCARD 9 Quelle est la durée de rotation de la Terre sur elle-même ? CHAPITRE 4	FLASHCARD 10 Pourquoi la Lune montre toujours la même face à la Terre ? CHAPITRE 4	FLASHCARD 11 Combien de temps met la Lune pour tourner autour de la Terre ? CHAPITRE 4	FLASHCARD 12 Quelles sont les phases de la Lune ? CHAPITRE 4
FLASHCARD 13 Qu'est-ce qu'une éclipse solaire ? CHAPITRE 4	FLASHCARD 14 Qu'est-ce qu'une éclipse lunaire ? CHAPITRE 4	FLASHCARD 15 Pourquoi les éclipses ne se produisent-elles pas chaque mois ? CHAPITRE 4	FLASHCARD 16 Peut-on observer la pleine Lune de jour ? CHAPITRE 4

Il a observé les satellites de Jupiter et les phases de Vénus, confirmant le modèle héliocentrique.	Nicolas Copernic a proposé le modèle héliocentrique où le Soleil est au centre du système solaire.	Le modèle héliocentrique place le Soleil au centre du système solaire, les planètes lui tournant autour.	Le modèle géocentrique place la Terre au centre de l'Univers avec les astres tournant autour d'elle.
C'est le plan dans lequel la Terre tourne autour du Soleil.	Les saisons sont dues à l'inclinaison de l'axe de rotation terrestre par rapport au plan de l'écliptique.	La Terre met environ 365,25 jours pour faire un tour complet autour du Soleil.	Elle suit une trajectoire elliptique (quasiment circulaire) avec le Soleil en l'un des foyers.
Nouvelle Lune, premier croissant, premier quartier, lune gibbeuse, pleine Lune, lune gibbeuse décroissante, dernier quartier, dernier croissant.	Environ 27,3 jours pour une révolution complète.	La Lune a une rotation synchrone : sa période de rotation est égale à sa période de révolution autour de la Terre.	Elle effectue une rotation complète en environ 24 heures.
Impossible car la pleine Lune n'a lieu que quand la Lune se trouve du côté de la face de la Terre où il fait nuit.	Parce que l'orbite de la Lune est inclinée de quelques degrés par rapport au plan de l'écliptique.	Une éclipse lunaire se produit lorsque la Terre projette son ombre sur la Lune.	Une éclipse solaire se produit lorsque la Lune passe entre la Terre et le Soleil, cachant ce dernier.

CHAPITRE 5

Le son : phénomène vibratoire

☰ Plan du cours	☺ Humour de physicien
5.1 Émission et propagation d'un signal sonore 45	
5.2 Vitesse de propagation du son 46	
5.3 Signal sonore périodique 47	
5.4 Perception du son 48	
5.5 Hauteur et timbre d'un son 48	
5.6 Intensité sonore et niveau d'intensité sonore 49	
5.7 Préparation au DS 51	
Savoirs et savoir-faire ■ Flashcards	
◀ Histoire des sciences	
🎧 <i>Les vaisseaux spatiaux font du bruit dans l'espace</i> 	

5.1 Émission et propagation d'un signal sonore

Définition 5.1: Son

Le **son** est une **perturbation** de la pression dans un milieu qui se **propage** de proche en proche. Pour créer un son, il faut donc créer une surpression, en utilisant par exemple un objet qui vibre comme un diapason ou un fil raide tendu.

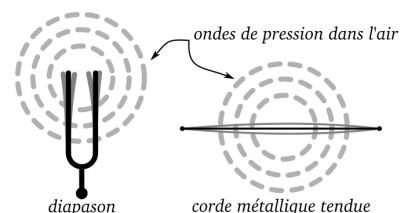


FIGURE 5.1 – Un diapason ou une corde en acier tendue peuvent produire une onde de pression (son) lors de leur mouvement de vibration.

Remarque. Pour que la vibration soit bien transmise à l'air, on peut utiliser une caisse de résonance.

Exemple 5.1

Pour bien rendre audible le son émis par un diapason, on le pose sur une surface dure (table en bois) ou sur une boîte creuse. Un instrument à corde (violon, guitare) utilise une caisse en bois qui amplifie le son par résonance.

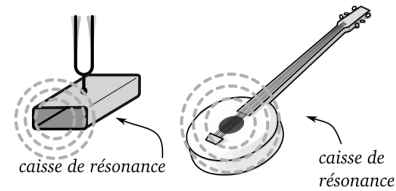


FIGURE 5.2 – Le son du diapason est amplifié grâce à une caisse de résonance. La corde métallique d'un instrument de musique est fixée sur une caisse en bois pour que le son émis soit plus fort.

Définition 5.2: Propagation du son

Pour que le son puisse se propager, il faut la présence d'un **milieu matériel** (un gaz, un liquide, un solide). Dans le vide, le son ne peut pas se propager.

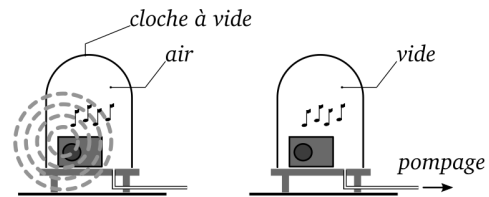


FIGURE 5.3 – La musique émise par un appareil sous la cloche à vide est perceptible tant que l'air est présent dans la cloche. Dès le pompage mis en route, ce son est de moins en moins audible car l'air ne le transmet plus.

5.2 Vitesse de propagation du son

Définition 5.3: Vitesse du son

Dans l'air qui nous entoure, la vitesse du son est d'environ 343 m/s. Cette vitesse varie légèrement en fonction de la température, de l'humidité et de la pression atmosphérique.

Exemple 5.2

La vitesse du son dans l'air 343 m/s correspond à une vitesse de 1200 km/h, la vitesse de certains avions militaires.

Exemple 5.3

Pendant un orage, on peut facilement remarquer un décalage entre le flash de l'éclair dû à la foudre et l'arrivée du son du tonnerre. La lumière se propage à $3,00 \times 10^8$ m/s, sa perception est quasi instantanée, alors que le son va mettre une seconde pour parcourir 343 mètres. En comptant les secondes de décalage et en multipliant par 343, on a la distance entre l'éclair et nos oreilles.

5.3 Signal sonore périodique

Définition 5.4: Période

Un signal sonore est **périodique** quand il se répète identique à lui même au bout d'une durée T appelée **période**, elle s'exprime en seconde (s).

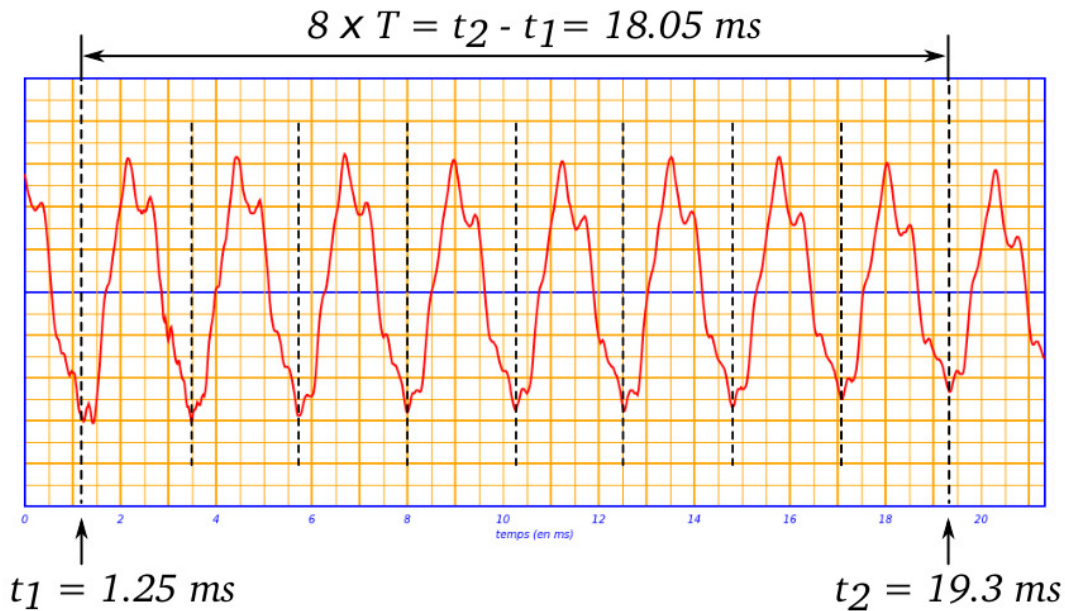


FIGURE 5.4 – Note d'un piano. On observe la présence d'un motif périodique.

Exemple 5.4

Sur l'enregistrement d'un son de la figure 5.4, on mesure que la durée totale de huit motifs périodique est

$$8 \times T = t_2 - t_1 = 18,05 \text{ ms} \quad (5.1)$$

Donc pour un seul motif, sa durée est

$$T = \frac{18,05 \text{ ms}}{8} = 2,26 \text{ ms} \quad (5.2)$$

Définition 5.5: Fréquence

La **fréquence** d'un son f est le nombre de fois que le signal se répète à l'identique par seconde, elle s'exprime en Hertz (Hz). Elle est l'inverse de la période T

$$f = \frac{1}{T} \quad (5.3)$$

Exemple 5.5

La fréquence de la note de piano de la figure 5.4 est de

$$f = \frac{1}{2,26 \text{ ms}} = \frac{1}{2,26 \times 10^{-3} \text{ s}} = 442 \text{ Hz} \quad (5.4)$$

ce qui correspond approximativement à la note La 3.

Exemple 5.6

Un son de période $T = 1,4 \text{ ms}$ correspond à un signal sonore de fréquence

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,4 \times 10^{-3}} = 714 \text{ Hz} \quad (5.5)$$

Une onde radio de fréquence $f = 108 \text{ MHz}$ correspond à un signal périodique de période

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{108 \times 10^6} = 9,3 \times 10^{-9} \text{ s} = 9,3 \text{ ns} \quad (5.6)$$

5.4 Perception du son

Définition 5.6: Spectre du son

Le spectre audible par un être humain s'étend de 20 Hz à 20 kHz. Les fréquences inférieures à 20 Hz correspondent aux infrasons, les fréquences supérieures à 20 kHz aux ultrasons.

