

1	OBSERVER	4
1.1	ONDES ET PARTICULES	4
1.1.1	Rayonnements dans l'Univers	4
1.1.2	Les ondes dans la matière	5
1.1.3	Détecteurs d'ondes	6
1.2	CARACTERISTIQUES ET PROPRIETES DES ONDES	6
1.2.1	Caractéristiques des ondes	6
1.2.1.1	Onde progressive	6
1.2.1.2	Onde progressive périodique	6
1.2.1.3	Onde sinusoïdale	8
1.2.1.4	Ondes sonores et ultrasonores	8
1.2.1.5	Analyse spectrale	8
1.2.1.6	Hauteur d'un son	9
1.2.1.7	Timbre d'un son	9
1.2.2	Propriétés des ondes	10
1.2.2.1	La diffraction	10
1.2.2.2	Importance du phénomène de diffraction	10
1.2.2.3	Interférences lumineuses	11
1.2.2.4	Effet Doppler	12
1.3	SPECTROSCOPIE	13
1.3.1	Spectroscopie UV-visible	13
1.3.2	Spectroscopie infrarouge (IR)	14
1.3.2.1	Groupes caractéristiques	14
1.3.2.2	Nomenclature des groupes caractéristiques	15
1.3.2.3	Détermination de groupes caractéristiques	15
1.3.2.4	Mise en évidence de la liaison hydrogène	16
1.3.3	Spectres RMN du proton	17
2	COMPRENDRE	19
2.1	TEMPS, MOUVEMENT ET EVOLUTION	19
2.1.1	Temps, cinématique et dynamique newtoniennes	19
2.1.1.1	Le vecteur vitesse	19
2.1.1.2	Le vecteur accélération	20
2.1.1.3	Quelques mouvements à connaître	20
2.1.1.4	Référentiel galiléen	22
2.1.1.5	Lois de Newton	22
2.1.1.6	Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme	23
2.1.1.7	Mouvement dans un champ électrostatique uniforme	24
2.1.1.8	Conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé	25
2.1.1.9	Mouvement d'un satellite	26
2.1.1.10	Les lois de Kepler	26
2.1.2	Mesure du temps et oscillateur, amortissement	27
2.1.2.1	Travail d'une force constante	27
2.1.2.2	Le travail : un mode de transfert de l'énergie	28
2.1.2.3	Les oscillateurs	28
2.1.2.4	Mesure du temps et définition de la seconde	30
2.1.3	Temps et relativité restreinte	30
2.1.3.1	Invariance de la vitesse de la lumière et caractère relatif du temps	30
2.1.3.2	Temps propre et temps mesuré	31
2.1.3.3	Dilatation des durées	32
2.1.4	Temps et évolution chimique : cinétique et catalyse	32
2.1.4.1	Evolution de la quantité de matière au cours du temps	32
2.1.4.2	Facteurs cinétiques	33
2.1.4.3	Temps de demi-réaction	33
2.1.4.4	Catalyse homogène, hétérogène et enzymatique	34
2.2	STRUCTURE ET TRANSFORMATION DE LA MATIERE	35
2.2.1	Représentation spatiale des molécules	35
2.2.1.1	La représentation de Cram	35
2.2.1.2	La chiralité	35
2.2.1.3	Carbone asymétrique	36
2.2.1.4	Les acides α -aminés	36
2.2.1.5	Enantiomères, mélange racémique, diastéréoisomères	36
2.2.1.6	Conformation	38
2.2.1.7	Formule topologique des molécules organiques	38
2.2.1.8	Propriétés biologiques et stéréoisomérisation	39
2.2.2	Transformation en chimie organique	39
2.2.2.1	Modifications de chaîne	39
2.2.2.2	Modification de groupe caractéristique	39
2.2.2.3	Aspect microscopique d'une modification de groupe caractéristique	40

2.2.3	<i>Réaction chimique par échange de proton</i>	42
2.2.3.1	L'ion oxonium.....	42
2.2.3.2	Définition du pH.....	42
2.2.3.3	Mesure du pH d'une solution.....	42
2.2.3.4	Acides et bases.....	43
2.2.3.5	Couple acide / base.....	43
2.2.3.6	Notion d'équilibre.....	43
2.2.3.7	Interprétation à l'échelle microscopique de l'état d'équilibre.....	44
2.2.3.8	Acides forts et faibles, bases fortes et faibles.....	44
2.2.3.9	Constante d'acidité K_a	44
2.2.3.10	Acides forts, bases fortes.....	45
2.2.3.11	Autoprotolyse de l'eau.....	45
2.2.3.12	Interprétation à l'échelle microscopique de l'autoprotolyse de l'eau.....	45
2.2.3.13	Produit ionique de l'eau.....	45
2.2.3.14	Echelle des pK_a dans l'eau.....	46
2.2.3.15	Domaines de prédominance.....	46
2.2.3.16	Domaines de prédominance pour un acide α -aminé.....	46
2.2.3.17	Réaction entre un acide fort et une base forte.....	47
2.2.3.18	pH d'une solution aqueuse d'acide fort ou de base forte.....	47
2.2.3.19	Solution tampon.....	47
2.3	ENERGIE, MATIERE ET RAYONNEMENT.....	47
2.3.1	<i>Du macroscopique au microscopique</i>	47
2.3.2	<i>Transferts d'énergie entre systèmes macroscopiques</i>	48
2.3.2.1	Energie cinétique microscopique.....	48
2.3.2.2	Changement d'état.....	48
2.3.2.3	Energie interne.....	48
2.3.2.4	Transfert thermique.....	48
2.3.2.5	Capacité thermique.....	49
2.3.2.6	Flux thermique.....	49
2.3.2.7	Résistance thermique d'une paroi plane.....	49
2.3.2.8	Notion d'irréversibilité.....	49
2.3.2.9	Bilans d'énergie.....	50
2.3.3	<i>Transferts quantiques d'énergie</i>	50
2.3.3.1	Energie d'un photon.....	50
2.3.3.2	Transitions d'énergie électronique et vibratoire.....	50
2.3.3.3	Emission et absorption d'énergie par les atomes.....	51
2.3.3.4	Amplification d'une onde lumineuse.....	52
2.3.3.5	Propriétés du laser.....	52
2.3.4	<i>Dualité onde-particule</i>	53
2.3.4.1	Effet photoélectrique.....	53
2.3.4.2	Diffraction de la lumière.....	53
2.3.4.3	Aspects ondulatoire et particulaire.....	54
2.3.4.4	Interférences photon par photon.....	54
2.3.4.5	Relation de de Broglie.....	54
2.3.4.6	Particule matérielle et onde de matière.....	55
3	AGIR	56
3.1	ECONOMISER LES RESSOURCES ET RESPECTER L'ENVIRONNEMENT.....	56
3.1.1	<i>Enjeux énergétiques</i>	56
3.1.1.1	Chaîne énergétique.....	56
3.1.1.2	Notion de rendement de conversion.....	56
3.1.2	<i>Apport de la chimie au respect de l'environnement</i>	57
3.1.2.1	La chimie durable.....	57
3.1.2.2	La valorisation du dioxyde de carbone.....	57
3.1.3	<i>Contrôle de la qualité par dosage</i>	58
3.1.3.1	Dosage de solutions par étalonnage.....	58
3.1.3.2	Dosages par titrage direct.....	60
3.2	SYNTHETISER DES MOLECULES, FABRIQUER DE NOUVEAUX MATERIAUX.....	64
3.2.1	<i>Stratégie de la synthèse organique</i>	64
3.2.2	<i>Sélectivité en chimie organique</i>	66
3.2.2.1	Composé polyfonctionnel.....	66
3.2.2.2	Réactif chimiosélectif.....	66
3.2.2.3	Protection de fonctions.....	67
3.3	TRANSMETTRE ET STOCKER DE L'INFORMATION.....	67
3.3.1	<i>Chaîne de transmission d'informations</i>	67
3.3.2	<i>Images numériques</i>	68
3.3.2.1	Pixellisation.....	68
3.3.2.2	Codage RVB.....	68
3.3.2.3	Niveaux de gris.....	68
3.3.3	<i>Signal analogique et signal numérique</i>	69

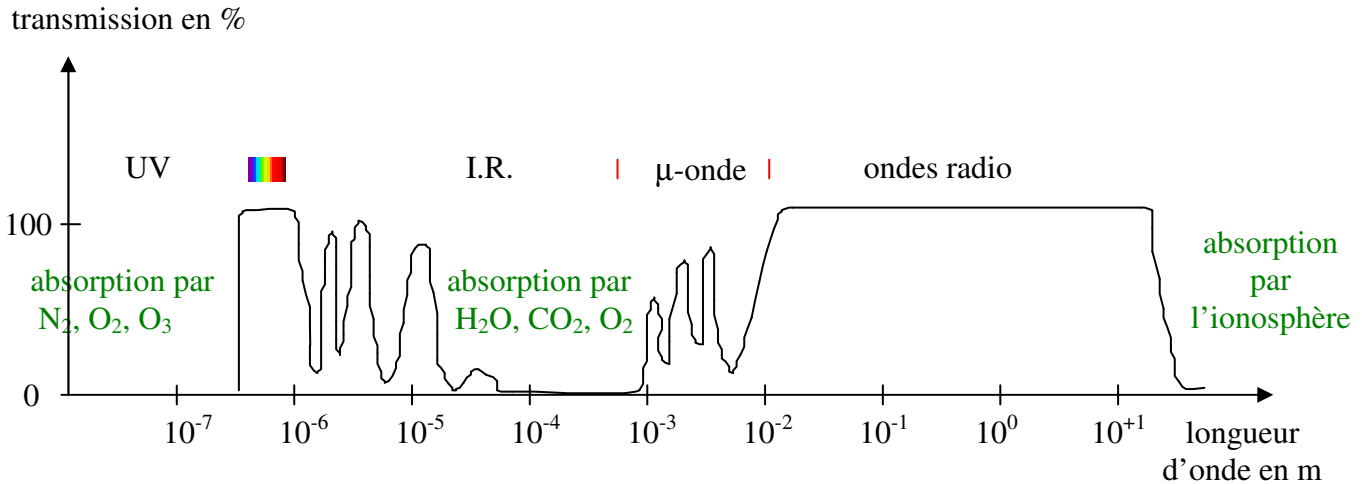
3.3.3.1	Conversion d'un signal analogique en signal numérique.....	69
3.3.3.2	Procédés physiques de transmission	69
3.3.3.3	Stockage optique.....	70
3.4	NOTATIONS, UNITES ET VALEURS EN CHIMIE.....	72
3.5	NOTATIONS, UNITES ET VALEURS EN PHYSIQUE	72

1 Observer

1.1 Ondes et particules

1.1.1 Rayonnements dans l'Univers

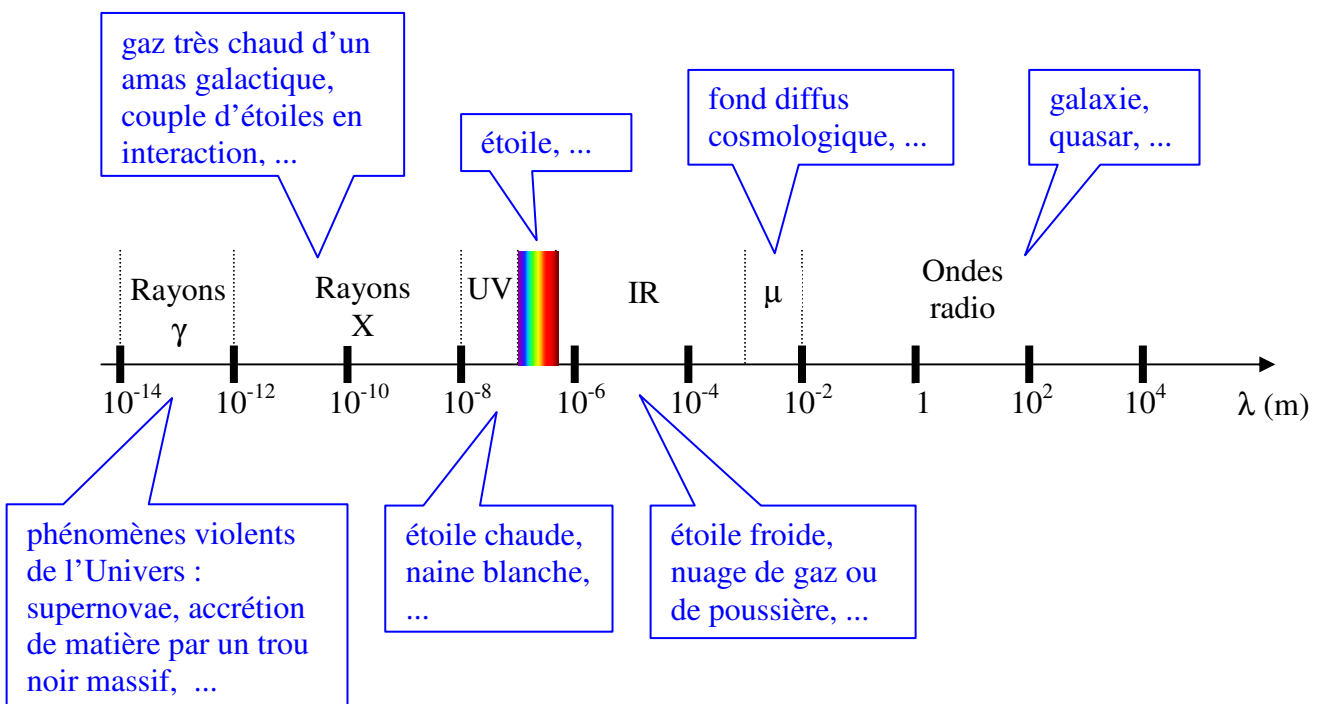
Transmission et absorption des rayonnements électromagnétiques par l'atmosphère terrestre :



Les longueurs d'onde pour lesquelles le rayonnement électromagnétique est peu ou pas absorbé par l'atmosphère terrestre constituent ce que l'on appelle les fenêtres de transmission atmosphériques.

Exemple les principales fenêtres de transmission atmosphériques sont : le visible et les ondes radio (appelées aussi ondes hertziennes).

Ce phénomène restreint les possibilités d'observation depuis le sol des sources de rayonnement dans l'Univers :



Remarque certaines sources (comme les phénomènes violents de l'Univers) émettent dans tout le spectre électromagnétique.

1.1.2 Les ondes dans la matière

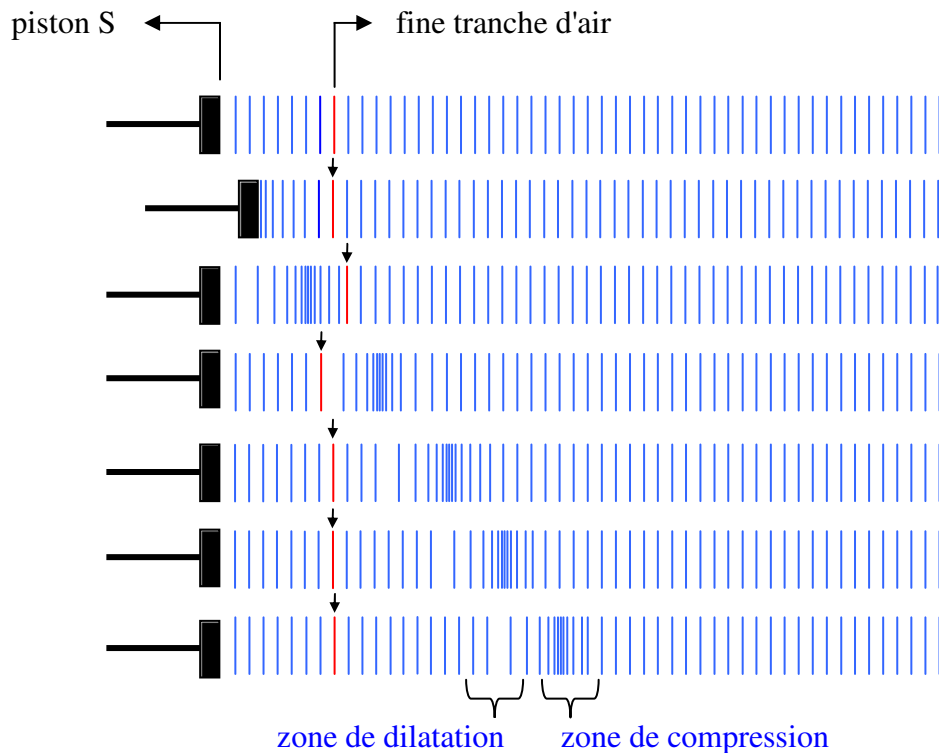
Contrairement aux ondes électromagnétiques, qui peuvent se propager dans le vide, les ondes mécaniques se propagent uniquement dans la matière. Ces ondes mécaniques ne transportent pas de matière mais elles transportent de l'énergie qui peut avoir des effets importants :

- houle : la surface de la mer s'abaisse et s'élève alternativement. Par sa hauteur, la mer peut submerger les terres. L'énergie de la houle peut détruire des digues.
- ondes sismiques : au départ, un séisme va déplacer de la matière du sol, qui va déplacer la matière voisine avant de reprendre sa place. Le phénomène se propage de proche en proche.

La magnitude d'un tremblement de terre mesure l'énergie libérée au foyer d'un séisme (zone à l'intérieur de l'écorce terrestre où se produit le déplacement initial).

Magnitude	Effets
moins de 2,0	non ressenti
5,0 à 5,9	dommages légers aux édifices bien construits
9,0 et plus	zones de plusieurs milliers de km de circonférence dévastées

- ondes sonores : les molécules d'air sont momentanément déplacées. L'air étant compressible, il y a donc des couches d'air successivement comprimées puis dilatées.



Pour que l'oreille perçoive un son dans le domaine audible, l'intensité sonore « I » doit être telle que :

$$10^{-12} \text{ W / m}^2 < I < (1 \text{ à } 100) \text{ W / m}^2$$

où $I_0 = 10^{-12} \text{ W / m}^2$ (l'intensité de référence) est considéré comme la limite de sensibilité de l'oreille. La borne supérieure de l'intensité sonore (1 à 100 W / m²) correspond à une destruction de l'oreille.

Le niveau sonore L est lié à l'intensité sonore I par une échelle logarithmique :

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

Cette notion, appropriée à l'oreille humaine, quantifie la sensation sonore : lorsque l'intensité sonore est multipliée par 2, le niveau sonore est augmenté de 3 dB_A.