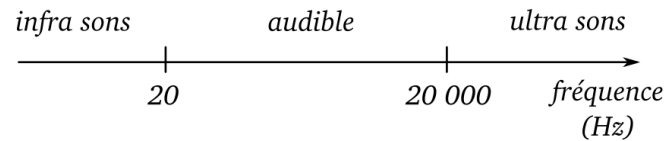


FIGURE 5.5 – Chez l'être humain, le spectre audible s'étend d'environ 20 Hz à 20 kHz. Certains animaux ont des spectres auditifs allant des infrasons aux ultrasons.

5.5 Hauteur et timbre d'un son

Définition 5.7: Hauteur

En acoustique, la hauteur d'un son correspond à sa fréquence f : un son haut a une fréquence élevée, un son bas a une fréquence faible.

Définition 5.8: Timbre

En acoustique, la forme du signal périodique va donner un timbre différent à des sons ayant même hauteur (ou fréquence).

Note	Fréquence (Hz)
Do3	262
Do#3	277
Ré3	294
Ré#3	311
Mi3	330
Fa3	349
Fa#3	370
Sol3	392
Sol#3	415
La3	440
La#3	466
Si3	494

TABLE 5.1 – Fréquence de quelques notes

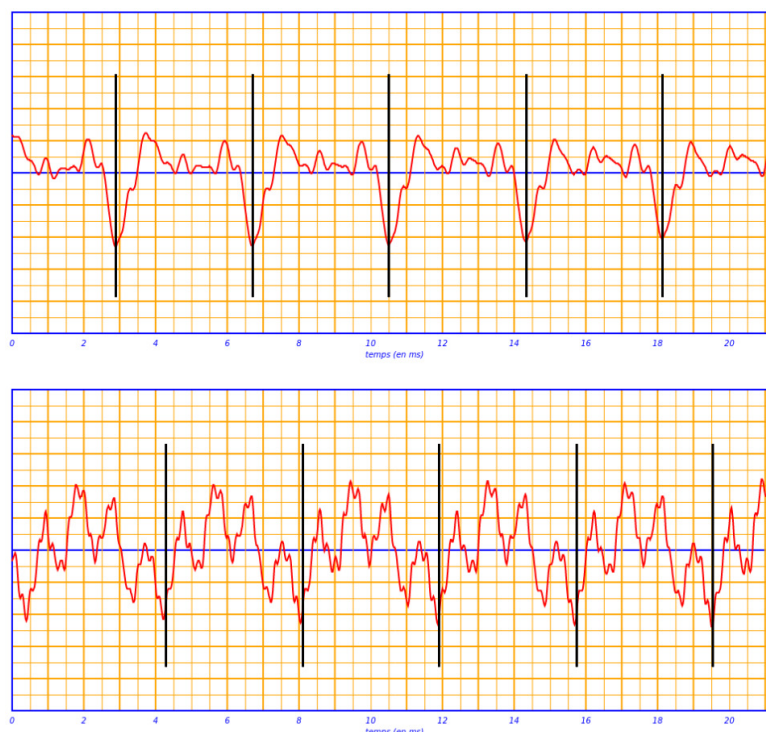


FIGURE 5.6 – Deux instruments différents jouent la même note, elles ont donc la même période, mais la forme des motifs périodiques est différente, le timbre de chaque l'instrument sera différent

5.6 Intensité sonore et niveau d'intensité sonore

Définition 5.9: Intensité sonore

L'onde de pression d'un son transporte une certaine puissance, proportionnelle au carré de cette pression. L'intensité du son correspond à la puissance reçue sur une surface de 1 m^2 .

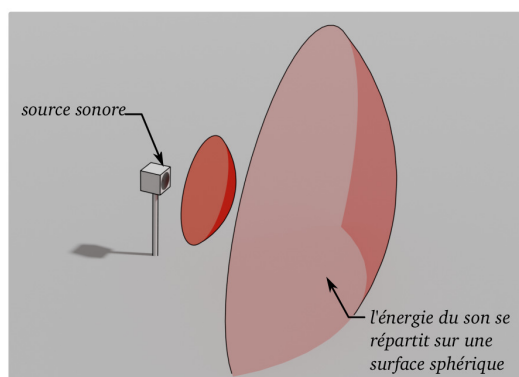


FIGURE 5.7 – La puissance transportée par une onde sonore (une énergie par seconde) se répartit sur une surface de plus en plus grande en s'éloignant de la source. L'intensité du son décroît.

Définition 5.10: Niveau d'intensité sonore

Le **niveau d'intensité sonore** est une mesure de la puissance du son **perçu par l'oreille humaine**. Il est exprimé en **décibels (dB)**. Il est lié à l'intensité sonore selon :

$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (5.7)$$

avec

- L le niveau d'intensité sonore du son en dB;
- I l'intensité sonore du son en W/m^2 ;
- I_0 l'intensité sonore de référence (qui correspond au seuil d'audibilité) : $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

Le niveau d'intensité sonore est une échelle non linéaire qui permet de comparer la puissance d'un son par rapport à la puissance d'un son à peine audible :

- Si on multiplie par 2 l'intensité acoustique, on ajoute 3 dB au niveau d'intensité acoustique,
- Si on multiplie par 10 l'intensité acoustique, on ajoute 10 dB au niveau d'intensité acoustique.

Remarque. Le niveau d'intensité sonore doit être contrôlé dans l'environnement des humains car il peut induire à terme des risques de surdité totale ou partielle. C'est également un facteur accidentogène à cause de la fatigue induite par un environnement bruyant.

Remarque. Vous pouvez visiter le site de l'INRS (Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et de maladies professionnelles)^a qui explique la réglementation française concernant les niveaux d'exposition au bruit.

a. <http://www.inrs.fr/risques/bruit/ce-qu-il-faut-retenir.html>

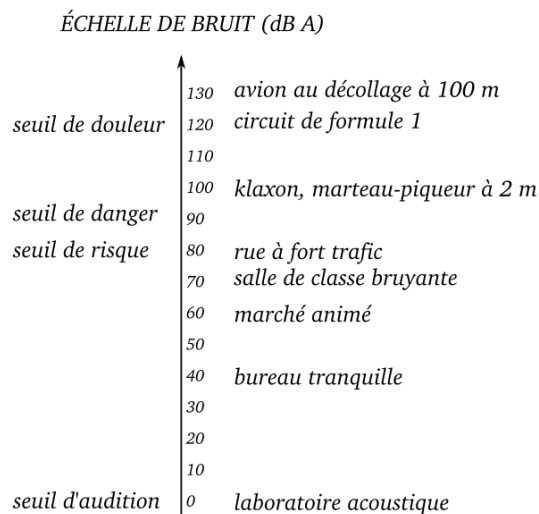


FIGURE 5.8 – L'échelle de niveaux sonores est exprimée en décibel acoustiques, c'est une échelle non linéaire, si on augmente le niveau de 10 dB, on multiplie par 10 la puissance acoustique émise.

5.7 Préparation au DS

5.7.1 Savoirs et savoir-faire

Je dois savoir :	OK	À revoir
Au-delà de 80 dB, un son peut devenir nocif selon son intensité et sa durée d'écoute. Il en résulte des effets sur la santé.	☐	☐
Les cellules ciliées, en quantité limitée, sont fragiles et facilement endommagées par des sons trop intenses. Les dégâts peuvent alors être irréversibles et causer des problèmes auditifs, voire une surdité.	☐	☐
Des mesures d'atténuation du bruit ainsi que des dispositifs individuels de protection existent.	☐	☐
Grâce aux innovations technologiques, les appareils auditifs et les dispositifs de protection individuelle ne cessent d'évoluer.	☐	☐
Je dois pouvoir :	OK	À revoir
Relier l'intensité du son et la durée d'écoute au risque encouru par l'oreille interne.	☐	☐
Mesurer le niveau d'intensité sonore perçu en fonction de la distance à la source avec ou sans dispositif de protection.	☐	☐
Capacités mathématiques :		
Lectures graphiques.	☐	☐
Organisation et exploitation de données.	☐	☐

FLASHCARD 1 En quoi le son est-il une onde ? CHAPITRE 5	FLASHCARD 2 Le son peut-il se propager dans le vide ? CHAPITRE 5	FLASHCARD 3 Quelle est la vitesse de propagation du son dans l'air ? CHAPITRE 5	FLASHCARD 4 Qu'est-ce que la période d'un signal sonore ? CHAPITRE 5
FLASHCARD 5 Quelle est l'unité usuelle de la période ? CHAPITRE 5	FLASHCARD 6 Qu'est-ce que la fréquence d'un signal sonore ? CHAPITRE 5	FLASHCARD 7 Quelle est l'unité de la fréquence ? CHAPITRE 5	FLASHCARD 8 Quel est le domaine de fréquence des infrasons ? CHAPITRE 5
FLASHCARD 9 Quel est le domaine de fréquence des ultrasons ? CHAPITRE 5	FLASHCARD 10 Quel est le spectre sonore audible par l'être humain ? CHAPITRE 5	FLASHCARD 11 Quel est la hauteur d'un son ? CHAPITRE 5	FLASHCARD 12 Quel est le timbre d'un son ? CHAPITRE 5
FLASHCARD 13 Quel est le lien entre période et fréquence ? CHAPITRE 5	FLASHCARD 14 Comment définit-on l'intensité sonore ? CHAPITRE 5	FLASHCARD 15 Quelle est la différence entre intensité sonore et niveau d'intensité sonore ? CHAPITRE 5	FLASHCARD 16 Quelle est la formule (avec unités) du niveau d'intensité sonore ? CHAPITRE 5

La période d'un signal sonore est la durée au bout de laquelle le signal se répète.	$343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Pour que le son puisse se propager, il faut la présence d'un milieu matériel (un gaz, un liquide, un solide). Dans le vide, le son ne peut pas se propager.	Le son est une perturbation de la pression dans un milieu qui se propage de proche en proche.
Les infrasons sont les sons ayant une fréquence inférieure à 20 Hz.	Le hertz (Hz) qui correspond à des s^{-1}.	La fréquence est le nombre de fois que se répète un signal à l'identique par seconde.	La seconde s.
Le timbre est la forme que prend le signal périodique.	La hauteur d'un son correspond à sa fréquence (un son haut est un son de fréquence élevée et donc aigu).	De 20 Hz à 20 kHz.	Les ultrasons sont les sons ayant une fréquence supérieure à 20 000 Hz = 20 kHz.
$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$ • L le niveau d'intensité sonore du son en dB; • I l'intensité sonore du son en W/m^2; • I_0 l'intensité sonore de référence (qui correspond au seuil d'audibilité): $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$.	Si on multiplie par 2 l'intensité sonore, alors le niveau d'intensité sonore est augmenté de 3. Si on multiplie par 10 l'intensité sonore, alors le niveau d'intensité sonore est augmenté de 10. Les intensités sonores s'additionnent mais ce n'est PAS le cas pour les niveaux d'intensité sonore.	L'intensité sonore est la puissance reçue sur une surface de 1 m^2. Elle a donc pour unité le $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.	$f = \frac{1}{T}$

CHAPITRE 6

Son et musique

☰ Plan du cours	😊 Humour de physicien
6.1 Son d'un instrument 55 Son pur, son composé ■ Son produit par une corde vibrante ■ Spectre de fréquences. 6.2 La musique, un art organisé. 57 De la note à la gamme ■ Consonance 6.3 La construction des gammes 59 Gamme pythagoricienne ■ Gamme tempérée 6.4 Préparation au DS 63 Savoirs et savoir-faire ■ Flashcards	
◀ Histoire des sciences	
🎧 <i>Peut-on expliquer la musique?</i> 	

« La musique est un exercice d'arithmétique secrète et celui qui s'y livre ignore qu'il manie des nombres »
Leibnitz, 1712

6.1 Son d'un instrument

6.1.1 Son pur, son composé

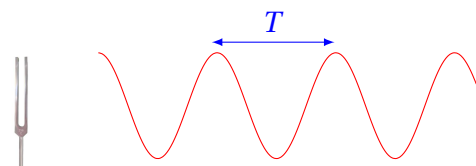
L'instrument le plus simple est le diapason utilisé pour accorder des autres instruments. Comment?

Définition 6.1: Son pur

Un son dont le signal est sinusoïdal est appelé **son pur**.

Exemple 6.1

Un diapason émet un son pur :

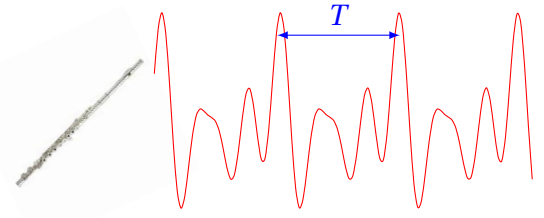


Définition 6.2: Son composé

Un **son composé** est un son dont l'onde n'est **pas** sinusoïdale

Exemple 6.2

La flûte traversière ne produit pas un son pur mais un son **complexe**. Pourtant les sons émis par le diapason et la flûte ont la **même fréquence** (même période). Ils jouent donc tous deux la **même note**.

**6.1.2 Son produit par une corde vibrante**

Une corde vibrante est un modèle utilisé en physique pour étudier les ondes mécaniques. Lorsqu'une corde tendue est mise en vibration, elle produit une onde stationnaire qui est à la base du fonctionnement des instruments à cordes (guitare, violon, piano...).

Mise en vibration et onde stationnaire

- Une corde tendue et fixée aux deux extrémités peut être mise en vibration par un stimulus (pincement, frottement, percussion).
- Les ondes qui se propagent dans la corde sont réfléchies aux extrémités, créant ainsi une interférence entre l'onde incidente et l'onde réfléchie.
- Cette interférence peut aboutir à la formation d'une onde stationnaire, où certains points restent immobiles (nœuds) et d'autres oscillent avec une amplitude maximale (ventres).

Modes propres de vibration

Les fréquences auxquelles la corde peut vibrer sont appelées fréquences propres :

- Fréquence fondamentale (f_0) : mode de vibration le plus simple, correspondant à une longueur d'onde égale à deux fois la longueur de la corde.
- Harmoniques : modes de vibration multiples de la fréquence fondamentale ($f_2 = 2f_0$, $f_3 = 3f_0$, etc.).

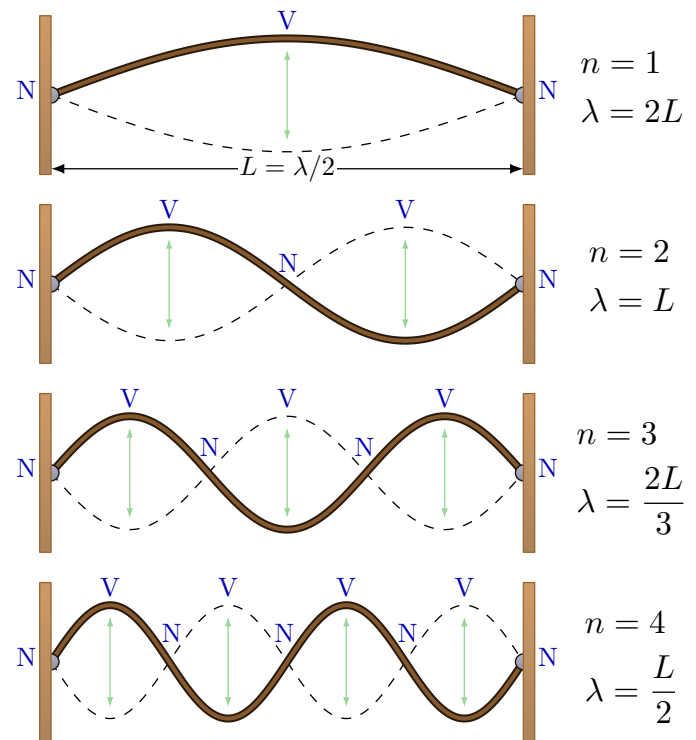


FIGURE 6.1 – Nœuds et ventres de vibration de la corde.

Propriété 6.1: Son émis par une corde vibrante

La **fréquence** du son produit par une corde dépend de trois facteurs : sa **longueur**, sa **masse linéique** et la **tension** exercée sur cette corde.

Exemple 6.3

- Plus la corde est longue, plus le son est grave.
- Plus la masse linéique d'une corde est élevée et plus la fréquence de vibration est faible et le son est

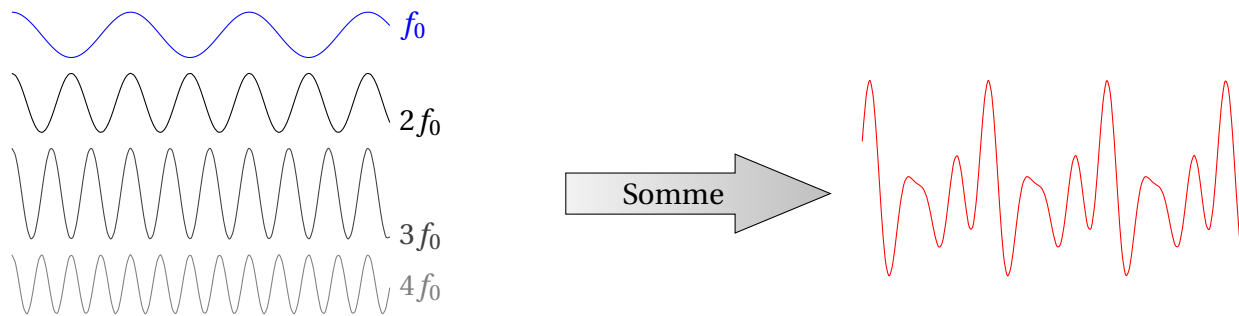
grave.

- Plus la tension exercée par sur la corde est importante et plus sa fréquence de vibration est élevée et le son est aigu.

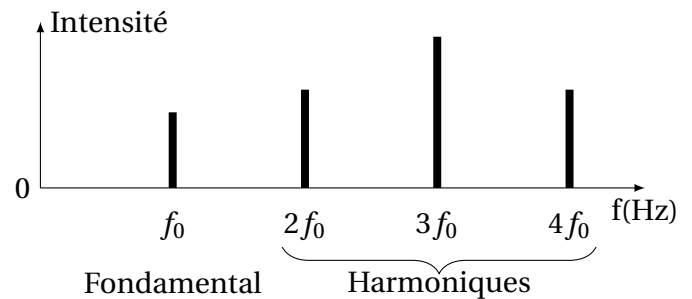
6.1.3 Spectre de fréquences.

Propriété 6.2: Décomposition spectrale d'un signal périodique

Tout signal périodique, de fréquence f_0 (la **fondamentale**) est la somme de plusieurs signaux sinusoïdaux (purs) de fréquences multiples entières de f_0 appelées **harmoniques**.



Plutôt que de représenter tous les signaux (fondamental et harmoniques), on préfère le **spectre de fréquences** qui montre les différents harmoniques en abscisse et leur intensité relative en ordonnée. C'est une décomposition de **Fourier**.



6.2 La musique, un art organisé

6.2.1 De la note à la gamme

Définition 6.3: Note

Une **note** correspond à la **hauteur** d'un son. Elle est donc caractérisée par la fréquence fondamentale du son en Hertz.

Ce qui donne une impression de justesse à l'oreille, n'est pas la hauteur d'une note isolée. C'est au contraire le rapport de fréquences entre plusieurs notes.

Définition 6.4: Intervalle

Le rapport $\frac{f_2}{f_1}$ entre deux notes de fréquences f_1 et f_2 telles que $f_2 > f_1$ s'appelle un **intervalle** en musique.

Définition 6.5: Octave

Lorsqu'un intervalle entre deux notes vaut **2**, on appelle cet intervalle une **octave**. Deux notes à l'octave portent le même nom.

Exemple 6.4

Le La_3 a pour fréquence $f_3 = 440 \text{ Hz}$. Une octave plus haut, on trouve le La_4 de fréquence $f_4 = 2f_3 = 880 \text{ Hz}$.

Entre deux notes à l'octave, on trouve une suite finie de notes dont les fréquences sont comprises entre f et $2f$. Cette suite finie de notes répartie sur une octave s'appelle une gamme.

Définition 6.6: Gamme

Une **gamme** est une suite montante ou descendante de notes **comprises dans une octave**, suivant des intervalles déterminés.

6.2.2 Consonance**Définition 6.7: Consonance**

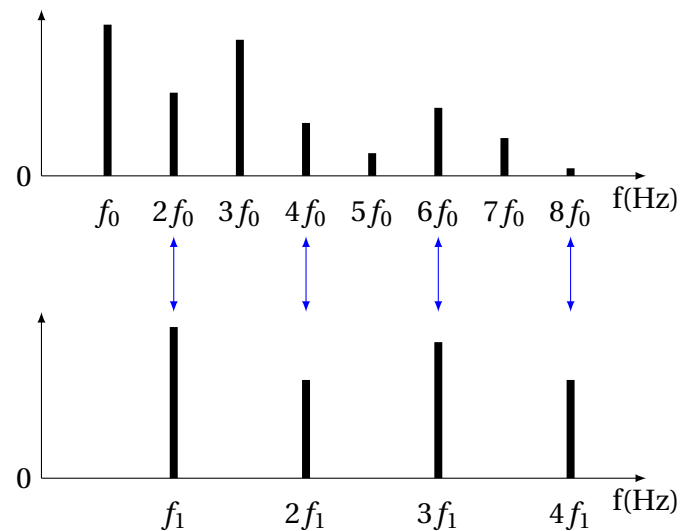
Deux sons, joués ensemble ou l'un après l'autre, sont **consonants** si leur association est **agréable à l'oreille**.