La valeur de 90 dB_A est considérée comme le seuil de danger. Une exposition prolongée à des niveaux sonores supérieurs entraîne des dégradations irréversibles de l'audition.

1.1.3 Détecteurs d'ondes

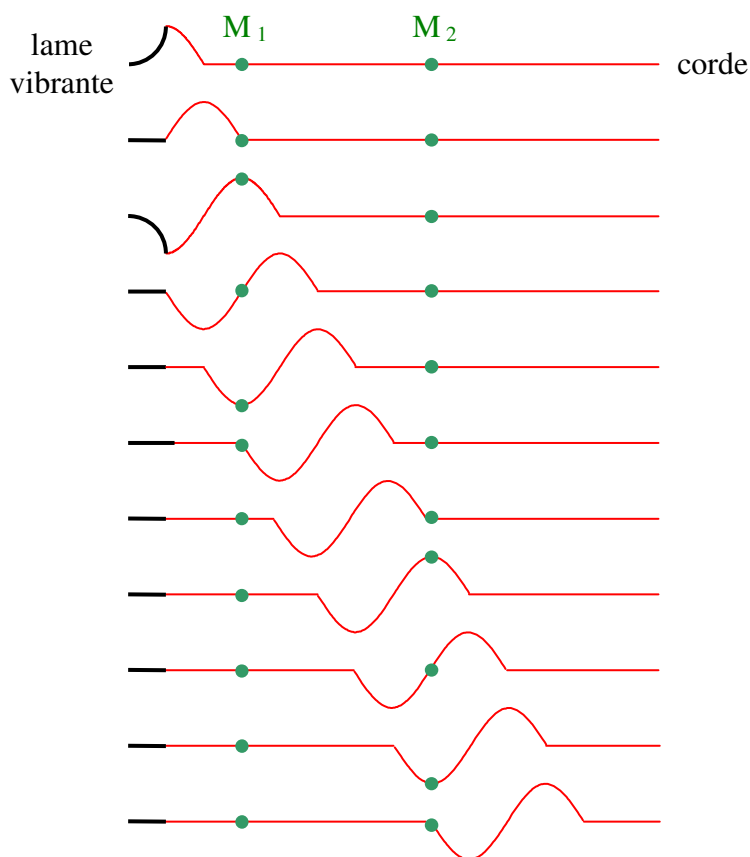
1.2 Caractéristiques et propriétés des ondes

1.2.1 Caractéristiques des ondes

1.2.1.1 Onde progressive

Le phénomène de propagation d'une perturbation depuis sa source dans un milieu est appelé « onde progressive ». Après réflexion sur un obstacle, cette onde peut se propager dans le sens inverse et l'onde est alors « régressive ».

Exemple d'onde progressive



La perturbation observée au point M₁ à l'instant t₁ arrive au point M₂ à l'instant t₂ = t₁ + τ avec :

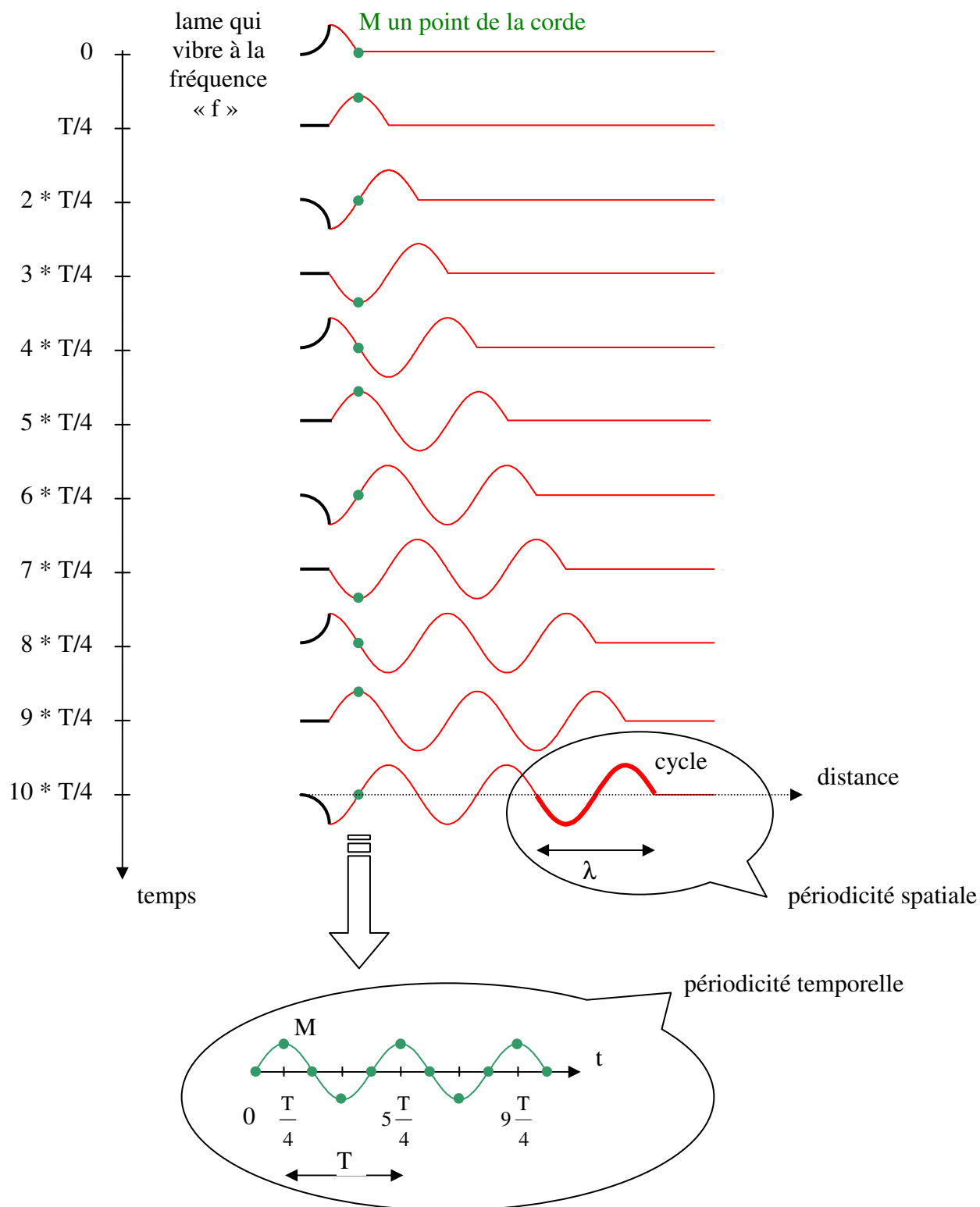
$$\tau = \frac{M_1 M_2}{v}$$

où « τ » est le retard entre deux points et « v » la vitesse de l'onde (pour les milieux non dispersifs).

1.2.1.2 Onde progressive périodique

Si la perturbation est produite périodiquement, on parle d'onde progressive périodique.

Exemple d'onde progressive périodique



La propriété essentielle de cette onde est sa double périodicité (spatiale et temporelle). Si on nomme « s » la grandeur physique qui se propage, à une distance « d » de la source on a :

$$s(d, t) = s(d, t + T) = s(d + \lambda, t)$$

où « T » est la période et « λ » la longueur d'onde.

Pour cette onde, vitesse « v », fréquence « f », période « T », et longueur d'onde « λ » sont liés par les relations :

$$\lambda = v * T = \frac{v}{f}$$

La 1ère relation montre que la longueur d'onde est la distance parcourue par l'onde durant une période.

1.2.1.3 Onde sinusoïdale

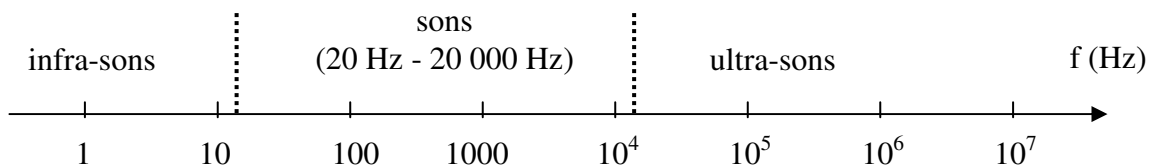
Si l'onde progressive périodique est sinusoïdale, l'évolution (en un point) de la grandeur physique qui se propage prend la forme explicite :

$$s(t) = S * \sin(2 * \pi * f * t + \phi)$$

où « S » est l'amplitude, « ϕ » la phase en ce point et « f » la fréquence.

1.2.1.4 Ondes sonores et ultrasonores

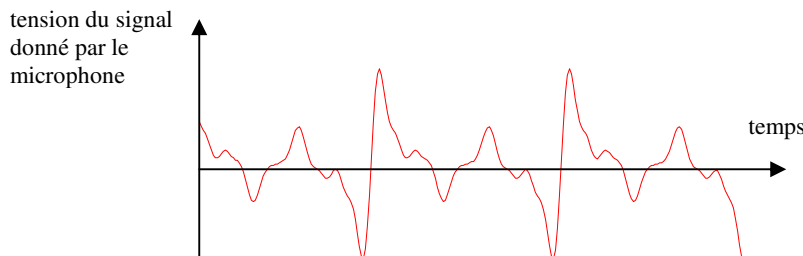
Les ondes sonores et ultrasonores se distinguent par leur fréquence :



1.2.1.5 Analyse spectrale

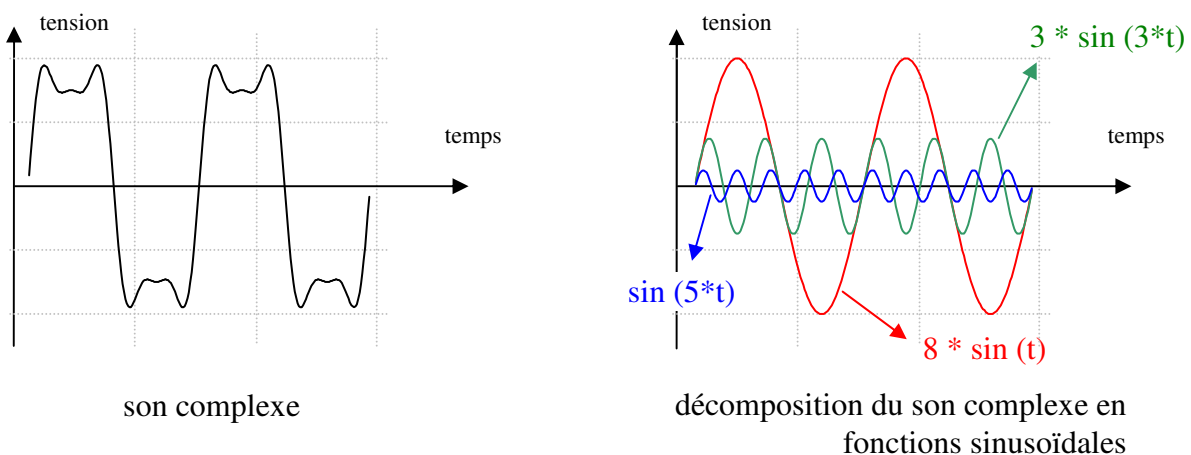
Les vibrations d'un instrument de musique produisent un son périodique complexe.

Exemple son d'une trompette :



Le mathématicien Joseph Fourier a montré que toute fonction périodique de fréquence « f » peut-être décomposée en une somme de fonctions sinusoïdales de fréquences f, 2f, 3f, ... (son spectre).

Exemple décomposition d'un son complexe en une somme de fonctions sinusoïdales :



Un son pur (comme celui émis par un diapason) correspond à une onde sinusoïdale et son spectre ne possède pas d'harmonique

1.2.1.6 Hauteur d'un son

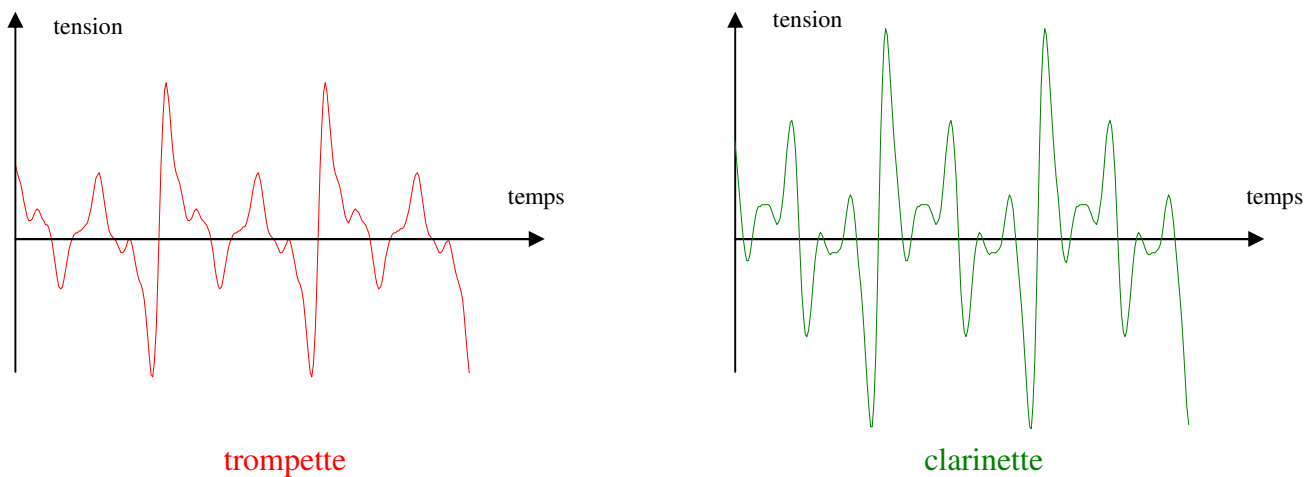
On note « f_0 » la fréquence du son complexe (on la nomme la fréquence fondamentale). Les fonctions sinusoïdales pour lesquelles la fréquence est un multiple de f_0 ($f_k = k * f_0$) sont nommées les harmoniques.

La hauteur d'un son musical dépend de sa fréquence fondamentale. Elle est la qualité qui distingue un son aigu d'un son grave.

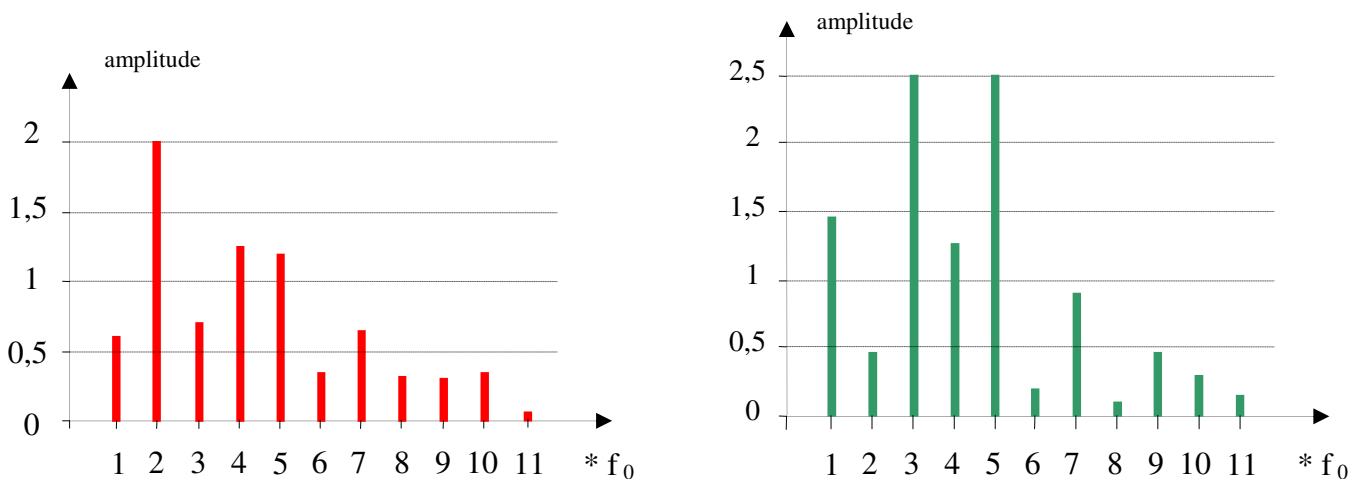
1.2.1.7 Timbre d'un son

Deux sons de même hauteur émis par deux instruments de musique différents sont perçus différemment par l'oreille. Ils se différencient par leur timbre.

Exemple sons de même hauteur émis par une trompette et une clarinette :



Exemple spectre des fréquences des sons complexes ci-dessus obtenu par décomposition en somme de fonctions sinusoïdales (décomposition de Fourier)

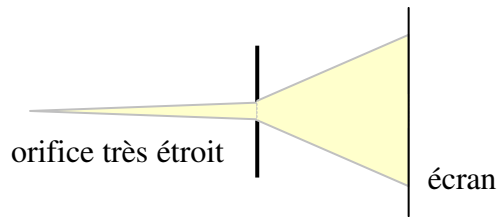


La fréquence et l'amplitude de chaque harmonique contribue au timbre d'un son musical.

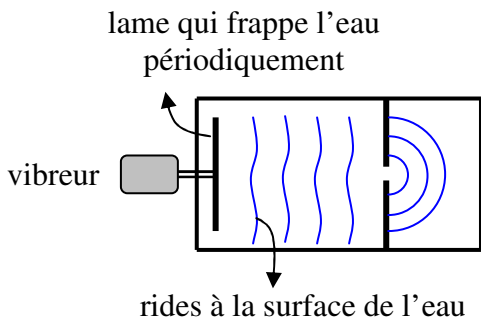
1.2.2 Propriétés des ondes

1.2.2.1 La diffraction

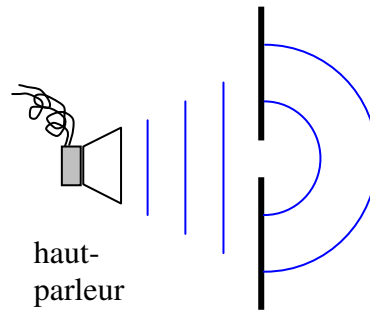
Si on diminue l'ouverture d'un diaphragme qui limite un pinceau de rayons lumineux, tout se passe comme si la très petite ouverture devenait elle-même une source ponctuelle. On dit que la lumière se diffracte :



L'expérience montre que le phénomène de diffraction concerne toutes les ondes (mécaniques, sonores, lumineuses, ...) :



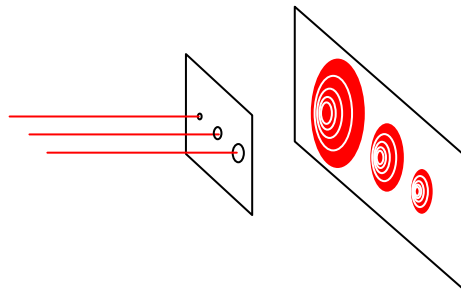
diffraction d'une onde mécanique



diffraction d'une onde sonore

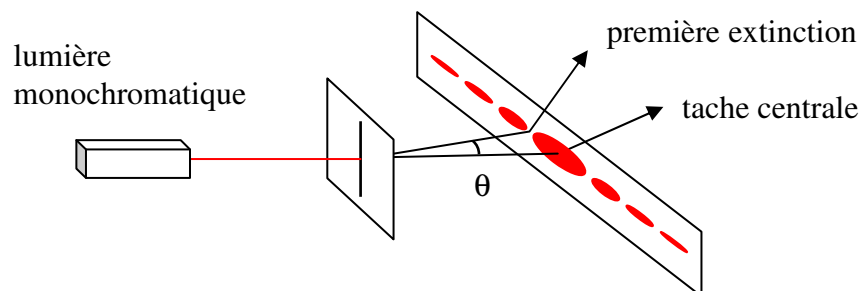
1.2.2.2 Importance du phénomène de diffraction

L'importance du phénomène de diffraction est liée à la dimension de l'ouverture ou de l'obstacle et à la longueur d'onde :



Dans le cas d'une fente ou d'un fil rectiligne de largeur « a », l'écart angulaire entre le milieu de la tache centrale et la première extinction du faisceau diffracté est donné par :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$



Avec de la lumière blanche (lumière polychromatique), chaque radiation de longueur d'onde différente donne sa propre figure de diffraction. La superposition de ces figures conduit à l'observation de zones colorées :

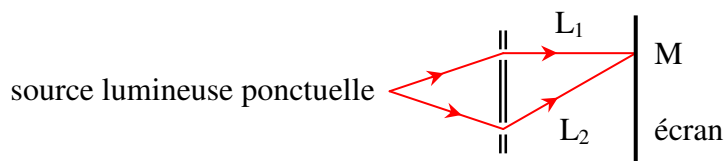


crédit image :
<http://physicus.free.fr>

1.2.2.3 Interférences lumineuses

Il y a interférence là où deux ondes « se rencontrent » et si les sources ont mêmes fréquences (sources cohérentes). Aucun phénomène remarquable ne peut être obtenu avec des sources incohérentes.

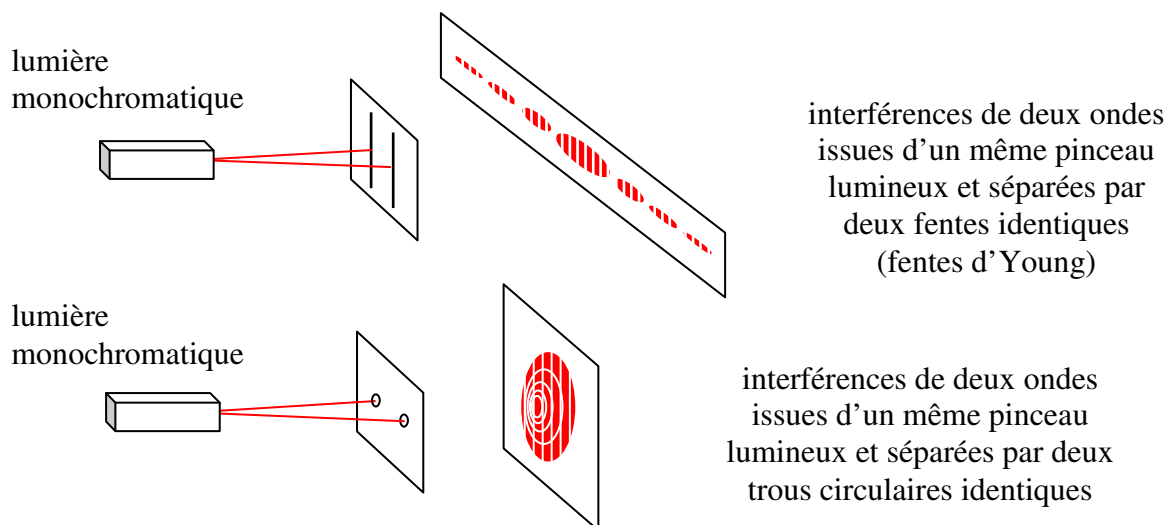
Il est difficile d'obtenir deux sources cohérentes. La méthode la plus utilisée (la seule pensée historiquement) consiste à utiliser deux faisceaux issus d'une même source ponctuelle :



L'onde lumineuse en M est la somme de deux ondes lumineuses cohérentes ayant parcouru des trajets de longueur différente (L_1 et L_2). L'onde ayant parcouru la plus grande distance est en retard par rapport à l'autre. Suivant la position du point M sur l'écran, ce retard varie :

- 1^{er} cas remarquable : il y a superposition constructive des deux ondes. Leurs amplitudes s'ajoutent, ce qui correspond à un point très lumineux. La différence de marche $\delta = L_2 - L_1$ est un multiple entier relatif de la longueur d'onde : $\delta = k * \lambda$.
- 2^{ème} cas remarquable : il y a superposition destructive des deux ondes. Leurs amplitudes s'annulent, ce qui correspond à un point sombre. La différence de marche « δ » est telle que : $\delta = (k + 1/2) * \lambda$.

C'est pourquoi on observe des franges alternativement brillantes et sombres sur des figures d'interférence comme ci-dessous :



Avec de la lumière blanche (lumière polychromatique), chaque radiation de longueur d'onde différente donne sa propre figure d'interférence. La superposition de ces figures conduit à l'observation de zones colorées :



crédit photo : <http://hal-sfo.ccsd.cnrs.fr>

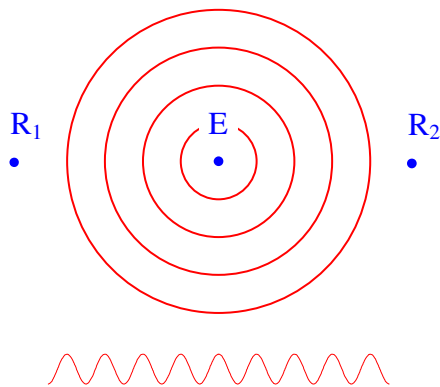
1.2.2.4 Effet Doppler

L'effet Doppler désigne un décalage de fréquence d'une onde.

Exemple un observateur immobile le long d'une voie ferrée perçoit un son aigu quand un train approche et plus grave lorsque ce train s'éloigne.

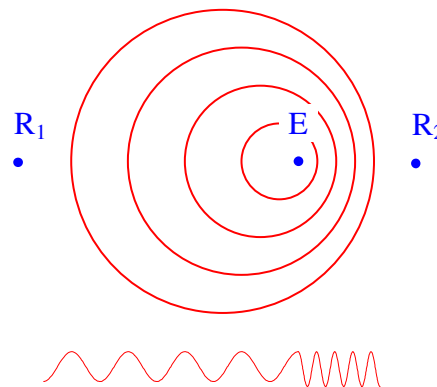
Illustration de ce phénomène pour une source sonore immobile et une source sonore en mouvement :

l'émetteur E et les récepteurs R sont immobiles



R₁ et R₂ perçoivent des ondes de même longueur d'onde

l'émetteur E se déplace à la vitesse « v_E » ; les récepteurs R sont immobiles



R₁ perçoit des ondes de longueur d'onde plus grande que R₂

Les calculs montrent que la fréquence de l'onde reçue par le récepteur R est donnée par la relation :

$$f_R = \frac{f_E}{1 + \frac{v_E}{v}} \quad \text{si E s'éloigne de R} \quad (f_R < f_E)$$

$$f_R = \frac{f_E}{1 - \frac{v_E}{v}} \quad \text{si E se rapproche de R} \quad (f_R > f_E)$$

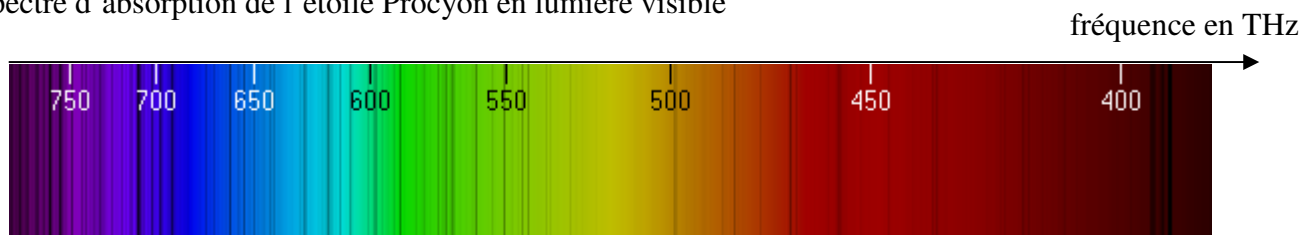
où « v » est la vitesse de propagation de l'onde, « f_R » est la fréquence du son perçu par le récepteur et « f_E » est la fréquence du son émis par l'émetteur.

Remarque la vitesse de l'émetteur « v_E » est ici inférieure à la vitesse de propagation de l'onde « v ».

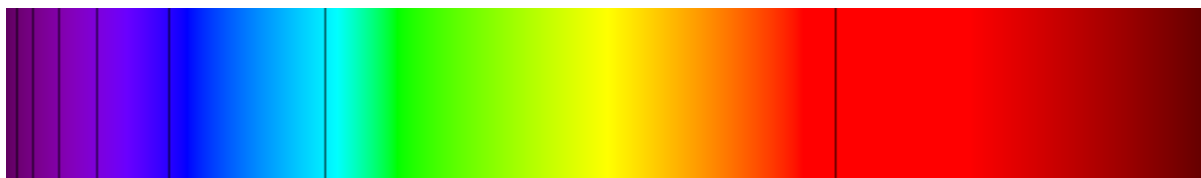
Si une étoile s'éloigne de la Terre, la fréquence des raies d'absorption du spectre de sa lumière sont décalées vers le rouge par rapport aux mêmes raies mesurées sur Terre (redshift ; si l'étoile se rapproche, il y a un décalage vers le violet). On peut en déduire la vitesse à laquelle l'étoile s'éloigne de la Terre.

Exemple

Spectre d'absorption de l'étoile Procyon en lumière visible



Spectre d'absorption de l'hydrogène en lumière visible

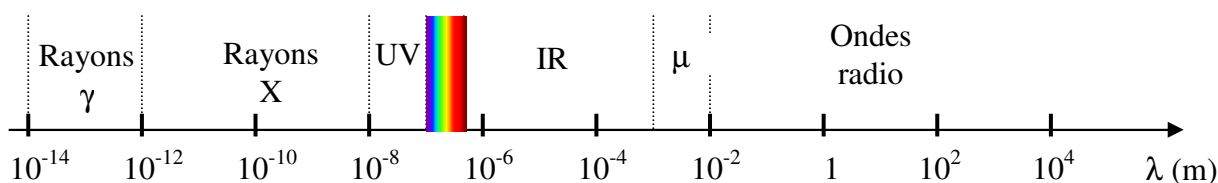


L'étoile Procyon se rapproche de la Terre à la vitesse de $3,2 \text{ km.s}^{-1}$.

1.3 Spectroscopie

Une espèce chimique peut interagir avec un rayonnement électromagnétique.

Rappel les différents domaines de longueur d'onde du rayonnement électromagnétique :

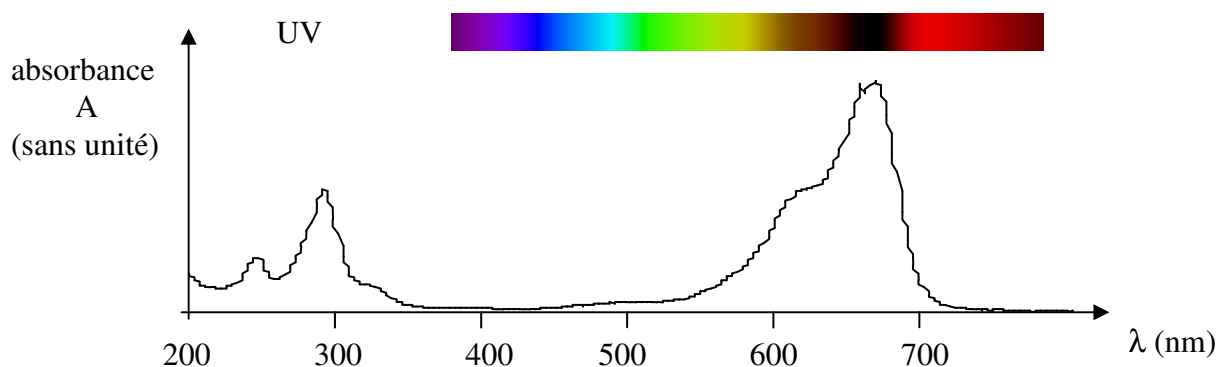


L'étude du rayonnement absorbé (ou émis) par une espèce chimique s'appelle la spectroscopie.

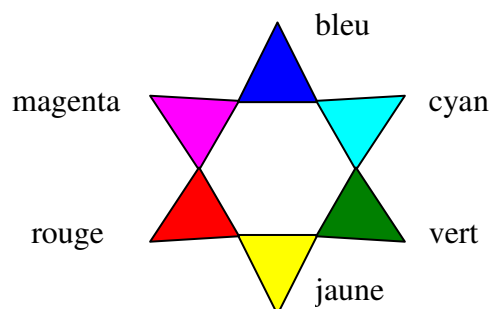
On utilise pour la spectroscopie de la lumière visible (vu en 2nd et en 1S) mais aussi les radiations infrarouges (IR) et les radiations ultraviolettes (UV)

1.3.1 Spectroscopie UV-visible

Exemple le bleu de méthylène absorbe de la lumière visible et des rayons ultraviolets :



Dans le domaine du visible, le maximum d'absorption se situe à une longueur d'onde correspondant à une radiation rouge. Le bleu de méthylène apparaît de la couleur complémentaire de celles des radiations absorbées (approximativement cyan) :



Remarque lorsqu'une espèce possède plusieurs maxima d'absorption, sa couleur résulte de la synthèse additive des couleurs complémentaires des radiations absorbées.

La présence de liaisons doubles conjuguées dans une molécule entraîne une augmentation de la longueur d'onde d'absorption λ (abs).

1.3.2 Spectroscopie infrarouge (IR)

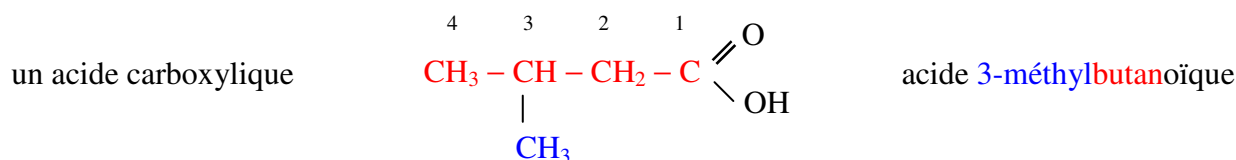
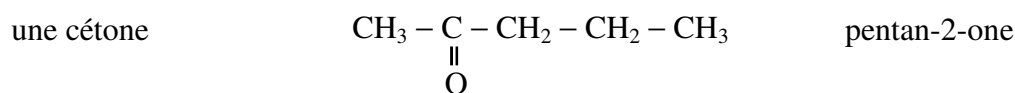
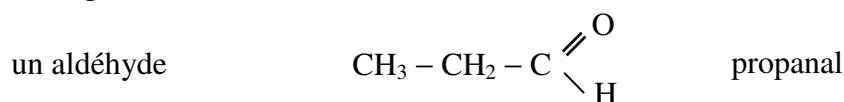
1.3.2.1 Groupes caractéristiques

Une molécule organique est toujours constituée d'un squelette carboné et éventuellement d'un groupe caractéristique (dont les propriétés définissent une fonction chimique).

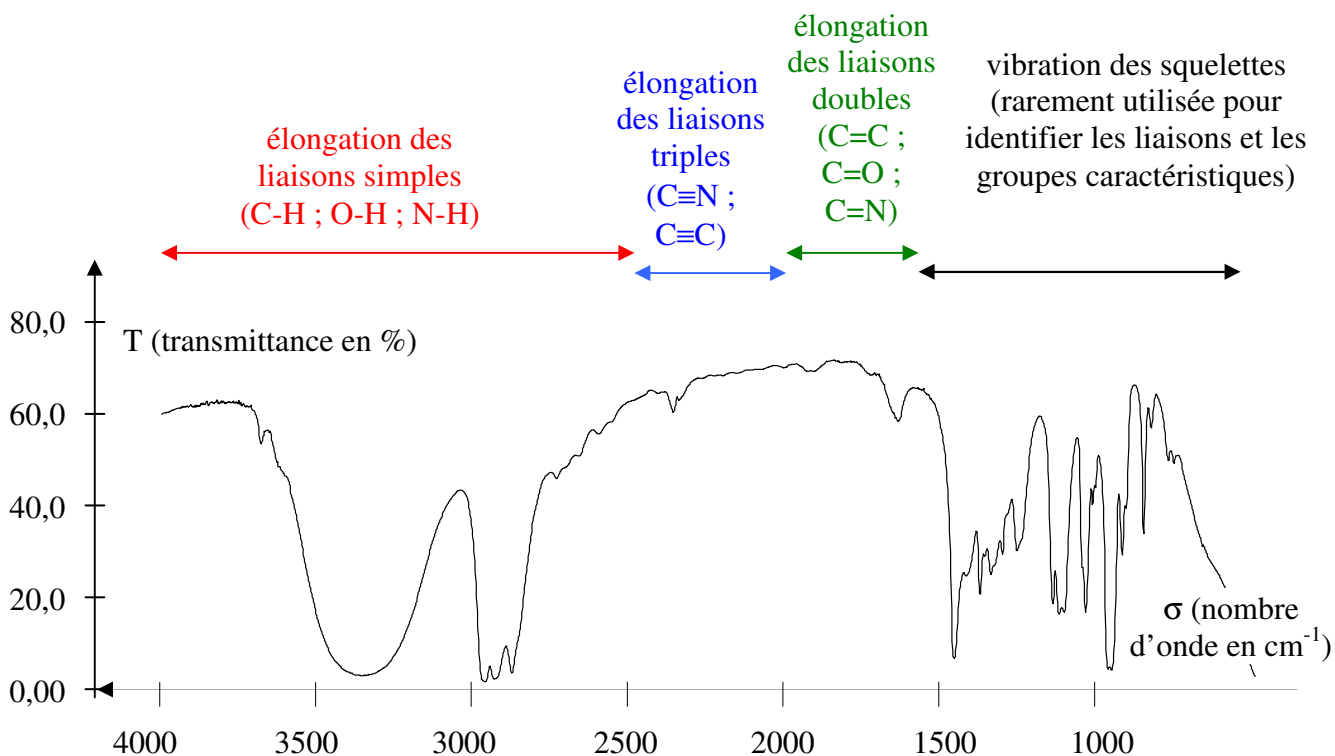
fonction	aldéhyde	cétone	alcool	acide carboxylique	ester	amine	amide
groupe caractéristique	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C} \\ \backslash \\ \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{C} - \text{C} - \text{C} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$	$-\text{O}-\text{H}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C} \\ \backslash \\ \text{O}-\text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C} \\ \backslash \\ \text{O}-\text{C} \end{array}$	$-\text{N} \begin{array}{l} \diagup \\ \diagdown \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C} \\ \backslash \\ \text{N} \begin{array}{l} \diagup \\ \diagdown \end{array} \end{array}$
nom du groupe caractéristique	carbonyle	carbonyle	hydroxyle	carboxyle	ester	amine	amide

Remarque le groupe caractéristique $-\text{O}-\text{H}$ est fixé sur un atome de carbone tétraédrique.