Admettons qu'un instrument quelconque joue une note de musique (son composé) de fréquence fondamentale f_0 représentée sur le premier spectre.

Puis une seconde note de fondamentale $f_1 = 2f_0$ comme sur le deuxième spectre.

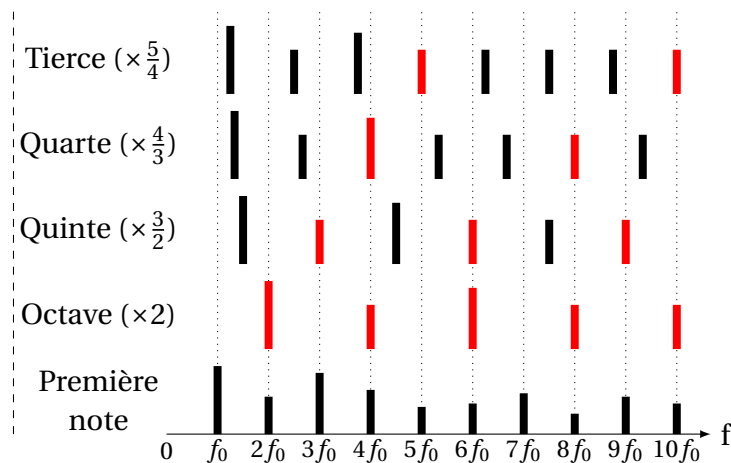
Ces deux notes sont-elles consonantes?

Les fréquences du deuxième spectre sont contenues dans le premier. Or, une seule note est forcément consonante. Ces deux notes sont en fait la même note, mais la deuxième est plus aiguë que la première. Elles sont donc consonantes.

**Propriété 6.3: Consonance de deux notes**

Deux notes de fréquences f_1 et f_2 sont consonantes si l'intervalle $\frac{f_2}{f_1}$ est une **fraction entière** (c'est-à-dire un nombre entier divisé par un autre nombre entier).

Lorsqu'un son est produit, il contient non seulement sa fréquence fondamentale mais aussi des harmoniques (multiples entiers de cette fréquence fondamentale). Si deux notes ont un rapport de fréquence simple (par exemple $\frac{3}{2}$ pour une quinte ou $\frac{4}{3}$ pour une quarte), alors certaines de leurs harmoniques coïncident, comme le montre la figure ci-contre. Cela crée une superposition harmonieuse des sons.



Exemple 6.5

Le La_3 a pour fréquence $f_3 = 440 \text{ Hz}$ et le La_4 de fréquence $f_4 = 880 \text{ Hz}$ sont consonants puisque l'intervalle vaut $2 = \frac{2}{1}$.

Par contre le La_3 et la note de fréquence $f = 622,25 \text{ Hz}$ sont dissonants puisque $\frac{622,25}{440} = \sqrt{2}$ qui est un nombre irrationnel et donc ne peut pas s'écrire comme la fraction de deux nombres entiers.

Exemple 6.6

Deux des intervalles consonants les plus importants dont on va parler ici sont :

- l'octave : intervalle de 2 entre deux notes $\frac{f_2}{f_1} = \frac{2}{1}$. Par exemple, une première note a une fréquence de 100 Hz, la seconde a une fréquence de 200 Hz s'il y a une octave.
- la quinte : intervalle de $\frac{f_2}{f_1} = \frac{3}{2}$ entre deux notes. Par exemple, si on prend une note à la fréquence de 100 Hz, la deuxième est à la fréquence de 150 Hz.

6.3 La construction des gammes

6.3.1 Gamme pythagoricienne

Construction de la gamme

Dès l'Antiquité, la construction des gammes est basée sur des fractions simples, ($\frac{2}{1}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{4}{3}$, etc.). En effet, des sons dont les fréquences sont dans ces rapports simples sont consonants, c'est-à-dire qu'ils provoquent une sensation agréable à l'écoute.

Définition 6.8: Quinte

La **quinte** est l'intervalle entre deux fréquences de rapport $\frac{3}{2}$.

Exemple 6.7

Le La_3 a pour fréquence 440 Hz. La quinte du La_3 a une fréquence de 660 Hz. La quinte a donc bien l'intervalle $660 \text{ Hz} / 440 \text{ Hz} = \frac{3}{2}$.

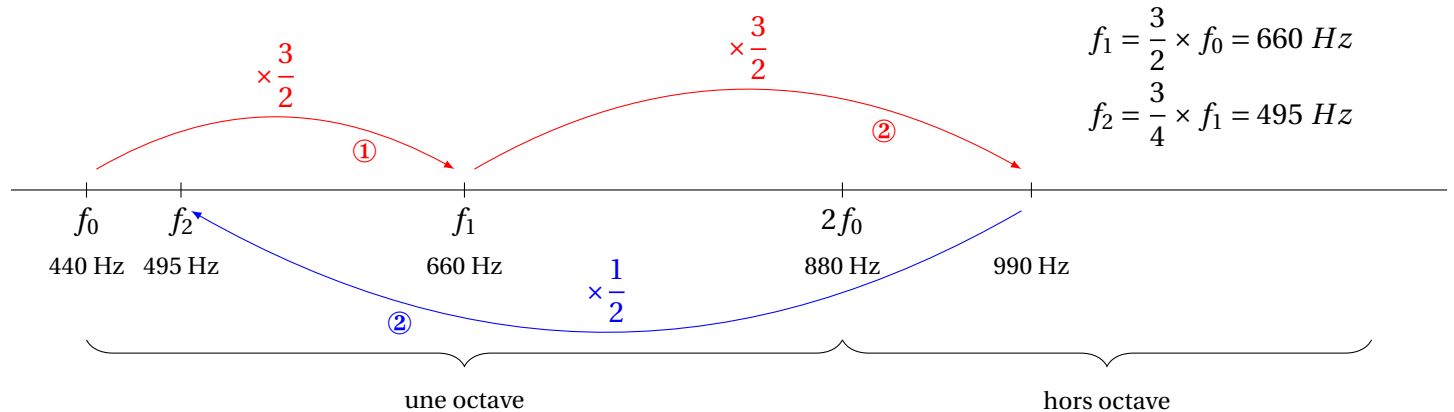
Définition 6.9: Gamme de Pythagore

La gamme de Pythagore est une répartition consonante des notes basée sur la quinte. (On l'appelle aussi cycle des quintes)

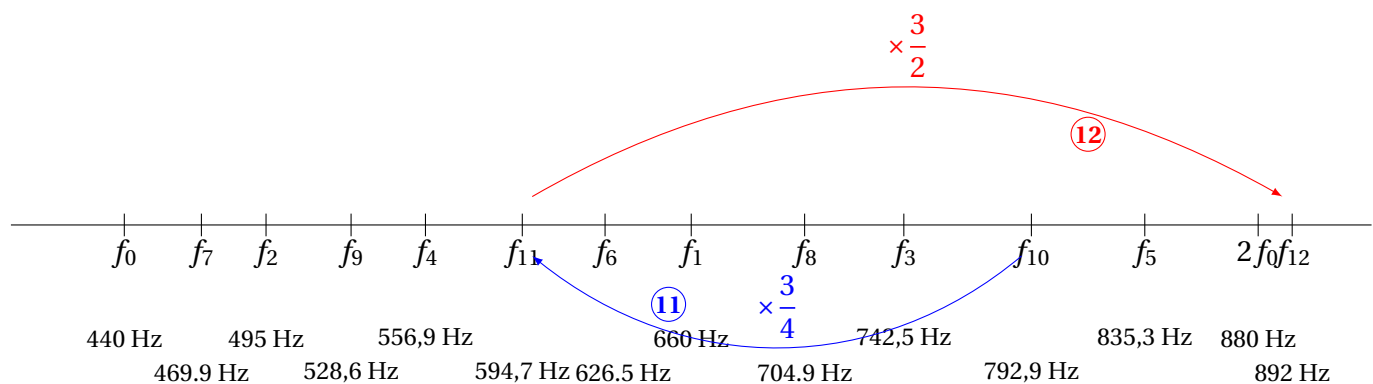
Pour déterminer la fréquence d'une note, on multiplie la fréquence de la note trouvée précédemment par $\frac{3}{2}$. Si la valeur sort de l'octave, elle est divisée par deux.

Exemple 6.8

Prenons un exemple pour l'octave du La_3 au La_4 :



Ainsi de suite jusqu'à :



Quasi juste...

Après 12 quintes, on obtient presque $2f_0$!

Pour construire sa gamme, Pythagore a pris la quinte de la note de départ et répète cette opération 12 fois. Au bout du 13ème coup, on retombe sur une fréquence proche de celle de la note de départ. On représente alors le cycle des quintes :

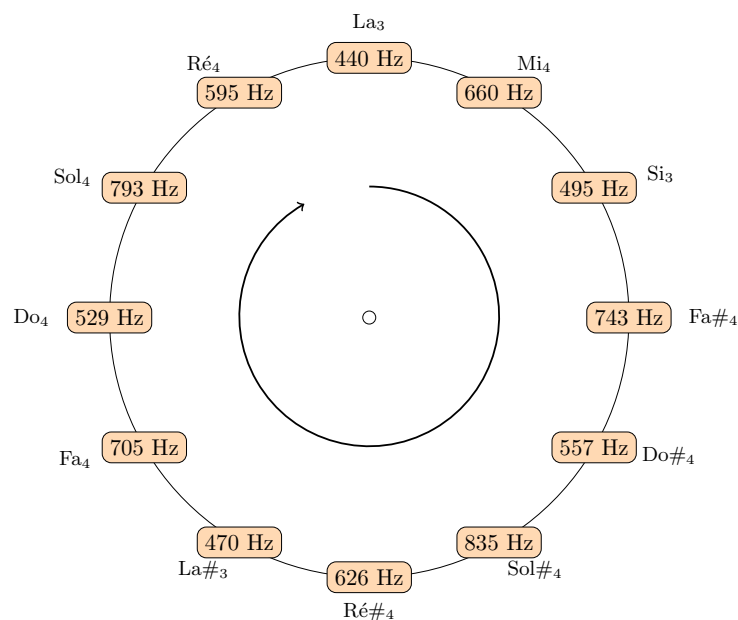


FIGURE 6.2 – Cycle de quintes

Les problèmes posés par les gammes de Pythagore

Pythagore se rend compte que $f_{12} \approx 2f_0$ mais qu'il y a un décalage appelé **comma**. Il semble qu'une octave puisse être divisée en 12 intervalles réguliers (en rapport!). On peut donc se demander pourquoi n'avoir gardé que 7 notes et introduit des dièses et autres bémols.