Exemples



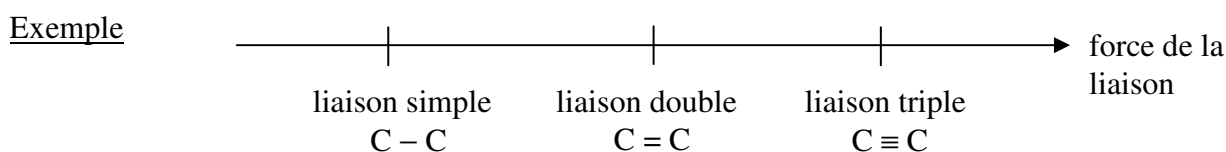
Exemple spectre infrarouge du pentan-3-ol en phase liquide



Remarques la transmittance « T » est l'intensité lumineuse transmise par l'échantillon exprimée en pourcentage
 le nombre d'onde « σ » (prononcer sigma) est l'inverse de la longueur d'onde ($\sigma = 1 / \lambda$)

1.3.2.4 Mise en évidence de la liaison hydrogène

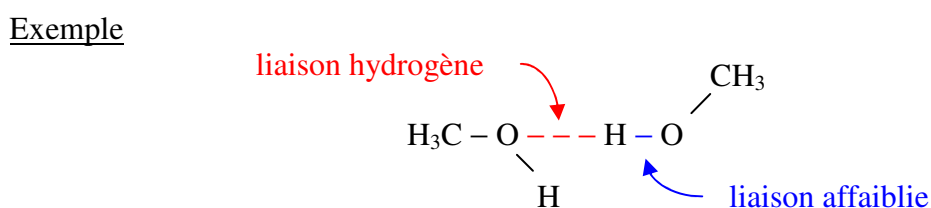
La force d'une liaison varie dans le même sens que le nombre de liaisons.



Plus une liaison est forte, plus le nombre d'onde d'absorption est grand.

Exemples $\sigma(C-C) \cong 1000 \text{ cm}^{-1}$ $\sigma(C=C) \cong 1600 \text{ cm}^{-1}$ $\sigma(C\equiv C) \cong 2250 \text{ cm}^{-1}$

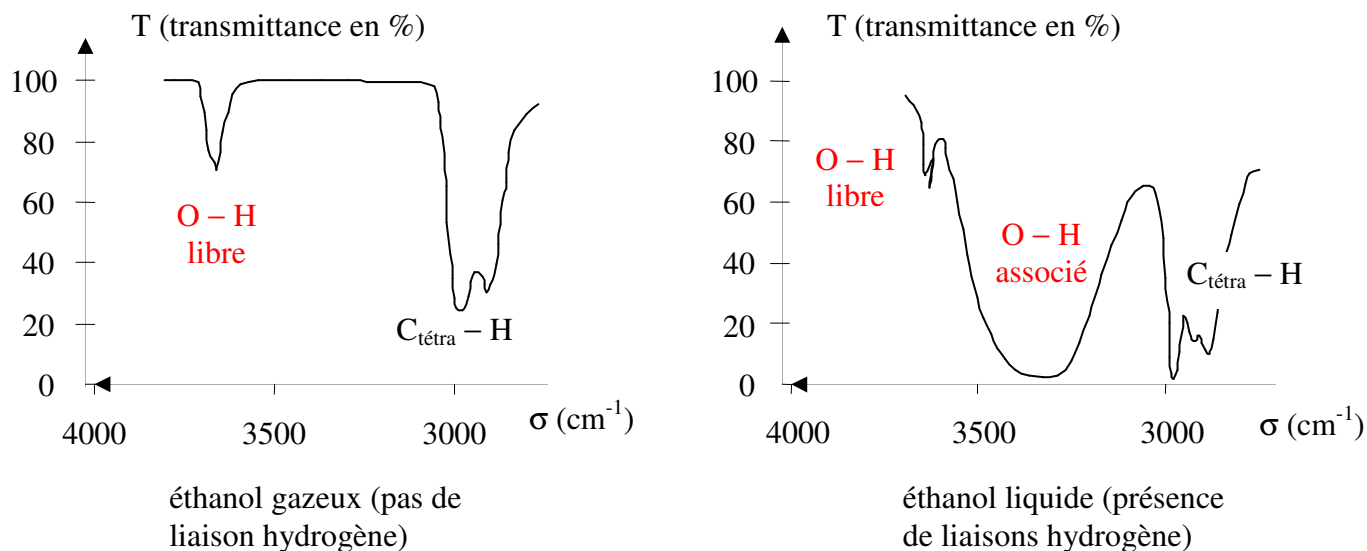
Une liaison covalente polarisée est affaiblie par la présence de liaisons hydrogène.



L'affaiblissement de la liaison a pour conséquence de diminuer le nombre d'onde du rayonnement IR absorbé par cette liaison polarisée.

Par ailleurs, on observe un élargissement de la bande d'absorption.

Exemple

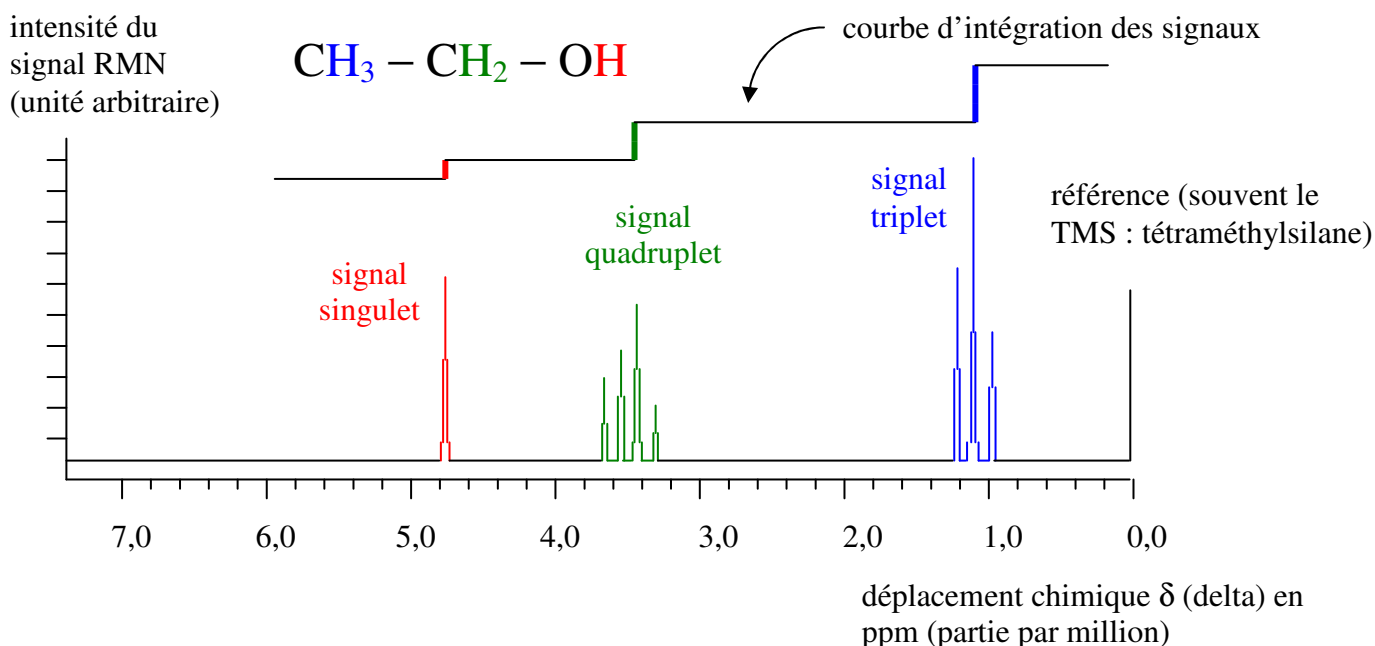


1.3.3 Spectres RMN du proton

Dans un échantillon d'atomes placés dans un champ magnétique externe, certains noyaux sont responsables d'une aimantation interne mesurable. Dans cet état, ces noyaux peuvent absorber des ondes radio. La fréquence d'absorption de ces ondes radio dépend du nombre et de la nature des atomes proches de ces noyaux (on dit leur environnement chimique).

Limite On se limitera à la spectroscopie par RMN (Résonance Magnétique Nucléaire) du noyau de l'atome d'hydrogène ^1H (appelé proton).

Exemple spectre RMN de l'éthanol



Règles concernant les spectres RMN :

- des protons équivalents ont le même déplacement chimique (par exemple les 3 atomes d'hydrogène du groupement CH_3 de l'éthanol ci-dessous)
- pour les protons portés par des atomes de carbone directement liés : si on note « n » le nombre d'atomes d'hydrogène portés par des atomes de carbone voisins alors le nombre de pics d'un signal est égal à « n + 1 »
- l'aire des signaux (représentée à l'aide de la courbe d'intégration) est proportionnelle au nombre de protons équivalents

2 Comprendre

2.1 Temps, mouvement et évolution

On se limitera à l'étude des systèmes de dimensions très faibles par rapport à la longueur de leur déplacement. Dans ce cas, le système peut être assimilé à un point qui contiendrait toute la masse du système.

On parlera souvent par la suite de « système ». Le système étudié est une quantité de matière constante au cours du temps. On choisit librement le système qu'on étudie. Tout ce qui n'est pas le système étudié est appelé l'extérieur.

On a vu (en 2nd) que la description d'un mouvement dépend de l'observateur. Pour décrire de la même façon un mouvement, les observateurs devront donc utiliser une référence commune : le référentiel.

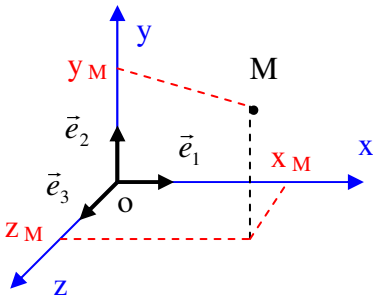
Référentiel

C'est un observateur (réel ou imaginaire) muni d'un moyen pour mesurer le temps. Un système d'axes de coordonnées peut être lié à cet observateur.

Repère

C'est un système d'axes muni d'une base et d'une origine.

Exemple un repère orthonormé de \mathbb{R}^3



O : origine du repère

$\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$: les 3 vecteurs de base

Ox, Oy, Oz : les axes de coordonnées (ici orthogonaux)

x_M, y_M, z_M : les composantes du vecteur position \overrightarrow{OM}

$$\overrightarrow{OM} = x_M * \vec{e}_1 + y_M * \vec{e}_2 + z_M * \vec{e}_3$$

2.1.1 Temps, cinématique et dynamique newtoniennes

La cinématique est l'étude des mouvements. Pour étudier les mouvements, on peut utiliser la dynamique qui met en relation le mouvement des corps avec les actions mécaniques qui leur sont appliquées.

2.1.1.1 Le vecteur vitesse

La vitesse mesure la variation du vecteur position \overrightarrow{OM} en fonction du temps :

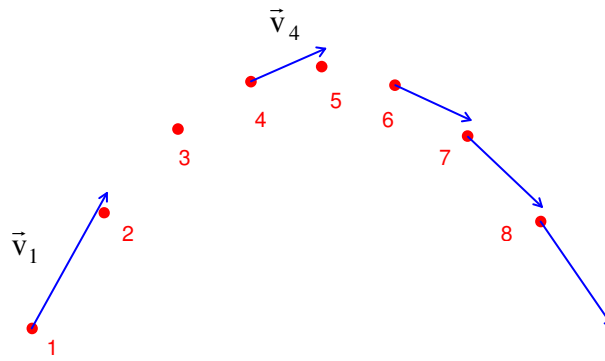
$$\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = \frac{dx_M}{dt} * \vec{e}_1 + \frac{dy_M}{dt} * \vec{e}_2 + \frac{dz_M}{dt} * \vec{e}_3 = v_x * \vec{e}_1 + v_y * \vec{e}_2 + v_z * \vec{e}_3$$

La vitesse a une nature physique (sa dimension : une longueur divisée par un temps) et une nature mathématique. Du point de vue mathématique, la vitesse a les propriétés d'un vecteur :

- direction : la tangente à la trajectoire
- sens : celui du mouvement
- valeur : la norme du vecteur notée « v » (valeur positive ; notée sans la flèche)

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

Exemple on filme le lancer d'une bille dans l'air. A l'aide d'un logiciel, on pointe sur chaque image la position du centre de la bille. L'échelle étant définie, le logiciel calcule les vitesses instantanées et dessine quelques vecteurs.



2.1.1.2 Le vecteur accélération

L'accélération mesure la variation du vecteur vitesse \vec{v} en fonction du temps :

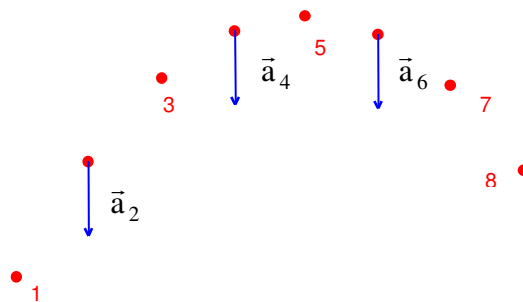
$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{dv_x}{dt} * \vec{e}_1 + \frac{dv_y}{dt} * \vec{e}_2 + \frac{dv_z}{dt} * \vec{e}_3 = a_x * \vec{e}_1 + a_y * \vec{e}_2 + a_z * \vec{e}_3$$

L'accélération a une nature physique (sa dimension : une longueur divisée par le carré d'un temps) et les propriétés mathématiques d'un vecteur.

Un système possède une accélération dans les cas suivants :

- sa vitesse augmente : les vecteurs vitesse et accélération ont le même sens
- sa vitesse diminue : les vecteurs vitesse et accélération ont des sens opposés
- il change de direction : l'accélération possède une composante perpendiculaire à la vitesse

Exemple on se place dans les mêmes conditions que le mouvement précédent

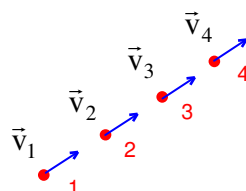


2.1.1.3 Quelques mouvements à connaître

On filme le lancer d'une bille. A l'aide d'un logiciel, on pointe sur chaque image la position du centre de la bille.

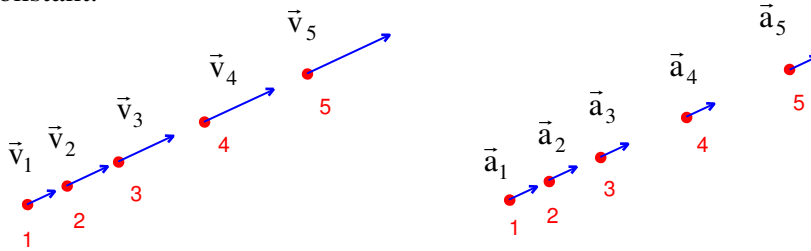
a Mouvement rectiligne uniforme

Le vecteur vitesse est constant et le vecteur accélération est nul.



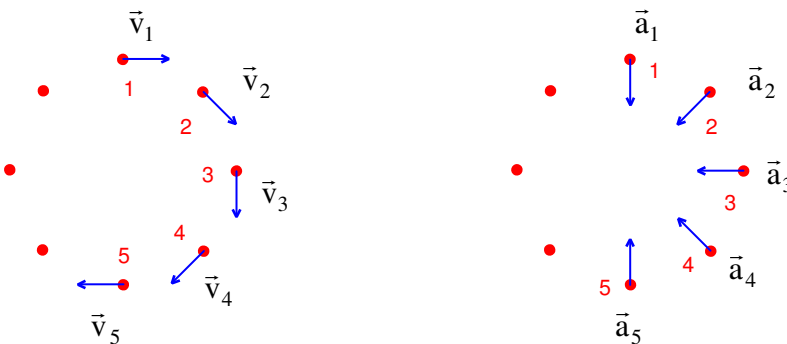
b) Mouvement rectiligne uniformément varié

Le vecteur vitesse change dans le temps (sa valeur est une fonction affine du temps). Le vecteur accélération est constant.



c) Mouvement circulaire uniforme

Le vecteur vitesse change dans le temps (sa valeur est constante mais sa direction change). Le vecteur accélération a la direction du rayon de la trajectoire et sa valeur est donnée par la relation : $a = v^2 / R$.



d) Mouvement circulaire non uniforme

Les vecteurs vitesse et accélération changent dans le temps (valeur et direction variables).



Dans le cas particulier de ce mouvement, il est intéressant de décomposer le vecteur accélération en deux vecteurs :



\vec{a}_T est l'accélération tangente à la trajectoire. Sa valeur est donnée par la relation $a_T = dv / dt$

\vec{a}_N est l'accélération normale (la normale en un point d'un cercle est la perpendiculaire à la tangente en ce point et qui passe par le centre du cercle). Sa valeur est donnée par la relation $a_N = v^2 / R$

2.1.1.4 Référentiel galiléen

Dans un référentiel galiléen, un système sur lequel ne s'exerce aucune force a un mouvement rectiligne uniforme (principe de l'inertie vu en 2nd).

En cherchant à vérifier expérimentalement ce principe, on arrive à la conclusion que le référentiel héliocentrique est galiléen (ainsi que tous les référentiels animés par rapport au référentiel héliocentrique d'un mouvement de translation rectiligne uniforme).

Les référentiels terrestre et géocentrique ne sont pas galiléens puisque la Terre tourne autour du soleil. Néanmoins, l'expérience montre que le principe d'inertie est pratiquement vérifié :

- dans le référentiel terrestre pour les mouvements de courte durée réalisés sur Terre
- dans le référentiel géocentrique pour les mouvements des satellites

2.1.1.5 Lois de Newton

Ces lois sont l'expression mathématisée d'un rapport constant entre des grandeurs (vitesse, force, masse, ...). Elles ont été soumises à de nombreuses vérifications expérimentales.

a) Première loi de Newton

Dans un référentiel galiléen, tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme (la valeur de la vitesse est constante) si les forces qui s'exercent sur lui se compensent (ou s'il n'est soumis à aucune force) et réciproquement.

$$\vec{v} = \vec{c} \text{ const} \quad \Leftrightarrow \quad \sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0}$$

b) Deuxième loi de Newton

Dans un référentiel galiléen, la somme des forces extérieures $\sum \vec{F}_{\text{ext}}$ appliquées à un système est égale à la dérivée par rapport au temps de sa quantité de mouvement \vec{p} :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m * \vec{v})}{dt}$$

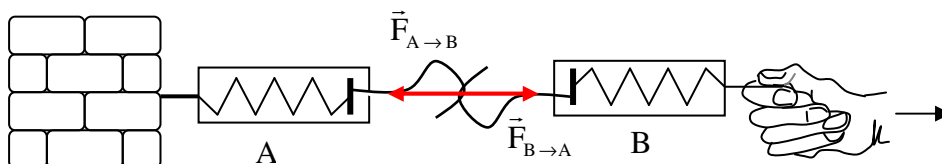
c) Troisième loi de Newton

L'action est toujours égale à la réaction :

$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$$

Ce résultat s'applique à toute interaction entre deux systèmes, qu'ils soient en mouvement ou immobiles, qu'ils soient en contact ou non.

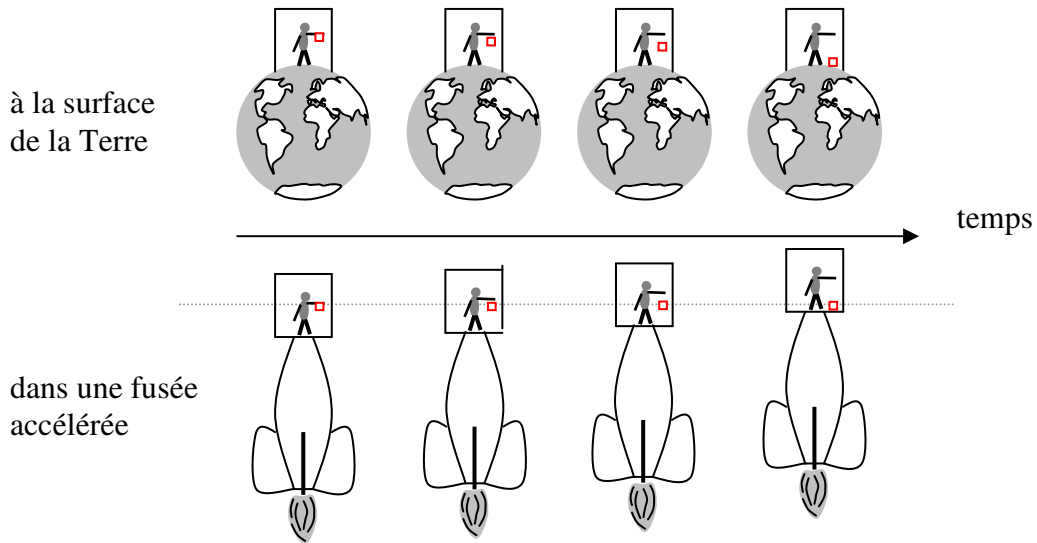
Exemple



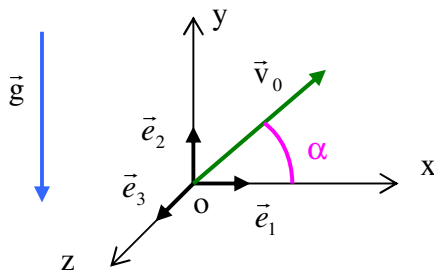
Les indications des dynamomètres A et B sont identiques. Les forces $\vec{F}_{A \rightarrow B}$ et $\vec{F}_{B \rightarrow A}$ ont même intensité, même direction et des sens contraires

2.1.1.6 Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme

Une célèbre « expérience par la pensée » d'Einstein suggère que le champ de pesanteur « \vec{g} » de la Terre est localement équivalent à une accélération « \vec{a} » :



Le système étudié est une bille lancée dans le champ de pesanteur terrestre supposé uniforme. A l'instant initial, la vitesse « \vec{v}_0 » fait un angle « α » avec l'horizontal. Les frottements peuvent être négligés.



On choisit un repère d'étude $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ tel que l'origine O coïncide avec la position de la bille à la date t_0 .

Le plan $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$ contient le vecteur \vec{v}_0

On a vu que le champ de pesanteur « \vec{g} » de la Terre est localement équivalent à une accélération « \vec{a} » :

$$\begin{pmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}$$

On peut résoudre ces trois équations et obtenir les équations paramétriques de la vitesse :

$$\begin{aligned} v_x &= A \\ v_y &= -g * t + B \\ v_z &= C \end{aligned}$$

A, B et C sont des constantes qui dépendent des conditions initiales (à la date $t_0 = 0$) :

$$\begin{aligned} v_{x0} &= v_0 * \cos \alpha & A &= v_0 * \cos \alpha & v_x &= v_0 * \cos \alpha \\ v_{y0} &= v_0 * \sin \alpha & B &= v_0 * \sin \alpha & v_y &= -g * t + v_0 * \sin \alpha \\ v_{z0} &= 0 & C &= 0 & v_z &= 0 \end{aligned} \Rightarrow$$

On peut résoudre ces trois nouvelles équations et obtenir les équations paramétriques du mouvement :

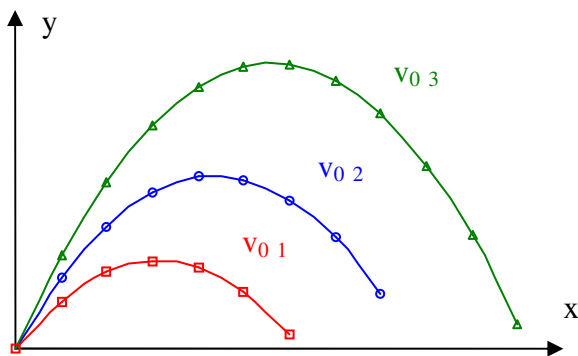
$$\begin{aligned}
 x &= v_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot t + A' \\
 y &= -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin(\alpha) \cdot t + B' \\
 z &= C'
 \end{aligned}$$

A', B' et C' sont des constantes qui dépendent des conditions initiales. A la date $t_0 = 0$, les coordonnées sont nulles :

$$\begin{aligned}
 x_0 = 0 &= v_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot t_0 + A' & x &= v_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot t \\
 y_0 = 0 &= -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t_0^2 + v_0 \cdot \sin(\alpha) \cdot t_0 + B' \Rightarrow & y &= -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin(\alpha) \cdot t \\
 z_0 = 0 &= C' & z &= 0
 \end{aligned}$$

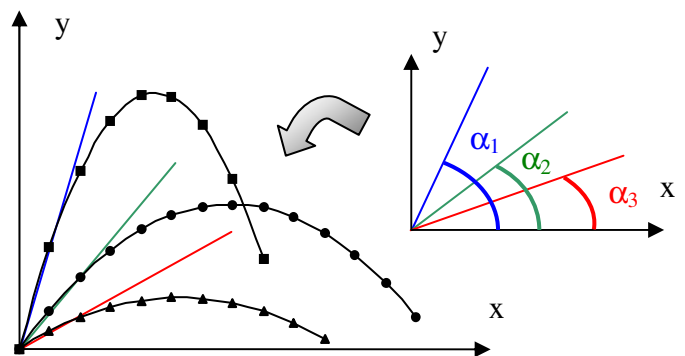
Remarque à tout instant la coordonnée z est nulle : le mouvement s'effectue dans le plan $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$

Applications



Influence de la valeur de la vitesse initiale « v_0 » sur la trajectoire de la balle.

$$v_{01} < v_{02} < v_{03} \quad (\alpha \text{ est constant})$$



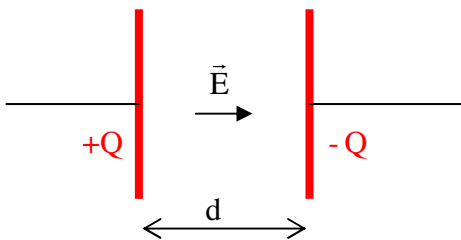
Influence de l'angle de tir « α » sur la trajectoire de la balle.

$$\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 \quad (v_0 \text{ est constant})$$

2.1.1.7 Mouvement dans un champ électrostatique uniforme

a **Rappels**

On a vu en 1S, qu'en un point règne un champ électrostatique « \vec{E} », si en amenant en ce point une charge « q », elle subit une force « \vec{F}_e » : $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$



un condensateur est un dispositif constitué de **deux surfaces conductrices** (les armatures) séparées par un isolant (le diélectrique).

A l'intérieur des armatures, le champ électrostatique \vec{E} est uniforme (direction perpendiculaire aux armatures ; orienté de l'armature (+) vers l'armature (-) ; norme : $E = U / d$).

Un électron placé entre les armatures est soumis à l'interaction gravitationnelle (car il a une masse) et à l'interaction électrostatique (car il a une charge).

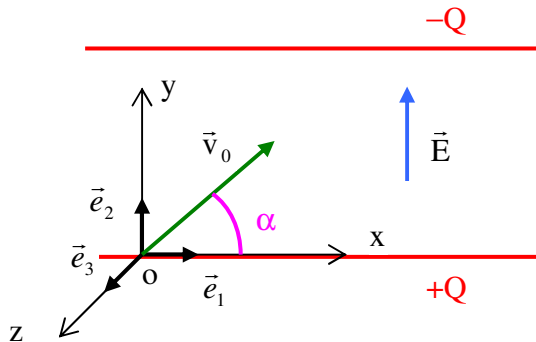
Exemple le champ électrique vaut par exemple de $2,50 \text{ V.m}^{-1}$:

$$P = m_e \cdot g_T = 9,109 \cdot 10^{-31} \cdot 9,81 = 8,94 \cdot 10^{-30} \text{ N}$$

$$F_e = e \cdot E = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2,50 = 4,00 \cdot 10^{-19} \text{ N}$$

b Etude du mouvement

Le système étudié est une particule ponctuelle, de charge électrique « q » et de masse « m », lancée dans un champ électrostatique uniforme (entre les armatures d'un condensateur). A l'instant initial, la vitesse « \vec{v}_0 » fait un angle « α » avec l'horizontal. Les frottements peuvent être négligés.



On choisit un repère d'étude $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ tel que l'origine O coïncide avec la position de la particule à la date t_0 .

Le plan $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$ contient le vecteur \vec{v}_0

Dans le référentiel terrestre supposé galiléen, on peut appliquer la 2ème loi de Newton avec :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{P} + \vec{F}_e \cong \vec{F}_e \quad \text{car le poids est négligeable devant la force électrostatique pour une particule}$$

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = m * \frac{d\vec{v}}{dt} = m * \vec{a} \quad \text{car la masse de la particule ne varie pas}$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ F_e / m \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}$$

La démarche de résolution est la même que dans le cas précédent (mouvement dans un champ de pesanteur uniforme) :

$$x = v_0 * \cos(\alpha) * t$$

$$y = \frac{F_e}{2 * m} * t^2 + v_0 * \sin(\alpha) * t$$

$$z = 0$$

2.1.1.8 Conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé

Un système est isolé si les forces qui s'exercent sur lui se compensent (ou s'il n'est soumis à aucune force) : $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0}$.

Pour un système isolé et dans un référentiel galiléen, la deuxième loi de Newton s'écrit : $\vec{p} = \vec{c}\text{onst}$.

Exemple

Dans l'espace, une fusée éloignée de tout corps ne subit aucune force extérieure. Cette fusée est un système isolé : $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0}$.

Dans la fusée, une transformation chimique interne génère des produits gazeux projetés vers l'arrière. Le système se sépare en deux parties : véhicule et gaz.

Dans un référentiel galiléen, la deuxième loi de Newton affirme que la quantité de mouvement du système est constante : $\vec{p} = \vec{p}(\text{véhicule}) + \vec{p}(\text{gaz}) = \vec{c}\text{onst}$

Toute variation de la quantité de mouvement du véhicule (il va par exemple de plus en plus vite) est due à la variation opposée de la quantité de mouvement des gaz. C'est la propulsion par réaction.

2.1.1.9 Mouvement d'un satellite

Deux corps ponctuels, de masses m_A et m_B et séparés d'une distance AB grande devant leur taille, exercent l'un sur l'autre des forces attractives $\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$, de même direction, de sens opposés et de même valeur :

$$\vec{F}_{A/B} = -G * \frac{m_A * m_B}{AB^2} * \vec{u}_{AB}$$

\vec{u}_{AB} est un vecteur unitaire (norme égale à 1) orienté de A vers B.

On note M_T la masse de la Terre et R est la distance séparant la Terre du satellite (supposée constante). La seule force s'exerçant sur le satellite est la force de gravitation exercée par la Terre. Appliquons, dans le référentiel géocentrique, la deuxième loi de Newton au satellite, on obtient :

$$\vec{a} = -G * \frac{M_T}{R^2} * \vec{u}_{TS}$$

L'accélération du satellite est normale, dirigée vers le centre de la Terre et indépendante de la masse du satellite.

Comparons la norme de l'accélération donnée par la relation ci-dessus avec la valeur obtenue lors de l'étude d'un mouvement circulaire uniforme :

$$a = G * \frac{M_T}{R^2} \quad \text{et} \quad a = \frac{v^2}{R}$$

On en déduit :

$$v^2 = G * \frac{M_T}{R}$$

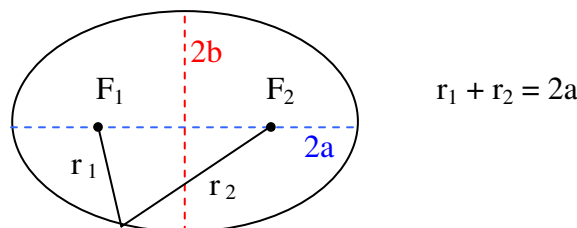
Ainsi, la vitesse d'un satellite en orbite circulaire n'est fonction que de son altitude (elle ne dépend pas de sa masse). Elle augmente quand l'altitude diminue.

La période de révolution « T » est la durée nécessaire au satellite pour parcourir son orbite (faire un tour). La longueur du périmètre d'une orbite circulaire est $L = 2 * \pi * R$.

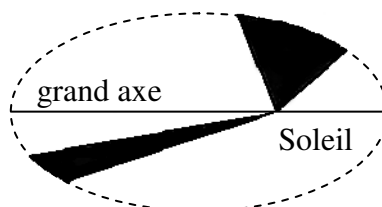
$$T = \frac{L}{v} = \frac{2 * \pi * R}{v} = 2 * \pi * R * \sqrt{\frac{R}{G * M_T}} = 2 * \pi * \sqrt{\frac{R^3}{G * M_T}}$$

2.1.1.10 Les lois de Kepler

Première loi (loi des trajectoires) dans le référentiel héliocentrique, la trajectoire du centre d'une planète est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers.



Deuxième loi (loi des aires) le segment de droite reliant le soleil à une planète balaie des aires égales pendant des durées égales.



Les planètes se déplacent plus rapidement lorsqu'elles sont proches du soleil et plus lentement lorsqu'elles en sont plus éloignées

Troisième loi (loi des périodes) pour toute planète du système solaire, le rapport entre le carré de la période de révolution et le cube du demi grand axe est le même :

$$\frac{T^2}{a^3} = C$$

« C » est appelée constante de la loi des aires. Elle ne dépend pas de la planète considérée.

Remarque

En mettant au carré les deux membres de l'équation $T = 2 * \pi * \sqrt{\frac{R^3}{G * M_T}}$, on a $T^2 = 4 * \pi^2 * \frac{R^3}{G * M_T}$.

On retrouve une relation analogue à la troisième loi de Kepler : $\frac{T^2}{R^3} = \frac{4 * \pi^2}{G * M_T}$

2.1.2 Mesure du temps et oscillateur, amortissement

2.1.2.1 Travail d'une force constante

Partant d'exemples concrets de la vie quotidienne, on constate que des objets soumis à une force dont le point d'application se déplace peuvent être mis en mouvement, changer d'altitude, voir leur température s'élever, se déformer temporairement ou définitivement, ...

Dans tous ces cas, on dira que la force travaille.

On définit le travail $W_{A \rightarrow B}(\vec{F})$ d'une force constante \vec{F} pour un déplacement \vec{AB} de son point d'application par la relation :

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB} = F * AB * \cos(\vec{F}, \vec{AB})$$

Le travail peut être négatif (travail résistant), positif (travail moteur) ou nul.

Remarque si le travail d'une force ne dépend pas du chemin parcouru mais uniquement du point de départ et d'arrivée, on dit que cette force est conservative (dissipative dans le cas contraire).

a Travail du poids

Le travail du poids, au cours d'un déplacement d'une position A vers une position B s'écrit :

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{P}) = - m * g * \Delta h$$

Le travail du poids est indépendant du chemin parcouru (force conservative). Il ne dépend que de la différence d'altitude entre les points d'arrivée h_B et de départ h_A : $\Delta h = h_B - h_A$.

b Travail d'une force électrostatique

Dans un champ électrostatique uniforme \vec{E} , la force électrostatique $\vec{F} = q * \vec{E}$ qui s'exerce sur une particule de charge « q » est constante.