Les notes de f_0 à f_{12} sont consonantes deux à deux (cycle des quintes), f_0 l'est parfaitement avec $2f_0$ mais f_{12} ne l'est plus du tout avec $2f_0$.

Cette quinte, appelée la quinte du loup parce qu'elle rappelle le hurlement du loup, n'est pas consonante avec les autres (elle sonne faux). L'écart entre la quinte du loup et les autres quintes est appelé comma pythagoricien (représenté en rouge ci-dessous). Pour contourner cette difficulté, les compositeurs choisissaient de positionner la quinte du loup dans le cycle sur un intervalle peu utilisé dans leur composition musicale.

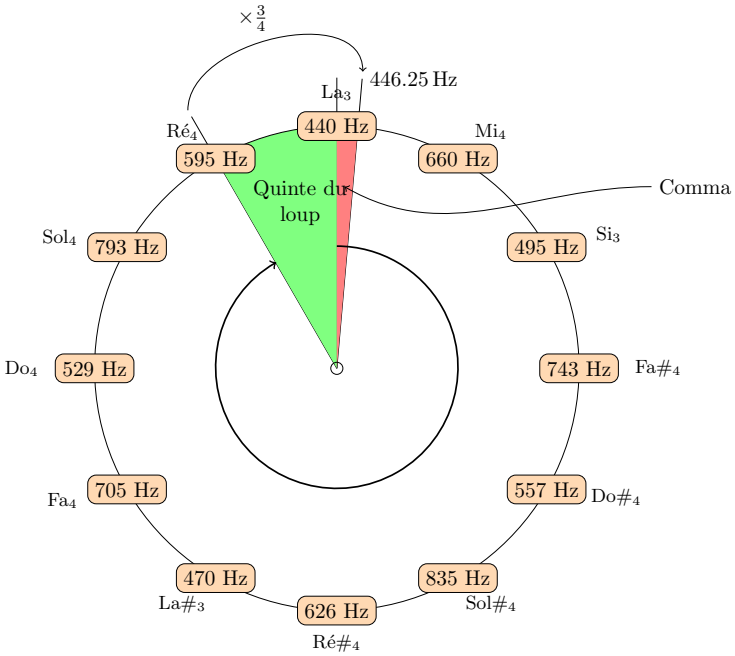


FIGURE 6.3 – Quinte du loup

6.3.2 Gamme tempérée

La dissonance entre f_{12} et $2f_0$ est vraiment trop grande et trop désagréable à l'oreille.

Définition 6.10: Gamme tempérée

La gamme moderne, dite **tempérée** répartit les fréquences dans une octave de manière à ce que le **comma** soit divisé en douze : ainsi l'oreille fait peu de différence.

Rapport des fréquences de la gamme de Pythagore (après avoir remis les fréquences par ordre croissant) :

Rapports	$\frac{f_7}{f_0}$	$\frac{f_2}{f_7}$	$\frac{f_9}{f_2}$	$\frac{f_4}{f_9}$	$\frac{f_{11}}{f_4}$	$\frac{f_6}{f_{11}}$	$\frac{f_1}{f_6}$	$\frac{f_8}{f_1}$	$\frac{f_3}{f_8}$	$\frac{f_{10}}{f_3}$	$\frac{f_5}{f_{10}}$	$\frac{f_{12}}{f_5}$
Pythagore	1,068	1,053	1,069	1,053	1,069	1,053	1,053	1,067	1,053	1,068	1,053	1,068
Tempérée	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r

Nous cherchons ici à passer d'une note à l'autre avec un intervalle r constant.

Quelle valeur du rapport serait convenable pour la gamme tempérée?

On a obligatoirement : $\frac{f_{12}}{f_0} = 2$

Or : $\frac{f_{12}}{f_0} = \frac{f_{12}}{f_5} \times \frac{f_5}{f_{10}} \times \frac{f_{10}}{f_3} \times \frac{f_3}{f_8} \times \frac{f_8}{f_1} \times \frac{f_1}{f_6} \times \frac{f_6}{f_{11}} \times \frac{f_{11}}{f_4} \times \frac{f_4}{f_9} \times \frac{f_9}{f_2} \times \frac{f_2}{f_7} \times \frac{f_7}{f_0} = r^{12} = 2$

Ça rappelle un peu les suites géométriques non ?

Le rapport est donc : $r = \sqrt[12]{2} = 2^{1/12} \approx 1,059$

Et les fréquences de la gamme tempérée : (du La_3 au La_4) :

f (Hz)	440	466,2	493,9	523,2	554,4	587,3	622,2	659,3	698,5	740,0	784,0	830,6	880,0
Notes	La_3	$La_3 \sharp$	Si_3	Do_4	$Do_4 \sharp$	$Ré_4$	$Ré_4 \sharp$	Mi_4	Fa_4	$Fa_4 \sharp$	Sol_4	$Sol_4 \sharp$	La_4

Un demi-ton entre deux notes successives.

Les notes ne sont plus tout à fait consonantes, mais l'oreille ne le perçoit pas. La musique moderne (et même classique!) est basée sur la gamme tempérée légèrement fausse. Le remarque-t-on ?

6.4 Préparation au DS

6.4.1 Savoirs et savoir-faire

Je dois savoir :	OK	À revoir
Un son pur est associé à un signal dépendant du temps de façon sinusoïdale.	☐	☐
Un signal périodique de fréquence f se décompose en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquences multiples entières de f . Le son associé à ce signal est un son composé. f est appelé fréquence fondamentale, les autres fréquences sont appelées harmoniques.	☐	☐
La puissance par unité de surface transportée par une onde sonore est quantifiée par son intensité. Son niveau d'intensité sonore est exprimé en décibels selon une échelle logarithmique.	☐	☐
La corde tendue d'un instrument à cordes émet en vibrant un son composé dont la fréquence fondamentale ne dépend que de ses caractéristiques (longueur, tension, masse par unité de longueur).	☐	☐
Dans les instruments à vent, un phénomène analogue se produit par vibration de l'air dans un tuyau.	☐	☐
En musique, un intervalle entre deux sons est défini par le rapport de leurs fréquences fondamentales.	☐	☐
Deux sons dont les fréquences sont dans le rapport 2/1 correspondent à une même note, à deux hauteurs différentes. L'intervalle qui les sépare s'appelle une octave.	☐	☐
Une gamme est une suite finie de notes réparties sur une octave.	☐	☐
Je dois pouvoir :	OK	À revoir
Utiliser un logiciel permettant de visualiser le spectre d'un son.	☐	☐
Utiliser l'échelle logarithmique de niveau d'intensité sonore pour relier l'intensité sonore au niveau d'intensité sonore.	☐	☐
Relier qualitativement la fréquence fondamentale du signal émis aux caractéristiques d'une corde vibrante.	☐	☐
Identifier deux notes à l'octave à l'aide de leur spectre.	☐	☐
Capacités mathématiques :		
Représentations graphiques.	☐	☐
Grandeurs quotients.	☐	☐
Calcul algébrique.	☐	☐
Fonctions trigonométriques.	☐	☐
Grandeurs quotients.	☐	☐
Puissances de 2.	☐	☐

FLASHCARD 1 Qu'est-ce qu'un son pur ? CHAPITRE 6	FLASHCARD 2 Qu'est-ce qu'un son composé ? CHAPITRE 6	FLASHCARD 3 Qu'est-ce que le spectre d'un son ? CHAPITRE 6	FLASHCARD 4 Pour un signal périodique, comment appelle-t-on la fréquence de ce signal et ses multiples ? CHAPITRE 6
FLASHCARD 5 Qu'est-ce que la consonance ? CHAPITRE 6	FLASHCARD 6 Pourquoi certaines notes sont-elles consonantes ? CHAPITRE 6	FLASHCARD 7 Qu'est-ce que le timbre d'un son ? CHAPITRE 6	FLASHCARD 8 Qu'est-ce qu'un intervalle en musique ? CHAPITRE 6
FLASHCARD 9 Qu'est-ce qu'une octave ? CHAPITRE 6	FLASHCARD 10 Qu'est-ce qu'une gamme musicale ? CHAPITRE 6	FLASHCARD 11 Qu'est-ce que la quinte ? CHAPITRE 6	FLASHCARD 12 Qu'est-ce que la gamme pythagoricienne ? CHAPITRE 6
FLASHCARD 13 Pourquoi la gamme pythagoricienne n'est pas satisfaisante ? CHAPITRE 6	FLASHCARD 14 Qu'est-ce que la gamme tempérée ? CHAPITRE 6	FLASHCARD 15 Comment fonctionne un diapason ? CHAPITRE 6	FLASHCARD 16 Pourquoi les cordes d'une guitare n'ont-elles pas toutes la même fréquence ? CHAPITRE 6

La fréquence du signal est appelée fondamentale f_0 et ses multiples ($2f_0, 3f_0, \dots$) les harmoniques.	Le spectre d'un son est la représentation des différentes fréquences qui composent un son.	Un son composé est un son constitué de plusieurs ondes sinusoïdales dont on fait la somme.	Un son pur est un son caractérisé par une onde sinusoïdale qui n'a donc qu'une seule fréquence.
Un intervalle est le rapport de fréquence entre deux notes: $\frac{f_2}{f_1}$.	Le timbre est ce qui permet de différencier deux sons de même fréquence mais produits par des instruments différents.	Deux notes sont consonantes si leur intervalle est une fraction entière (comme $3/2$ ou $4/3$).	La consonance est la sensation d'harmonie entre deux sons joués simultanément.
C'est une gamme construite en empilant des quintes successives avec un intervalle de fréquences de $3/2$.	La quinte est l'intervalle entre deux fréquences de rapport $3/2$.	Une gamme est une suite finie de notes réparties sur une octave suivant un schéma précis d'intervalles.	Une octave correspond à un intervalle où la fréquence est multipliée par deux.
La fréquence d'une corde dépend de sa longueur, de sa tension et de sa masse linéique.	Un diapason vibre à une fréquence fixe lorsqu'il est frappé et produit un son pur.	C'est une gamme où l'octave est divisée en 12 intervalles égaux, utilisée dans la musique occidentale moderne.	Le cycle des quintes ne boucle pas sur $f_{12} = 2f_0$, c'est-à-dire qu'on a un décalage à l'octave suivante: c'est la quinte du loup.

CHAPITRE 7

Le son, une information à coder

☰ Plan du cours	☺ Humour de physicien
7.1 Signaux analogiques et numériques. 67 Signal analogique. ■ Signal numérique. 7.2 Numérisation d'un signal (ou discrétisation d'un signal). . . . 68 Intérêt. ■ Échantillonnage. ■ Quantification. 7.3 Compression. 72 Taille d'un fichier audio. ■ Compression sans perte ou par répétition. ■ Compression avec perte. ■ Taux de compression. ■ Exemples de formats de compression. 7.4 Préparation au DS 74 Savoirs et savoir-faire ■ Flashcards	 
◀ Histoire des sciences	
■ La physique animée : La Conversion Analogique-Numérique : la quantification (Unisciel) 	

7.1 Signaux analogiques et numériques.

Définition 7.1: Signal

On appelle **signal**, toute grandeur physique mesurée au cours du temps.

Exemple 7.1

La tension électrique (en V), la température (en °C), le niveau d'intensité sonore (dB), le pH (sans unité), le cours d'une action (€) sont des signaux.

7.1.1 Signal analogique.

« Analogique » veut dire le contraire de logique, la logique étant ici "l'art de manipuler" des 0 et des 1.

Définition 7.2: Signal analogique

Un signal **analogique** est un signal **continu** au cours du temps.

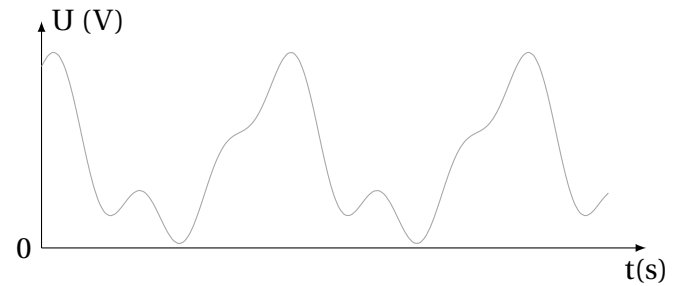


FIGURE 7.1

7.1.2 Signal numérique.**Définition 7.3: Signal numérique**

Un signal **numérique** est une suite de 0 et de 1 logiques.

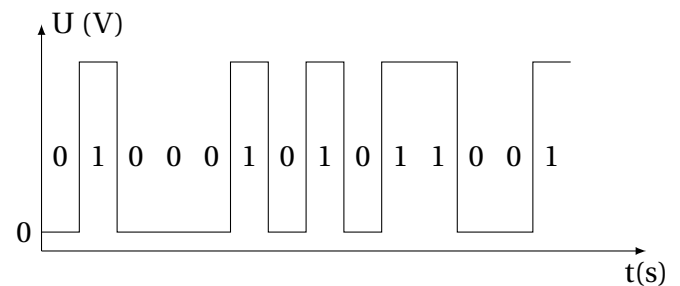


FIGURE 7.2

7.2 Numérisation d'un signal (ou discrétisation d'un signal).**7.2.1 Intérêt.**

Parmi les élèves lisant ce cours, peu connaissent le "doux" grésillement d'un disque vinyle. C'est ce qu'on appelle le **bruit de fond**. Il a pour origines, l'agitation thermique des électrons libres (transmetteurs du signal) dans les circuits électriques et surtout les perturbations dues aux ondes électromagnétiques dans lesquelles nous baignons littéralement. Alors, un joli signal peut devenir :

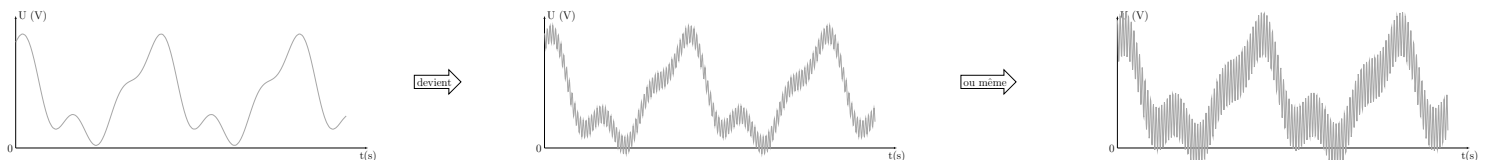


FIGURE 7.3 – Signal analogique avec et sans bruit

Si le signal est trop faible, on peut même ne plus rien reconnaître du tout !

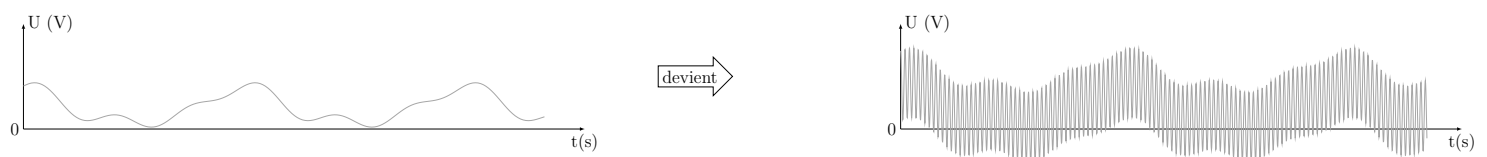


FIGURE 7.4 – Signal faible avec et sans bruit

Il est donc impossible de transmettre un tel signal. Alors qu'en numérique :

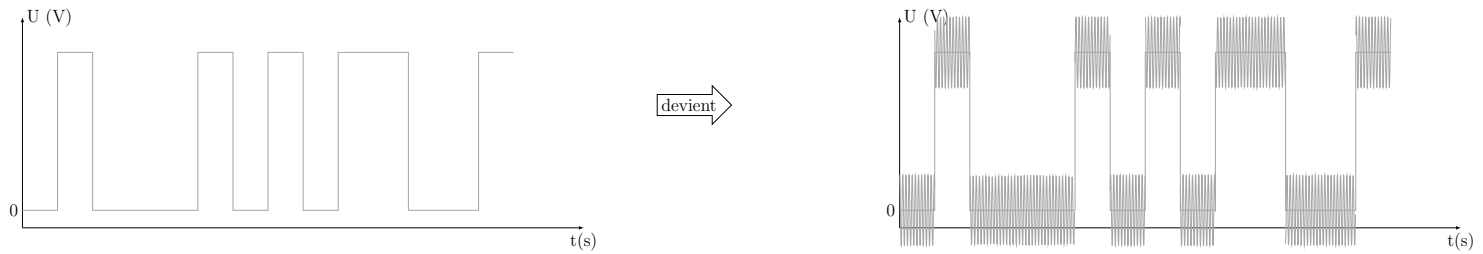


FIGURE 7.5 – Signal numérique avec et sans bruit

Malgré le bruit, on reconnaît quand même les 0 et les 1 !

7.2.2 Échantillonnage.

Définition 7.4: Échantillonnage

Comme son nom l'indique, l'**échantillonnage** consiste à prendre un échantillon du signal à **intervalle de temps régulier (T_e)**.

Les échantillons, mis bout à bout doivent restituer le signal le plus fidèlement possible.

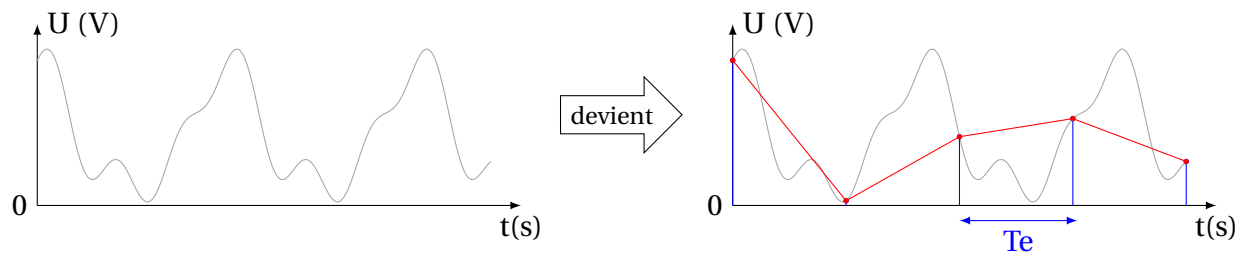


FIGURE 7.6 – Exemple d'échantillonnage d'un signal avec une grande période

Ici, la courbe rouge ne représente pas du tout le signal original. Il faut échantillonner plus **fréquemment**.

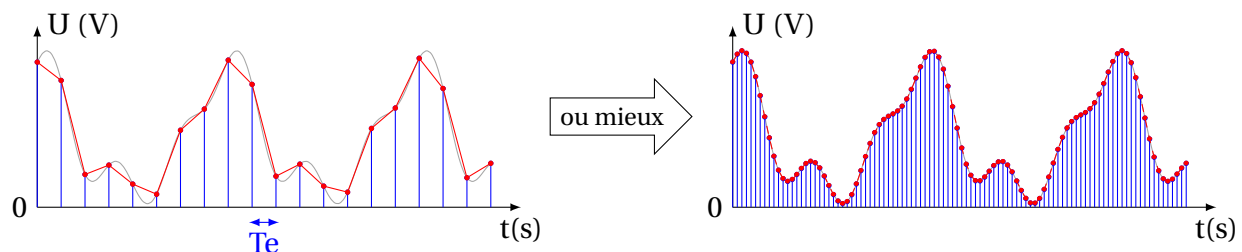


FIGURE 7.7 – Exemple d'échantillonnage d'un signal avec une période plus faible, soit une fréquence plus grande

Propriété 7.1: Qualité de l'échantillonnage

Le "rendu" d'un signal est meilleur si la **fréquence d'échantillonnage est élevée** (ou si T_e est faible).

7.2.3 Quantification.

Il faut également saucissonner le signal en amplitude et attribuer un nombre entier aux différentes valeurs de la tension. Comme l'ordinateur "travaille" en binaire, on divise la tension par une puissance de 2. Dans les exemples suivants, on prendra toujours la même fréquence d'échantillonnage. La tension varie entre 0V et 5V et la valeur numérique attribuée est immédiatement supérieure à la valeur réelle.