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = q * U_{AB}$$

Le travail de la force électrostatique est indépendant du chemin parcouru (force conservative). Il ne dépend que de la différence de potentiel électrique entre les points de départ et d'arrivée : $U_{AB} = V_A - V_B$.

c Travail d'une force de frottement

La résultante \vec{f} des forces de frottement, supposée constante, est tangente au déplacement de A vers B mais de sens opposé au glissement des deux surfaces au contact : $(\vec{f}, \overrightarrow{AB}) = 180^\circ$.

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \overrightarrow{AB} = f * AB * \cos(\vec{f}, \overrightarrow{AB}) = f * AB * \cos(180^\circ) = f * AB * (-1)$$

$$\boxed{W_{A \rightarrow B}(\vec{f}) = -f * AB}$$

Le signe négatif montre que le travail des forces de frottement est toujours résistant et qu'il dépend du chemin parcouru (forces dissipatives).

2.1.2.2 Le travail : un mode de transfert de l'énergie

a Cas d'une chute libre

L'expérience montre que lors de la chute libre d'une bille d'un point A vers un point B, la vitesse de translation de la bille est donnée par la relation (vu en 1S) :

$$v_B^2 - v_A^2 = 2 * g * (h_A - h_B)$$

Lors de cette chute, on peut calculer le travail du poids :

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{P}) = m * g * (h_A - h_B)$$

En associant les deux relations précédentes, on en déduit :

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{P}) = \frac{1}{2} * m * v_B^2 - \frac{1}{2} * m * v_A^2 = \Delta(Ec)$$

b Généralisation

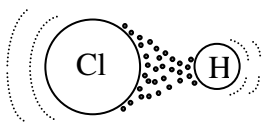
Entre deux positions, dans un référentiel galiléen, la variation de l'énergie cinétique d'un solide en translation est égale à la somme des travaux des forces extérieures :

$$\boxed{\sum W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_{ext}) = \Delta Ec}$$

2.1.2.3 Les oscillateurs

a Exemples

Oscillateur moléculaire



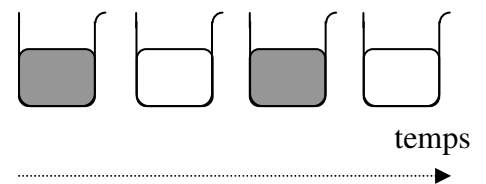
Grandeur caractéristique :
longueur de la liaison

Oscillateur mécanique en rotation



Grandeur caractéristique :
angle de rotation que fait le fil
avec la position d'équilibre

Oscillateur chimique



Grandeur caractéristique :
concentration d'un produit

b Propriétés caractéristiques d'un oscillateur libre

Une fois mis en oscillation, le système évolue librement c'est à dire sans recevoir d'apport énergétique extérieur.

L'oscillateur libre amorti perd de l'énergie vers le milieu extérieur par suite de phénomènes dissipatifs (frottements pour les systèmes mécaniques, effet Joule pour les systèmes électriques, ...).

L'oscillateur libre non amorti est un cas limite pour lequel il n'existe pas de phénomènes dissipatifs qui réalise le transfert énergétique vers le milieu extérieur ($Q = 0$). Le système évolue donc à énergie constante.

c Le pendule simple

Il est constitué d'une bille reliée à un point fixe. Le fil a une masse négligeable et une longueur « L ». On nomme « θ » l'angle que fait le fil avec la position d'équilibre ($\theta < 10^\circ$ en pratique).



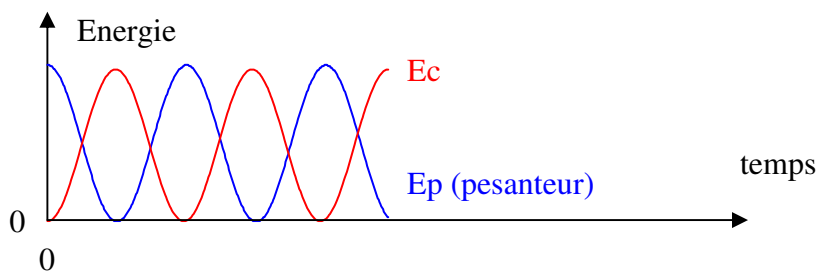
d Echanges énergétiques dans le pendule simple

Le système étudié est la bille. A l'instant initial, la bille est immobile et « θ_0 » est l'angle que fait le fil avec la position d'équilibre. Les frottements sont négligés. L'énergie potentielle de pesanteur de la bille est nulle quand le pendule est à l'équilibre.

Energie cinétique : $E_c = 0,5 * m * v^2$

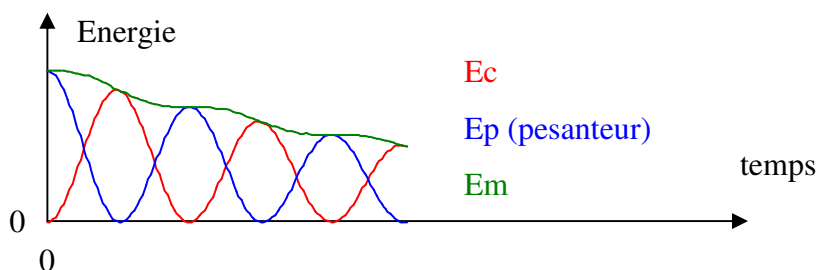
Energie potentielle de pesanteur : $E_p (\text{pesanteur}) = m * g * L * (1 - \cos(\theta))$

Si les frottements sont négligeables, l'oscillateur est non amorti. Ainsi l'énergie mécanique système : $E_m = E_c + E_p (\text{pesanteur})$ est constante au cours du temps.



L'énergie potentielle de pesanteur se transforme en énergie cinétique et réciproquement au cours du mouvement.

Si les frottements ne sont pas négligeables, l'oscillateur est amorti. Le système perd de l'énergie mécanique.



La variation de l'énergie mécanique est égale aux travaux des forces non conservatives (les forces de frottement).

e Période du pendule simple

L'expérience montre que la période des oscillations non amorties dépend des paramètres « L » et « g » :

$$T_0 = 2 * \pi * \sqrt{\frac{L}{g}}$$

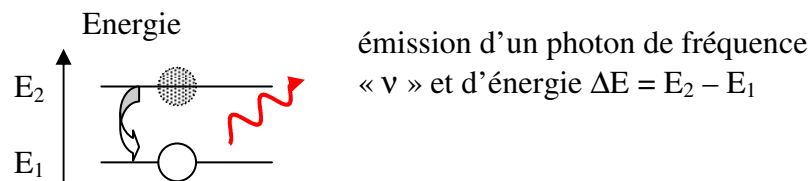
En présence de frottements, la période n'est plus définie. La durée séparant deux passages successifs du pendule par la position d'équilibre avec le même sens de variation est inférieure à « T_0 » la période du système non amorti.

2.1.2.4 Mesure du temps et définition de la seconde

La mesure du temps a toujours reposé sur des phénomènes périodiques : les saisons ou le cycle de la Lune.

Progressivement, des systèmes mécaniques ont été utilisés, pour mettre au point des dispositifs de mesure du temps plus précis. L'utilisation du pendule dans les horloges en est un exemple.

On l'a vu, les phénomènes dissipatifs comme les frottements perturbent la régularité des oscillations des systèmes mécaniques. Aussi, on utilise la période de l'onde électromagnétique émise par un atome lors de la transition d'un électron d'une couche d'énergie à une autre.



La seconde est actuellement définie comme la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation entre deux niveaux choisis de l'atome de césium 133.

2.1.3 Temps et relativité restreinte

2.1.3.1 Invariance de la vitesse de la lumière et caractère relatif du temps

a Invariance de la vitesse de la lumière

Depuis la fin du 19^{ème} siècle, des expériences montrent que la vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels galiléens.

Exemple la désintégration des mésons π^0

Cette expérience a été menée au CERN à Genève en 1964.

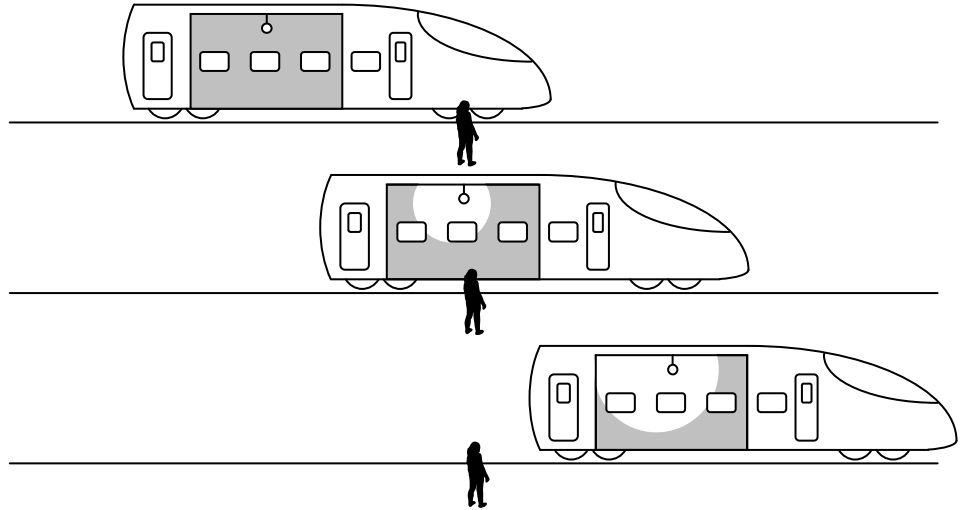
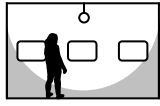
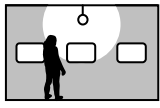
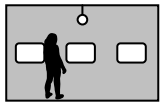
Grâce à un accélérateur de particules, les mésons π^0 sont animés, dans le référentiel du laboratoire, d'une vitesse « c » proche de celle de la lumière.

En se désintégrant en vol, ces mésons donnent naissance à des photons « γ » dont la vitesse est mesurée dans le référentiel du laboratoire.

En désaccord flagrant avec la cinématique newtonienne (qui aurait prévu une vitesse égale à environ « $2 * c$ »), la vitesse des photons « γ » a été mesurée égale à « c ».

b Caractère relatif du temps

Embarquons dans un train imaginaire circulant à une vitesse proche de celle de la lumière selon un mouvement rectiligne uniforme :



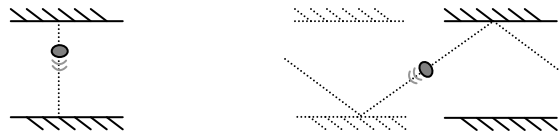
un voyageur observe que les faisceaux lumineux atteignent les parois opposées du wagon simultanément

une personne sur le quai constate que les faisceaux lumineux atteignent les parois opposées du wagon à des instants différents

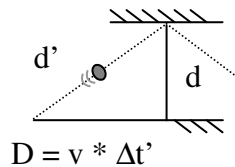
La simultanéité de deux événements est relative à l'observateur. Cette perte de la simultanéité universelle a pour conséquence l'abandon de la notion de temps absolu. Chaque référentiel galiléen possède sa propre mesure du temps.

2.1.3.2 Temps propre et temps mesuré

L'horloge la plus simple est constituée de deux miroirs parallèles en regard, entre lesquels va et vient un photon à la célérité de la lumière dans le vide. Les miroirs sont espacés de la distance « d ».



Soit Δt la durée du trajet du photon d'un miroir à l'autre quand les miroirs sont immobiles (schéma de gauche : c'est la durée du trajet de longueur d), et $\Delta t'$ cette même durée quand les miroirs sont en translation rectiligne uniforme vers la droite à la vitesse v (schéma de droite).



La distance d' parcourue par le photon d'un miroir à l'autre augmente donc et vaut : $d' = \sqrt{d^2 + v^2 * \Delta t'^2}$
Par ailleurs, $d' = c * \Delta t'$ car la vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels galiléens.

Ainsi $\sqrt{d^2 + v^2 * \Delta t'^2} = c * \Delta t'$ qui, après quelques manipulations, devient : $\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$

Comme $\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} > 1$ ces calculs montrent que la durée d'un aller et retour est plus courte dans le référentiel lié aux miroirs ($\Delta t' > \Delta t$).

Dans le référentiel lié aux miroirs, la durée qui séparent ces 2 événements est nommée durée propre Δt pour signaler que les 2 événements ont lieu au même endroit (même abscisse horizontale).

Dans le référentiel lié au sol, les 2 événements ont lieu à des endroits différents. La durée $\Delta t'$ qui séparent les 2 événements est nommée durée mesurée.

Les durées propre et mesurée sont liées par la relation : $\Delta t' = \gamma * \Delta t$ avec $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

2.1.3.3 Dilatation des durées

On a vu qu'une horloge utilise par définition un phénomène périodique. La période de l'horloge dans le référentiel dans lequel elle est repos, est appelé période propre de l'horloge.

La période de cette même horloge observée dans un autre référentiel en mouvement de translation uniforme paraît plus longue que la période propre : on dit qu'il y a « dilatation du temps ».

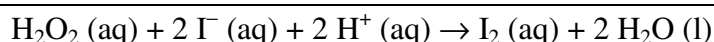
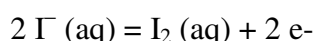
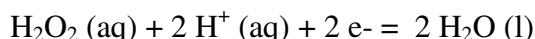
Remarque c'est toujours un ralentissement du temps que l'on observe depuis un autre référentiel, jamais une accélération.

2.1.4 Temps et évolution chimique : cinétique et catalyse

Quand nous mettons des espèces chimiques en présence, nos sens distinguent principalement trois types de comportement :

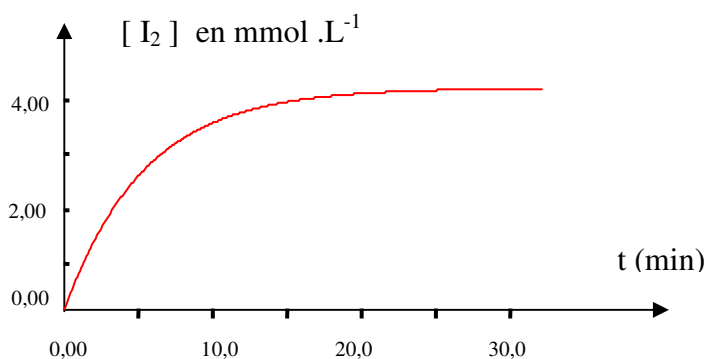
- le système réagit instantanément, c'est-à-dire trop rapidement pour que l'on puisse distinguer son évolution
- le système réagit lentement (quelques secondes ou quelques minutes)
- le système n'évolue pas (deux raisons possibles : la réaction est impossible ; la réaction est possible mais d'une lenteur extrême)

Exemple la réaction d'oxydation des ions iodure (Γ^-) par l'eau oxygénée (H_2O_2) est lente



2.1.4.1 Evolution de la quantité de matière au cours du temps

Le diiode est une espèce colorée qui se forme lors de la réaction d'oxydation des ions iodure par l'eau oxygénée. L'évolution de la concentration en diiode $[I_2]$ dans le milieu réactionnel peut être suivie par spectrophotométrie :



On constate que la vitesse de réaction diminue avec le temps et qu'elle s'annule au bout d'un temps qui correspond à la fin de la réaction (asymptote horizontale)

Tableau d'avancement de la réaction d'oxydation des ions iodure par l'eau oxygénée :

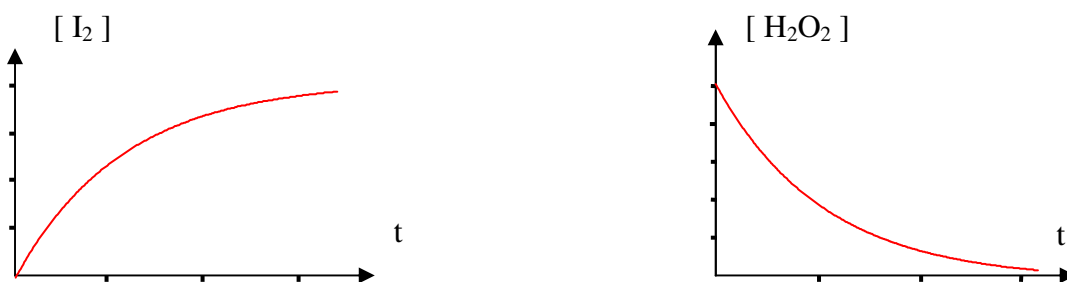
	H ₂ O ₂ (aq)	2 I ⁻ (aq)	2 H ⁺ (aq)	I ₂ (aq)	2 H ₂ O (l)
instant initial	n _i (H ₂ O ₂)	n _i (I ⁻)	n _i (H ⁺)	0	excès
à l'instant t	n _i (H ₂ O ₂) - x	n _i (I ⁻) - 2 * x	n _i (H ⁺) - 2 * x	x	excès

L'avancement « x » de la réaction est égal à la quantité de diiode formé à l'instant t :

$$x = n(I_2) = [I_2] * V$$

2.1.4.2 Facteurs cinétiques

a Influence de la concentration



Les vitesses de formation d'un produit et de disparition d'un réactif diminuent quand la concentration des réactifs diminue.

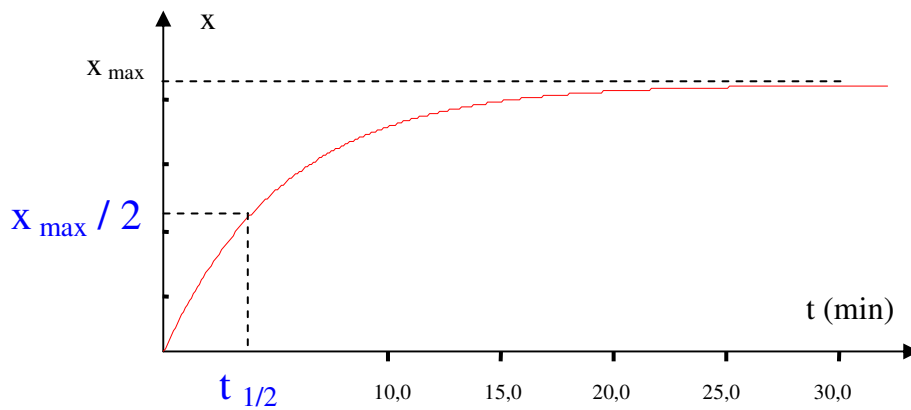
b Rôle de la température



Les vitesses de formation d'un produit ou de disparition d'un réactif varient avec la température (dans l'exemple ci-dessus ces vitesses augmentent).

2.1.4.3 Temps de demi-réaction

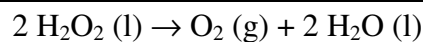
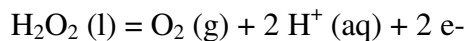
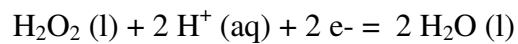
Le temps de demi réaction noté « t_{1/2} » est la durée nécessaire pour que l'avancement parvienne à la moitié de sa valeur finale « x_{max} ».



Le temps de demi réaction fournit une échelle de temps caractéristique du système étudié. En effet, la réaction cesse pratiquement d'évoluer au bout d'une durée de l'ordre de $4 * t_{1/2}$ à $7 * t_{1/2}$.

2.1.4.4 Catalyse homogène, hétérogène et enzymatique

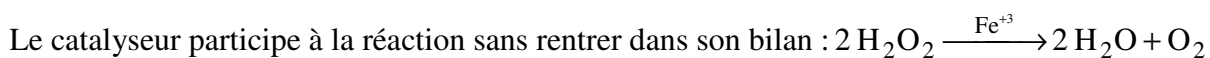
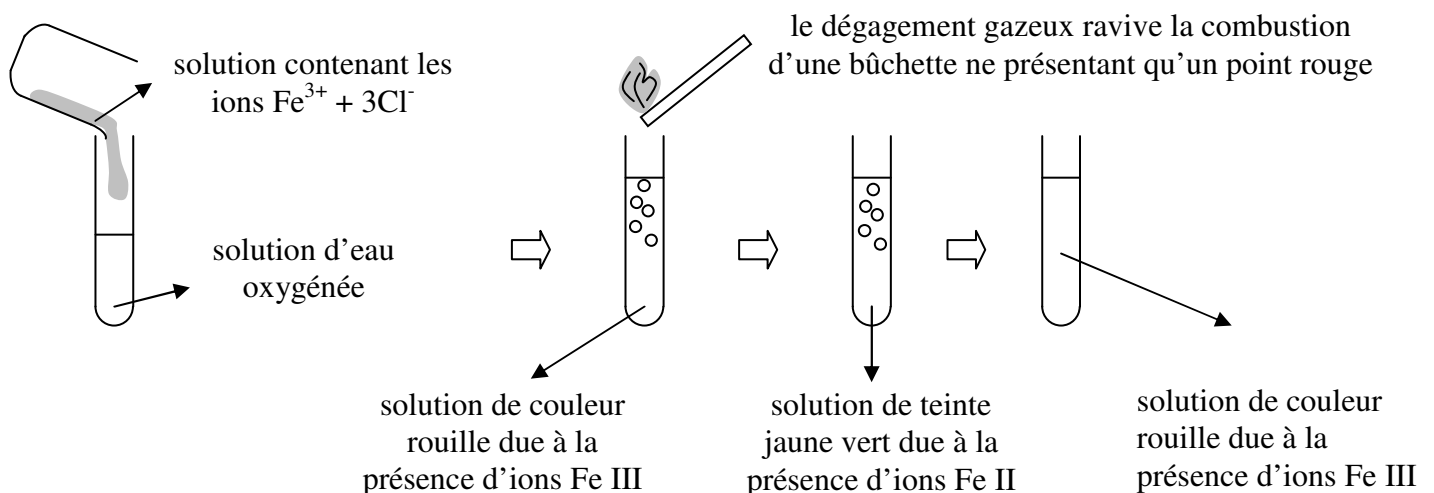
Exemple dismutation de l'eau oxygénée



L'eau oxygénée pure peut-être conservée plusieurs années. Cependant après plusieurs mois de repos, on aperçoit une légère surpression à l'ouverture d'une bouteille d'eau oxygénée. La réaction de dismutation ci-dessus est donc très lente.

a Catalyse homogène

Les ions fer III accélèrent la réaction de dismutation de l'eau oxygénée. Un catalyseur est une substance qui accélère une réaction chimique possible.

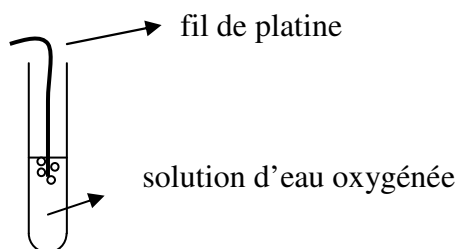


Le catalyseur et les réactifs ne forment qu'une seule phase. L'action du catalyseur sur la réaction (la catalyse) est dite homogène.

b Catalyse hétérogène

Le platine accélère la réaction de dismutation de l'eau oxygénée. Il y a formation de bulles à la surface du platine. La mousse de platine produit une effervescence beaucoup plus abondante.

Le catalyseur et les réactifs ne sont pas dans la même phase, la catalyse est hétérogène. Le catalyseur accélère la réaction de façon d'autant plus efficace qu'il est sous forme plus divisée.

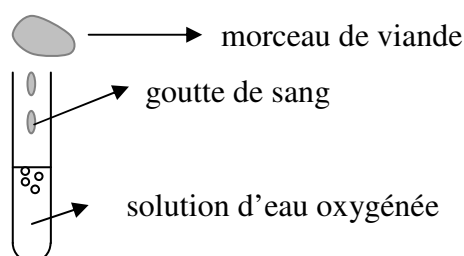


c Catalyse enzymatique

La catalyse enzymatique est un cas particulier de catalyse homogène où le catalyseur est une enzyme, protéine élaborée par un organisme vivant.

Le sang contient une enzyme appelée « catalase » dont le site catalytique contient un ion fer II.

La catalase accélère la réaction de dismutation de l'eau oxygénée.



d Mécanisme réactionnel




Le catalyseur ne rend pas possible une réaction impossible. Sa présence, complique le mécanisme réactionnel en remplaçant une (ou plusieurs) étape lente par d'autres étapes plus rapides.

2.2 Structure et transformation de la matière

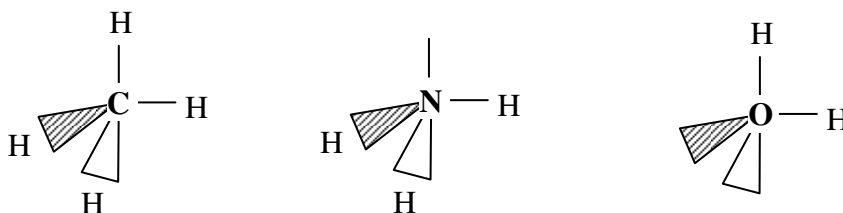
2.2.1 Représentation spatiale des molécules

2.2.1.1 La représentation de Cram

La représentation de Cram permet de représenter la géométrie de quelques molécules. Conventions :

doublet d'électrons dans le plan : 
 doublet d'électrons en arrière du plan : 
 doublet d'électrons en avant du plan : 

Exemples

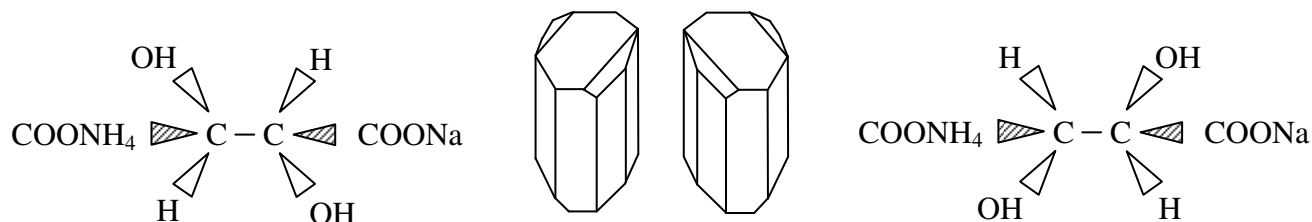


2.2.1.2 La chiralité

Un objet est chiral s'il est différent de son image dans un miroir.

Les termes « chiral » et « chiralité » ont été inventés par W.H. Thompson (Lord Kelvin) en 1884 et sont dérivés de « cheir », mot grec signifiant « main ».

Louis Pasteur a pour la première fois proposé, vers 1850, que des molécules peuvent être chirales. Il a également montré par ses expériences célèbres avec des tartrates d'ammonium et de sodium (voir dessin ci-dessous) qu'il y a un lien entre la chiralité des cristaux et la chiralité des molécules qui les constituent.

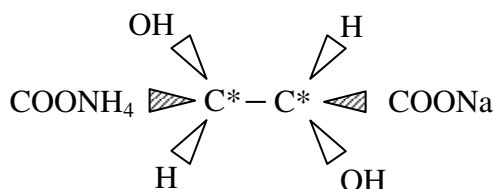


Une molécule ou un cristal chiral a un effet sur la lumière.

2.2.1.3 Carbone asymétrique

Un carbone asymétrique est un atome de carbone lié à quatre groupes d'atomes différents. On le note C*.

Exemple



2.2.1.4 Les acides α -aminés

Les acides aminés possèdent deux groupes caractéristiques :

- le groupe caractéristique – COOH de la fonction acide carboxylique
- le groupe caractéristique – NH₂ de la fonction amine

Dans un acide α -aminé le groupe caractéristique de la fonction amine est lié à l'atome de carbone adjacent au groupe caractéristique de la fonction acide carboxylique (le carbone « α »).

Les acides α -aminés jouent un rôle fondamental en biochimie comme constituants élémentaires des protéines.

Exemples



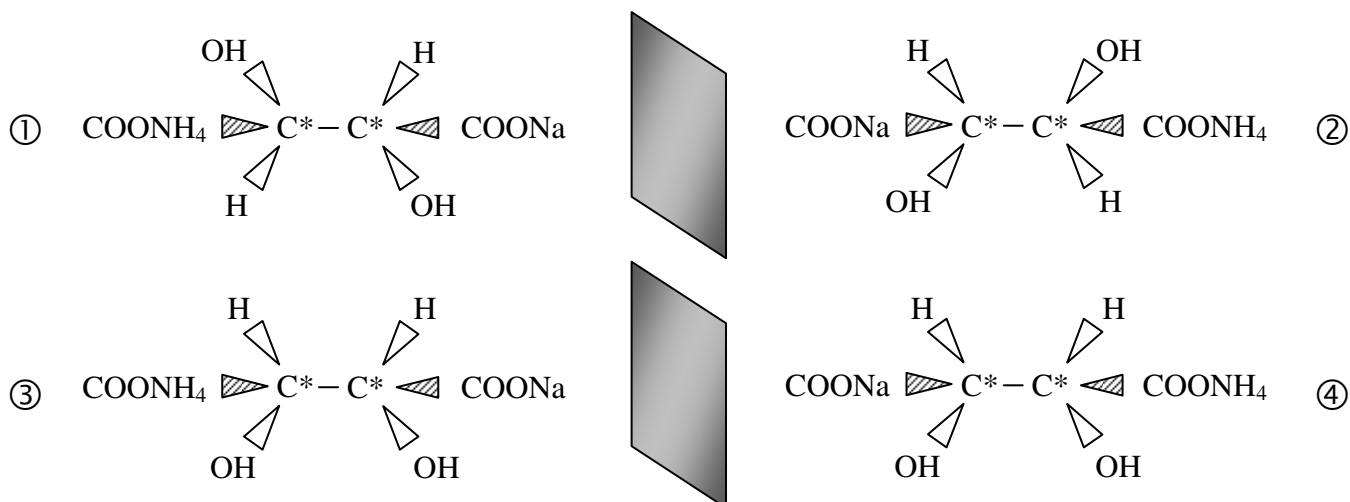
Une molécule possédant un seul atome asymétrique est chirale. Ainsi, excepté la glycine, tous les acides α -aminés sont chiraux.

2.2.1.5 Enantiomères, mélange racémique, diastéréoisomères

L'objet chiral et son image sont appelés énantiomères. Un mélange équimolaire de deux énantiomères est nommé mélange racémique. Un mélange racémique n'a pas d'effet sur la lumière.

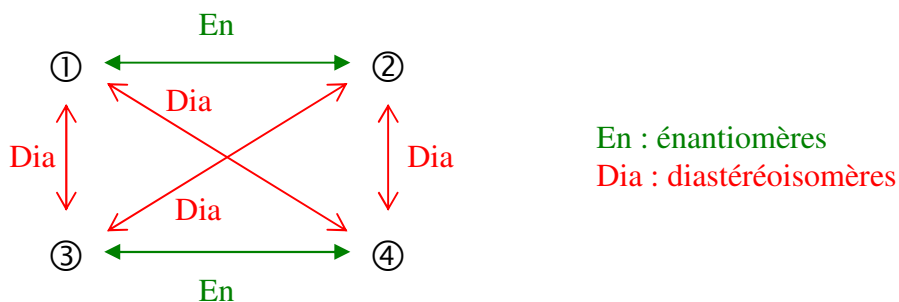
Certaines molécules ont deux atomes de carbone asymétriques et possèdent ainsi plusieurs stéréoisomères (isomères qui diffèrent entre eux par de la position relative de leurs atomes dans l'espace ; ils ont la même formule semi-développée).

Exemples



Les diastéréoisomères sont des stéréoisomères qui ne sont pas énantiomères.

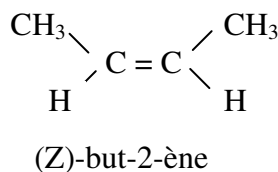
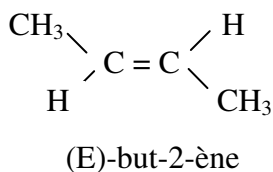
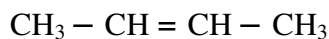
Exemples les stéréoisomères du tartrate d'ammonium et de sodium ci-dessus sont au nombre de quatre. Certains couples sont énantiomères et d'autres sont diastéréoisomères :



On a vu en 1S que les alcènes de constitution $\text{R} - \text{CH} = \text{CH} - \text{R}'$ peuvent avoir deux configurations (R et R' sont des chaînes hydrocarbonées quelconques).

Si les deux atomes d'hydrogène sont du même côté de la double liaison, la configuration est dite Z (de zusammen \equiv ensemble en allemand), sinon la configuration est dite E (de entgegen \equiv opposé en allemand).

Exemple

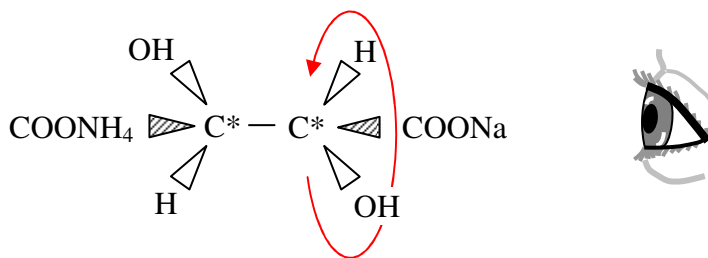


Les isomères Z et E d'une molécule sont diastéréoisomères.

2.2.1.6 Conformation

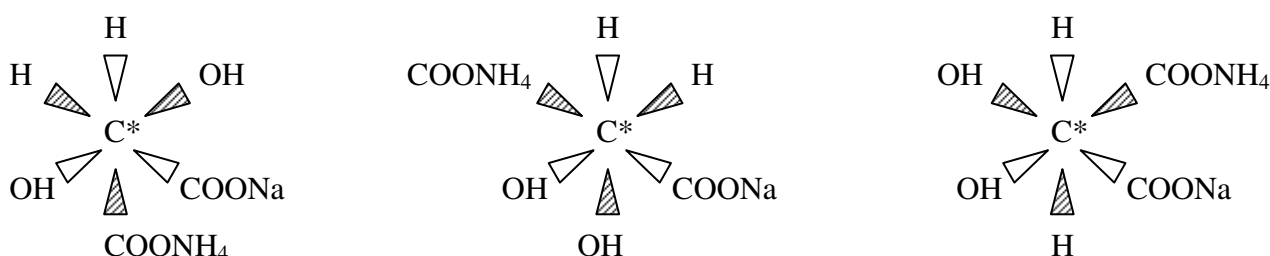
Une molécule est un assemblage d'atomes liés entre eux par des liaisons de covalence. Si une liaison de covalence est simple, une rotation est possible autour de son axe.

Exemple



Cette rotation conduit à des dispositions différentes des atomes les uns par rapport aux autres. Ces dispositions sont appelées des conformations de la molécule.

Exemple l'œil ci-dessus peut observer plusieurs conformations de la molécule de tartrate d'ammonium et de sodium



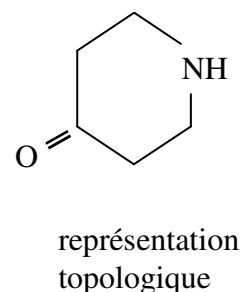
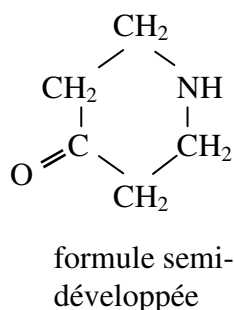
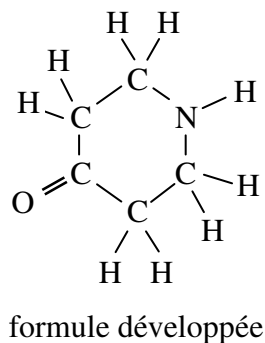
Toutes les conformations n'ont pas la même stabilité. La molécule se positionne le plus souvent dans la conformation qui éloigne le plus les groupements volumineux (celle du milieu dans l'exemple ci-dessus).

2.2.1.7 Formule topologique des molécules organiques

Toutes les molécules de la chimie organique présentent un enchaînement d'atomes de carbone liés par des liaisons de covalence.

L'atome de carbone possède quatre électrons sur sa couche électronique externe (structure électronique $K^2 L^4$). Pour satisfaire à la règle de l'octet, chaque atome de carbone d'une molécule possède quatre liaisons covalentes.

Exemple le 4-piperidinone, de formule brute C_5H_9NO , qui est cyclique



La formule topologique est semblable à la formule semi-développée mais les atomes d'hydrogène et de carbone liés ne sont pas représentés.

2.2.1.8 Propriétés biologiques et stéréoisomérisie

Pour un couple d'énantiomères, les distances entre atomes non liés sont identiques. Ils possèdent alors les mêmes propriétés physiques et chimiques. Leur propriétés biochimiques sont souvent différentes car, dans ce cas, le phénomène ou le réactif mis en jeu est chiral.