Codé sur 2 bits :

On obtient les correspondances :

Tension (V)	Système décimal	Système binaire
0	0	00
1,25	1	01
2,5	2	10
3,75	3	11

TABLE 7.1 – Correspondance entre la valeur de tension, le système décimal et le système binaire dans le cas où les grandeurs sont codées sur 2 bits

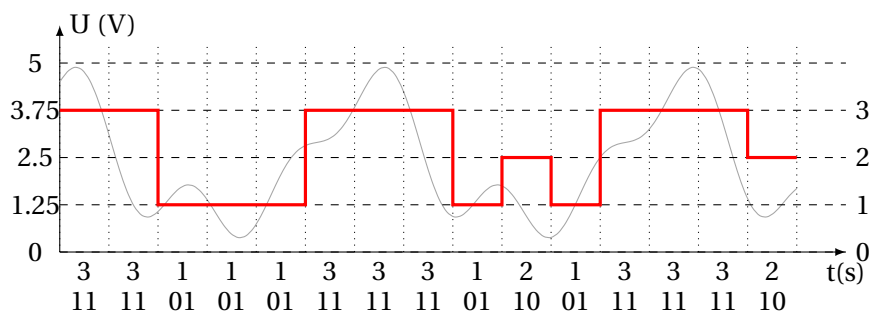


FIGURE 7.8 – Signal numérique obtenu en rouge à partir du signal analogique en gris.

Propriété 7.2: Pas de l'échantillonnage

On appelle **pas**, la différence de tension entre deux valeurs successives.

Il dépend du nombre n de bits utilisés pour le codage ainsi que de la valeur de la tension maximale U_{max} :

$$p = \frac{U_{max}}{2^n} \quad (7.1)$$

Le signal rouge est la restitution en tension du signal numérique. Il n'est pas très ressemblant au signal analogique. Il faut donc "saucissonner" davantage.

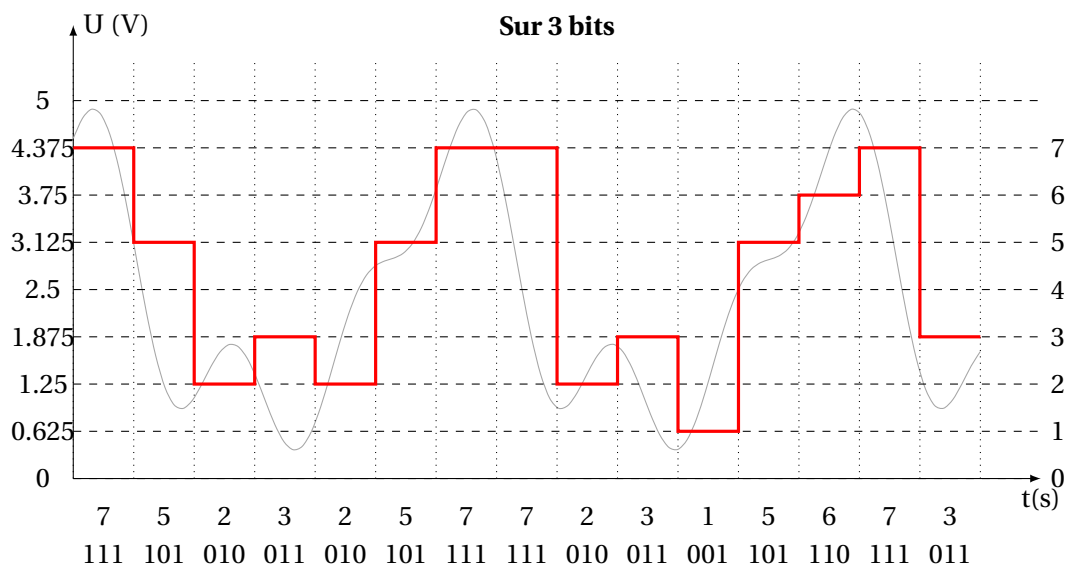


FIGURE 7.9 – Le même signal mais quantifié sur 3 bits.

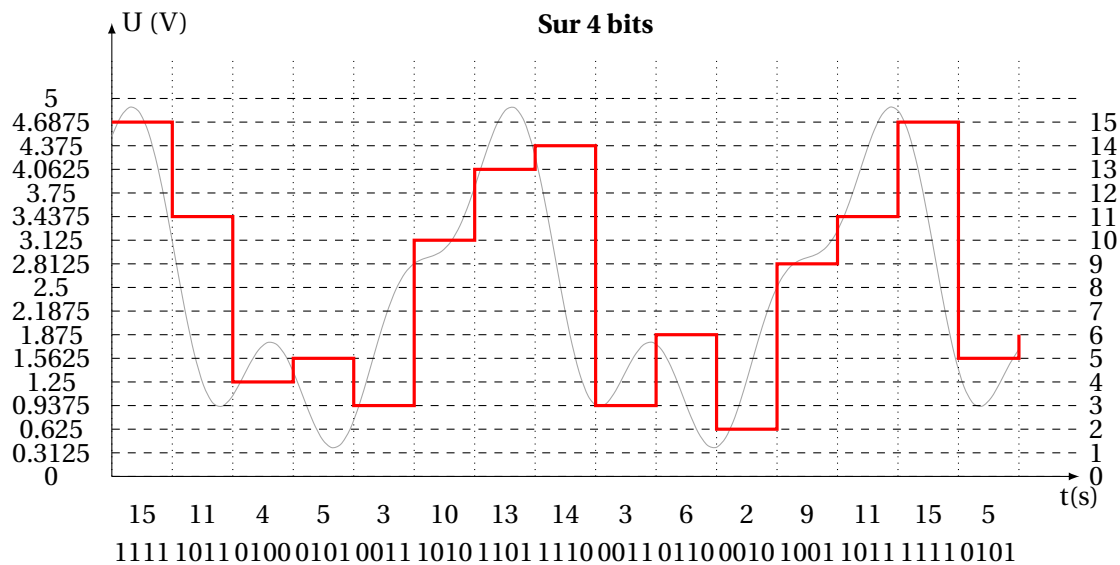


FIGURE 7.10 – Le même signal mais quantifié sur 4 bits.

Même si le signal rouge s'approche un peu du signal réel, la ressemblance n'est tout de même pas frappante. **Pour progresser encore, il faut augmenter la fréquence d'échantillonnage et diminuer le pas.**

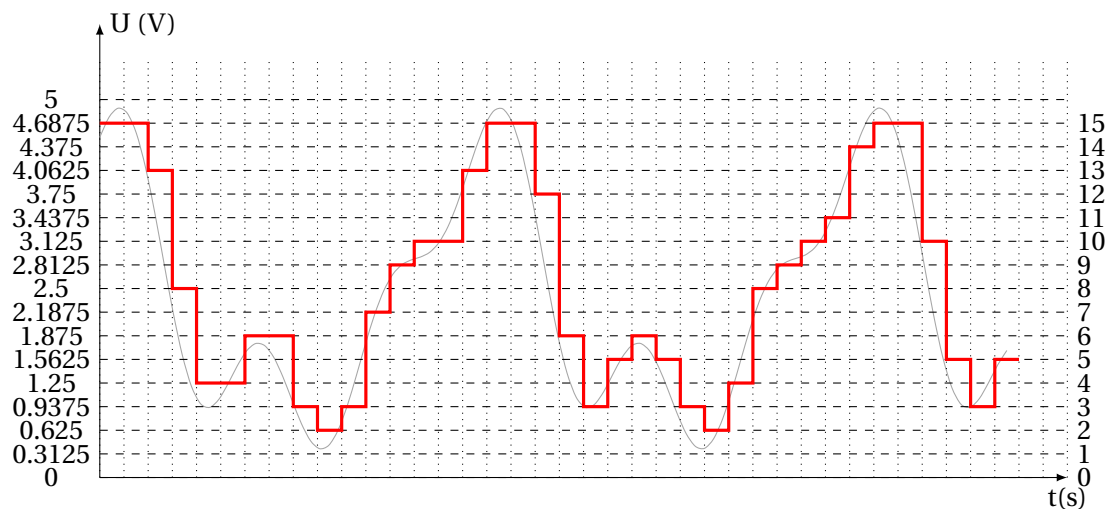


FIGURE 7.11 – Le même signal mais quantifié sur 4 bits et avec une fréquence d'échantillonnage plus grande.

Je vous laisse vérifier que le codage est bien :

111111111101100001000100011001100011001000110111100110101010110111111111110001100011010101100101
0011001001001000100110101011111011111111111010010100110101

Finalement, le signal pourrait ressembler à :

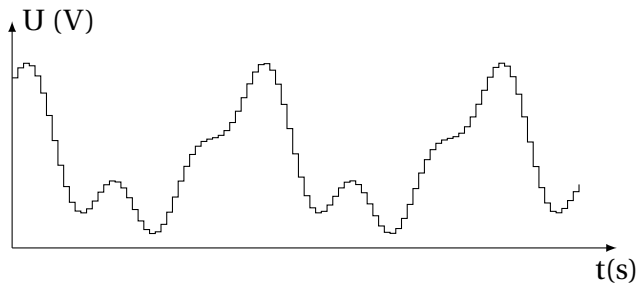


FIGURE 7.12 – Augmentation de la fréquence d'échantillonnage et diminution du pas.

puis à

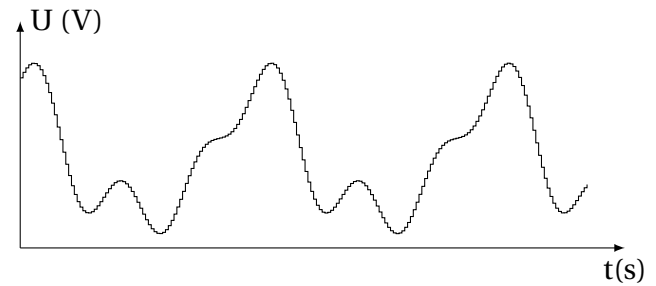


FIGURE 7.13 – Dernière augmentation de la fréquence d'échantillonnage et diminution du pas.

Propriété 7.3: Fidélité du signal numérique

Plus la **fréquence d'échantillonnage est élevée** et plus le pas de quantification est faible (nombre de bits important), plus la **restitution du son est fidèle** à l'original.

Qu'en est-il aujourd'hui?

Les ordinateurs actuels codent les informations sur 64 voire 128 bits, c'est à dire une suite de 64 ou 128 zéros ou uns par échantillon et à des fréquences avoisinant le MHz.

7.3 Compression.

7.3.1 Taille d'un fichier audio.

Imaginons une chanson de 3 minutes, enregistrée en stéréo, quantifiée en 16 bits et échantillonnée en 44,1 kHz. Quel est, en Mo, le "poids" de cette chanson?

- la fréquence f_e d'échantillonnage indique le nombre d'échantillons prélevés chaque seconde : ici, 44100 échantillons chaque seconde
- la durée Δt de la chanson doit être exprimée en seconde
- la quantification Q est exprimée en bits (qu'il faut diviser par 8 pour obtenir le nombre d'octets).
- enfin, il faut tenir compte du nombre de canaux : 2 pour la stéréo

Ainsi :

$$N = f_e \times \frac{Q}{8} \times n \times \Delta t$$

Diagram illustrating the formula for file size (N) in octets:

- f_e : Fréquence d'échantillonnage (Hz)
- Q : Quantification (bits)
- n : Nombre de canaux (sans)
- Δt : Durée (s)
- N : Taille du fichier (octet)

(7.2)

Et pour notre chanson?

$$N = 44100 \times \frac{16}{8} \times 2 \times 180 \approx 32 \text{ Mo}$$

Même si aujourd'hui, les capacités de stockage sont décuplées, il reste encore intéressant d'alléger les fichiers.

7.3.2 Compression sans perte ou par répétition.

Imaginons un La 440 produit pendant un dixième de seconde. Cela représente tout de même 44 périodes identiques à répéter, ce qui prend de la place pour rien. L'idée est donc de ne conserver qu'une seule période et de mémoriser qu'il faut la répéter 44 fois, ce qui consomme un peu de mémoire mais moins que 44 périodes.

Ce qui peut se résumer par :



FIGURE 7.14 – Illustration du principe de compression par répétition

7.3.3 Compression avec perte.

Cette compression est basée sur deux principes :

- réduction de la bande passante : l'oreille humaine est sensible à des fréquences s'étalant de 20 Hz à 20 kHz. Dans un premier temps, les fréquences auxquelles l'oreille est moins sensible sont éliminées (basses et hautes fréquences), ce qui libère de la place mais modifie plus ou moins le son selon "l'élagage".
- Deux fréquences à la suite l'une de l'autre et relativement proches sont assimilées à une seule pour ensuite appliquer la méthode par répétition.

7.3.4 Taux de compression.

On définit le taux de compression par :

$$(\text{sans unité}) \longrightarrow \tau = \frac{\text{taille après compression}}{\text{taille avant compression}}$$

(Mo) (Mo)

7.3.5 Exemples de formats de compression.

	Original	Compressions			
Format	WAV	MP3 (320)	MP3 (56)	FLAC	WMA
Durée	59 s	59 s	59 s	59 s	59 s
Taille	10,4 Mo	2,36 Mo	413 ko	2,36 Mo	690 ko
Taux	1	0,23	0,04	0,23	0,07

TABLE 7.2 – Exemples de formats de compression

7.4 Préparation au DS

7.4.1 Savoirs et savoir-faire

Je dois savoir :	OK	À revoir
Pour numériser un son, on procède à la discrétisation du signal analogique sonore (échantillonnage et quantification).	☐	☐
Plus la fréquence d'échantillonnage est élevée et la quantification est fine, plus la numérisation est fidèle, mais plus la taille du fichier audio est grande.	☐	☐
La compression consiste à diminuer la taille d'un fichier afin de faciliter son stockage et sa transmission.	☐	☐
Les techniques de compression spécifiques au son, dites « avec perte d'information », éliminent les informations sonores auxquelles l'oreille est peu sensible.	☐	☐
Une quantité énorme d'informations audio (et vidéo) est échangée, ce qui entraîne un développement important des capacités de stockage.	☐	☐
Je dois pouvoir :	OK	À revoir
Justifier le choix des paramètres de numérisation d'un son.	☐	☐
Estimer la taille d'un fichier audio.	☐	☐
Calculer un taux de compression.	☐	☐
Comparer des caractéristiques de fichiers audio compressés.	☐	☐
Discuter de la problématique des échanges de fichiers numériques audio, mais aussi vidéo d'un point de vue énergétique.	☐	☐
Capacités mathématiques :		
Grandeurs et mesures, puissances de 2.	☐	☐
Proportions, pourcentages.	☐	☐

FLASHCARD 1 Qu'est-ce qu'un signal ? CHAPITRE 7	FLASHCARD 2 Qu'est-ce qu'un signal analogique ? CHAPITRE 7	FLASHCARD 3 Qu'est-ce qu'un signal numérique ? CHAPITRE 7	FLASHCARD 4 Pourquoi numériser un signal ? CHAPITRE 7
FLASHCARD 5 Quelles sont les étapes de la numérisation d'un signal ? CHAPITRE 7	FLASHCARD 6 Qu'est-ce que l'échantillonnage ? CHAPITRE 7	FLASHCARD 7 Qu'est-ce que la fréquence d'échantillonnage ? CHAPITRE 7	FLASHCARD 8 Qu'est-ce que la quantification ? CHAPITRE 7
FLASHCARD 9 Qu'est-ce que le codage d'un signal numérique ? CHAPITRE 7	FLASHCARD 10 Quel est l'impact de la fréquence d'échantillonnage sur la qualité sonore ? CHAPITRE 7	FLASHCARD 11 Qu'est-ce que la compression d'un fichier audio ? CHAPITRE 7	FLASHCARD 12 Quelles sont les deux grandes catégories de compression audio ? CHAPITRE 7
FLASHCARD 13 Quelle est la différence entre compression avec et sans perte ? CHAPITRE 7	FLASHCARD 14 Quels sont des exemples de formats de compression avec perte ? CHAPITRE 7	FLASHCARD 15 Quels sont des exemples de formats de compression sans perte ? CHAPITRE 7	FLASHCARD 16 Comment calcule-t-on le taux de compression ? CHAPITRE 7

Pour stocker, traiter et transmettre les informations de manière fiable.	Un signal numérique est une suite discrète de valeurs (0 et 1), obtenue par échantillonnage d'un signal analogique.	Un signal analogique est un signal continu au cours du temps.	Un signal est toute grandeur physique mesurée au cours du temps (ex. tension, température, intensité sonore).
La quantification consiste à associer chaque échantillon à une valeur discrète parmi un nombre limité de niveaux.	Le nombre de prélèvements effectués par seconde, exprimé en Hertz (Hz).	L'échantillonnage consiste à prélever des valeurs du signal à intervalles réguliers.	Échantillonnage, quantification et codage.
Compression avec perte et compression sans perte.	C'est une technique permettant de réduire la taille d'un fichier audio pour faciliter son stockage et sa transmission.	Une fréquence plus élevée permet une meilleure fidélité, mais augmente la taille du fichier.	Il s'agit d'associer à chaque valeur quantifiée une séquence de bits (0 et 1).
Taux de compression = taille après compression / taille avant compression.	FLAC, WAV, ALAC.	MP3, AAC, WMA.	La compression avec perte élimine des informations jugées inutiles, tandis que la compression sans perte préserve intégralement les données.

Grandeurs physiques, unités et conversions

◀ Histoire des sciences

🎧 Les unités de mesure



🎧 Système d'unités : une réforme sur mesures



A.1 Unités de base du Système International S.I.

Grandeur	Symbole de la grandeur	Unité S.I.	Symbole associé à l'unité
Masse	m	kilogramme	kg
Temps	t	seconde	s
Longueur	$l, x, r...$	mètre	m
Température	T	kelvin	K
Intensité électrique	I, i	ampère	A
Quantité de matière	n	mole	mol
Intensité lumineuse	I_V	candela	cd

A.2 Préfixe des unités

Préfixe	Tetra	Giga	Mega	kilo	hecto	deca	-	deci	centi	milli	micro	nano	pico	femto
Symbole	T	G	M	k	h	da	-	d	c	m	μ	n	p	f
Facteur de conversion	10^{12}	10^9	10^6	10^3	10^2	10^1	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}

A.2.1 Exemples de tableaux de conversion

km	hm	dam	m	dm	cm	mm

kg	hg	dag	g	dg	cg	mg

ks	hs	das	s	ds	cs	ms

Pour passer d’une colonne à une autre on multiplie ou on divise par 10.

A.2.2 Cas des aires

km ²	hm ²	dam ²	m ²	dm ²	cm ²	mm ²

Pour passer d’une colonne à une autre on multiplie ou on divise par 100, ou alors par 10 dans le cas des sous-colonnes.

A.2.3 Cas des volumes et contenances

km ³			hm ³			dam ³			m ³			dm ³			cm ³			mm ³		
										kL	hL	daL	L	dL	cL	mL				

Pour passer d’une colonne à une autre on multiplie ou on divise par 1000, ou alors par 10 dans le cas des sous-colonnes. Retenir que :
 $1\text{ L} = 1\text{ dm}^3$

,

Méthode des 5C : résoudre un problème de PC

	Étapes	Exemple
Je C herche	On lit attentivement tout le texte. On surligne les données du texte. On trouve dans l'énoncé ce que l'on doit chercher.	Un coureur court 30 minutes à la vitesse de 6 km/h. Quelle distance a-t-il parcourue?
	On écrit ce qu'on recherche en remplaçant la grandeur par la lettre.	On cherche la distance d parcourue par le coureur pendant 30 minutes à la vitesse de 6 km/h.
Je C onnais	On indique ce qu'on sait en remplaçant les grandeurs par les lettres correspondantes et on indique la valeur avec son unité.	On sait que : $\Delta t = 30 \text{ min}$ et $v = 6 \text{ km/h}$
Je C alcul	Si possible, on écrit le nom de la loi ou propriété utilisée. Puis, on écrit la relation mathématique littérale permettant de calculer la grandeur recherchée. On indique les unités.	On utilise la relation suivante : $v = \frac{d}{\Delta t}$
	Si besoin, on isole l'inconnue devant le calcul littéral.	On en déduit que : $\frac{d}{\Delta t} = v$ puis $\frac{d}{\cancel{\Delta t}} \times \cancel{\Delta t} = v \times \Delta t$ et finalement $d = v \times \Delta t$
Je C onvertis	On convertit si les unités des données ne conviennent pas.	On convertit : $d = v \times \Delta t = 6 \text{ km/h} \times 30 \text{ min} = \frac{6 \text{ km}}{1 \text{ h}} \times 30 \text{ min} = \frac{6 \text{ km}}{60 \text{ min}} \times 30 \text{ min}$
	On fait l'application numérique. On encadre le résultat.	On calcule : $d = 3 \text{ km}$
Je C onclus	On fait une phrase de conclusion où on indique l'unité.	On en conclut que le coureur parcourt 3 km pendant ses 30 minutes de course à 6 km/h.

TABLE B.1 – Méthode des 5C

Tableau périodique des éléments