Pour deux diastéréoisomères certaines distances entre atomes non liés ou des valeurs d'angles sont forcément différentes. Leurs propriétés physiques et chimiques sont alors différentes.

2.2.2 Transformation en chimie organique

Une formule chimique a du sens pour un chimiste, elle évoque des propriétés physiques et chimiques. Elle est un outil qui permet de rationaliser et de prévoir le comportement des espèces chimiques.

Les liaisons C – C et C – H étant non polarisées, il en résulte que leur rupture est extrêmement difficile. Par ailleurs, le nuage électronique entre ces atomes ne se déforme pas facilement. En conséquence, les alcanes présentent une très grande stabilité chimique.

Cette absence de réactivité des chaînes hydrocarbonées explique que les diverses réactions observées en chimie organique font intervenir des groupes caractéristiques qui sont constitués d'autres atomes et qui donnent des propriétés particulières aux molécules.

2.2.2.1 Modifications de chaîne

Ce sont des opérations industrielles gourmandes en énergie et effectuées dans des raffineries.

Trois procédés permettent de modifier le squelette carboné des hydrocarbures issus de la distillation des pétroles :

- le reformage catalytique consiste à ramifier, cycliser ou déshydrogéner des hydrocarbures de cinq à neuf atomes de carbone
- le craquage catalytique consiste à raccourcir de longues molécules issues de coupes lourdes
- le vapocraquage permet d'obtenir des alcènes de faibles masses moléculaires et de l'hydrogène

Ces procédés permettent d'obtenir des produits utilisables par :

- l'industrie chimique qui utilise des hydrocarbures simples (comme l'éthylène, le propylène, le benzène, ...) pour la fabrication des plastiques, peintures, colorants, cosmétiques, explosifs, engrais, ...
- les transports qui nécessitent des carburants légers comme l'essence, le gazole ou le kérosène

2.2.2.2 Modification de groupe caractéristique

Ce sont des opérations qui peuvent être réalisées au laboratoire.

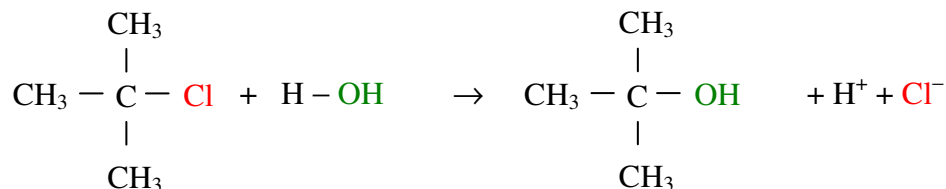
Groupes caractéristiques (dont les propriétés définissent une fonction chimique) à savoir reconnaître dans une molécule :

fonction	aldéhyde	cétone	alcool	acide carboxylique	ester	amine	amide	alcène
groupe caractéristique	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C} \\ \backslash \\ \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{C}-\text{C}-\text{C} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$	$-\text{O}-\text{H}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C} \\ \backslash \\ \text{O}-\text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C} \\ \backslash \\ \text{O}-\text{C} \end{array}$	$-\text{N} \begin{array}{l} \diagdown \\ \diagup \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C} \\ \backslash \\ \text{N} \begin{array}{l} \diagdown \\ \diagup \end{array} \end{array}$	$\begin{array}{c} \diagup \\ \diagdown \end{array} \text{C}=\text{C} \begin{array}{l} \diagdown \\ \diagup \end{array}$

a Réaction de substitution

Dans une réaction de substitution, un groupe caractéristique est remplacé par un autre.

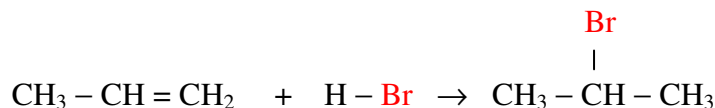
Exemple



b Réaction d'addition

Dans une réaction d'addition, des atomes ou des groupes d'atomes viennent se greffer sur une liaison double.

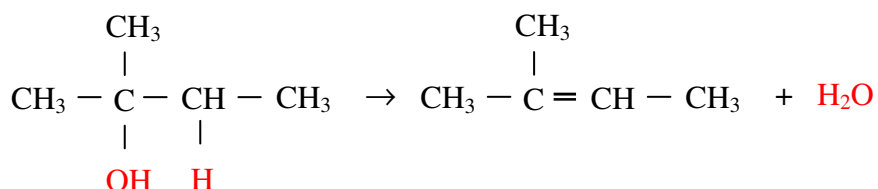
Exemple



c Réaction d'élimination

Dans une réaction d'élimination, des atomes ou des groupes d'atomes sont éliminés pour former une liaison double.

Exemple



2.2.2.3 Aspect microscopique d'une modification de groupe caractéristique

a L'électronégativité

On a vu en 1S que l'électronégativité est une mesure de la tendance d'un élément à attirer les électrons.

Exemples

H 2,1							He
Li 1,0	Be 1,5	B 2,0	C 2,5	N 3,0	O 3,5	F 4,0	Ne
Na 0,9	Mg 1,2	Al 1,5	Si 1,9	P 2,1	S 2,5	Cl 3,0	Ar

Electronégativité de quelques éléments dans l'échelle de Pauling.

Approximativement, l'électronégativité augmente le long d'une ligne et diminue le long d'une colonne de la classification périodique des éléments.

b Polarisation permanente d'une liaison

Si deux atomes liés d'une molécule ont même électronégativité, les électrons de la liaison sont partagés de manière égale par les deux atomes.

Exemple



Si deux atomes liés d'une molécule ont des électronégativités différentes, l'atome le plus électronégatif attire à lui les électrons de la liaison. Cette liaison est polarisée et constitue un dipôle électrostatique permanent.

Exemple



On peut noter ${}^{+\delta}\text{H} - \text{Cl}^{-\delta}$ la molécule de chlorure d'hydrogène ci-dessus si on souhaite mettre en évidence les charges partielles portées par chaque atome.

On note $\Delta\delta$ la différence d'électronégativité entre deux atomes liés. Plusieurs cas sont possibles suivant la valeur de $|\Delta\delta|$:

Différence d'électronégativité	Caractère de la liaison	Exemple
$ \Delta\delta < 0,5$	non polarisée	F – F
$0,5 \leq \Delta\delta < 1,6$	polarisée	${}^{+\delta}\text{H} - \text{F}^{-\delta}$
$ \Delta\delta > 2,0$	ionique	$\text{Na}^+ \text{F}^-$

c Site donneur et site accepteur de doublet d'électrons

Un site donneur est riche en électrons :

- un atome porteur d'une charge négative partielle (notée « $-\delta$ ») ou d'une charge négative (notée « $-$ »)
- un atome porteur d'un doublet non liant
- une liaison multiple

Un site accepteur possède un déficit d'électrons :

- un atome porteur d'une charge partielle positive (notée « $+\delta$ ») ou d'une charge positive (notée « $+$ »)

d Interaction entre des sites donneurs et accepteurs de doublet d'électrons

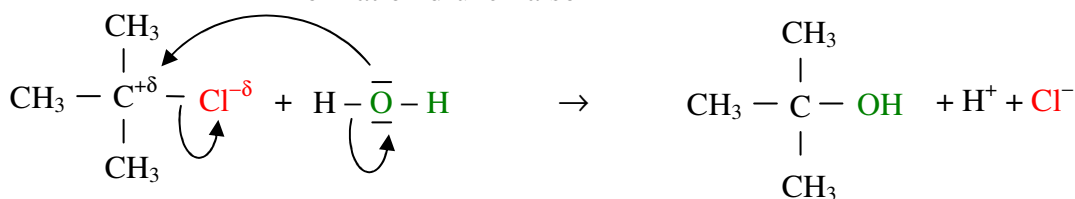
On a déplacement du doublet d'électrons du site donneur vers le site accepteur correspondant à la rupture puis à la formation de liaisons chimiques.

Sur un schéma, on représente ce déplacement du doublet d'électrons par une flèche courbe.

Exemples

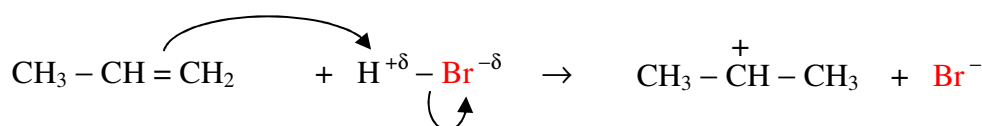
Substitution

la flèche courbe va du site donneur vers le site accepteur :
formation d'une liaison

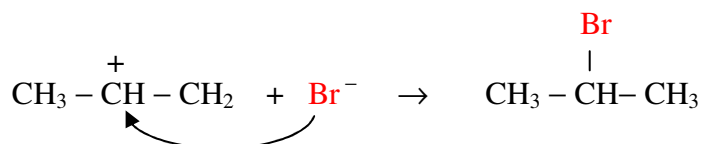


la flèche courbe part de la liaison et va vers l'élément le plus électro-négatif : rupture d'une liaison

Addition 1ère étape

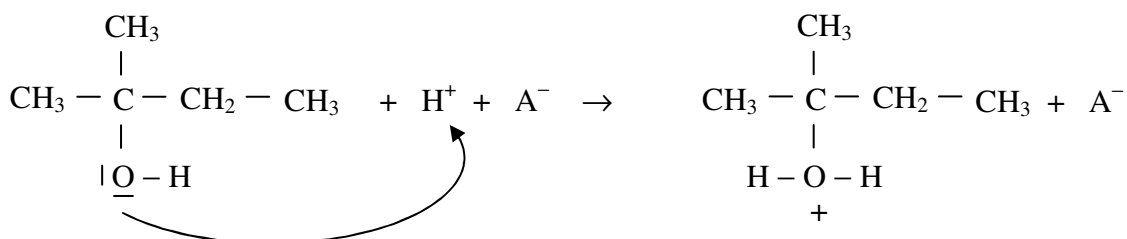


2ème étape

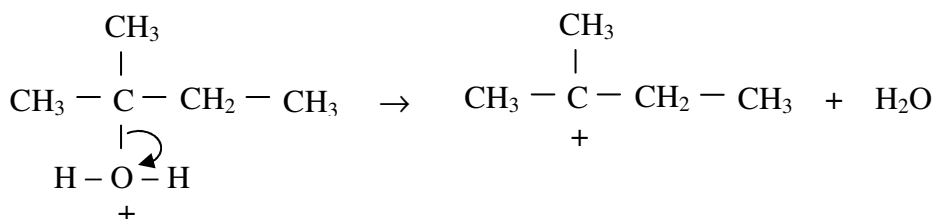


Elimination (en présence de l'acide AH)

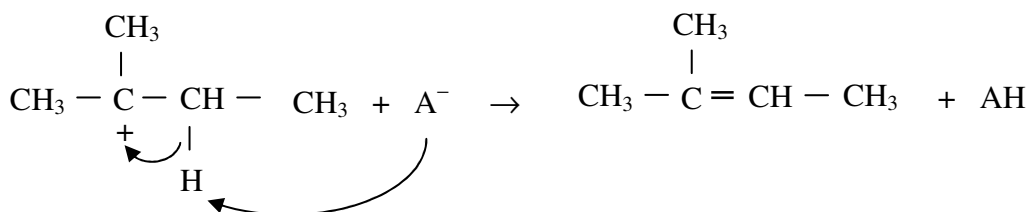
1ère étape



2ème étape



3ème étape



2.2.3 Réaction chimique par échange de proton

2.2.3.1 L'ion oxonium

On a vu en 1S que la molécule d'eau est polaire. Un ion établit ainsi des liaisons de type électrostatique avec les molécules d'eau qui l'entourent.

Le nombre de molécules d'eau liées dépend de la charge de l'ion et de sa taille (plus l'ion sera petit et plus l'intensité de l'interaction électrostatique sera élevée).

Le plus petit des ions, l'ion hydrogène H^+ , peut s'associer par une véritable liaison chimique à une molécule d'eau pour former l'ion oxonium H_3O^+ , lui-même hydraté par des molécules d'eau.

2.2.3.2 Définition du pH

Pour les solutions aqueuses diluées (en pratique $10^{-4} \text{ mol.L}^{-1} \leq c \leq 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$)

$$\boxed{\text{pH} = -\log([\text{H}_3\text{O}^+])}$$

Réciproquement, la concentration en ions oxonium est une fonction du pH : $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$

Lorsque le pH baisse d'une unité, la concentration des ions oxonium H_3O^+ augmente d'un facteur de 10.

2.2.3.3 Mesure du pH d'une solution

Pour mesurer le pH d'une solution, on peut utiliser :

- un indicateur coloré qui est une substance organique dont la couleur dépend du pH

- du papier pH qui est un papier imbibé d'indicateur coloré
- un pH-mètre

2.2.3.4 Acides et bases

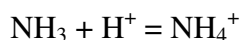
Les réactions qui impliquent un échange de protons H^+ entre réactifs sont appelées réactions acido-basiques. Brønsted a défini :

- un acide, qui est une espèce chimique capable de céder un proton H^+
- une base, qui est une espèce chimique capable de capter un proton H^+

Exemples l'acide éthanoïque CH_3CO_2H est capable de céder un proton :



l'ammoniac NH_3 est une base capable de capter un proton :



2.2.3.5 Couple acide / base

Les acides et les bases peuvent être regroupés en couples. En effet, un acide perdant un proton H^+ produit une espèce capable de capter un proton appelée base conjuguée.

Exemple l'acide éthanoïque (CH_3CO_2H) et l'ion éthanoate ($CH_3CO_2^-$) :

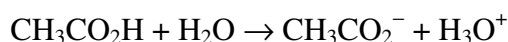


L'acide éthanoïque est la forme acide et l'ion éthanoate est la forme basique d'une même espèce chimique.

L'acide éthanoïque et l'ion éthanoate forment un couple acide / base. Ce couple est noté $CH_3CO_2H / CH_3CO_2^-$ (toujours dans l'ordre acide / base)

2.2.3.6 Notion d'équilibre

L'acide éthanoïque est un liquide incolore qui réagit avec l'eau en libérant des ions oxonium :

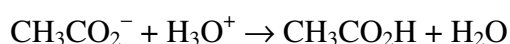
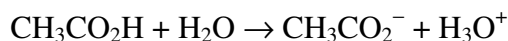


Les ions oxonium libérés sont responsables d'une diminution du pH de la solution. On mesure le pH de plusieurs solutions d'acide éthanoïque :

c (CH_3CO_2H) en mol.L ⁻¹	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
pH mesuré (à 25 °C)	4,3	3,9	3,4
[H_3O^+] calculée en mol.L ⁻¹	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$

Le tableau ci-dessus montre que : $c (CH_3CO_2H) > [H_3O^+]$

On en déduit que la réaction de l'acide éthanoïque avec l'eau est partielle. Au sein de la solution d'acide éthanoïque coexistent deux réactions opposées :



Ces deux réactions opposées évoluent rapidement, au moment du mélange, vers un état d'équilibre dynamique où elles se compensent exactement. A l'équilibre, la concentration des espèces n'évolue plus. La réaction de l'acide éthanoïque avec l'eau s'effectue dans les deux sens. Pour cette raison, l'écriture de l'équation doit être modifiée en remplaçant la flèche \rightarrow par un symbole symétrique \rightleftharpoons :



2.2.3.7 Interprétation à l'échelle microscopique de l'état d'équilibre

La réaction chimique nécessite la rencontre des espèces chimiques et s'effectue à l'occasion d'un choc efficace entre espèces réactives ou produites.

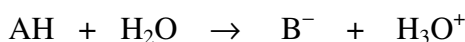
Lorsque l'état d'équilibre est atteint, les nombres de chocs efficaces entre espèces réactives d'une part et espèces produites d'autre part sont égaux. et se compensent exactement.

A l'échelle macroscopique, l'état du système ne semble plus évoluer alors qu'à l'échelle microscopique l'agitation se poursuit avec la même intensité.

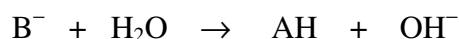
2.2.3.8 Acides forts et faibles, bases fortes et faibles

On désignera toujours un acide par « AH » et une base par « B⁻ ». Ce qui est souvent représentatif : AH = HClO ou B⁻ = CN⁻. On trouve, parfois, des occurrences moins heureuses : AH = C₆H₅NH₃⁺ ou B⁻ = NH₃

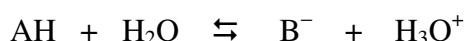
On nomme acide fort toute espèce AH (acide de Brønsted) qui réagit de façon totale avec l'eau :



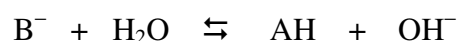
Une base de Brønsted B⁻ est forte si elle réagit de façon totale avec l'eau :



On nomme acide faible toute espèce AH (acide de Brønsted) qui réagit de façon limitée avec l'eau :

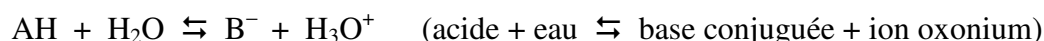


Une base de Brønsted B⁻ est faible si elle réagit de façon limitée avec l'eau :



2.2.3.9 Constante d'acidité Ka

Certains acides réagissent partiellement avec l'eau suivant l'équation :



Constante d'acidité associée à la réaction d'un acide avec l'eau : $K_a = \frac{[\text{B}^-] * [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{AH}]}$

Remarques

- le Ka dépend du couple acide / base considéré. Son intervalle de variation est très grand. Aussi, on lui préfère souvent le pKa = - log (Ka) (réciproquement : Ka = 10^{-pKa})
- le Ka caractérise le couple acide / base que l'on s'intéresse à la forme acide ou basique du couple
- le pKa d'un acide fort est négatif ou nul ; le pKa d'une base forte est supérieur ou égal à pKe (voir plus loin)

Exemples

$$K_a (\text{NH}_4^+ / \text{NH}_3) = 6,31 \cdot 10^{-10}$$

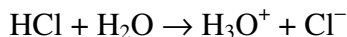
$$pK_a (\text{NH}_4^+ / \text{NH}_3) = 9,20$$

$$K_a (\text{HClO} / \text{ClO}^-) = 5,01 \cdot 10^{-8}$$

$$pK_a (\text{HClO} / \text{ClO}^-) = 7,30$$

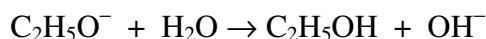
2.2.3.10 Acides forts, bases fortes

Le chlorure d'hydrogène HCl est un acide qui réagit totalement avec l'eau :



C'est pourquoi le chlorure d'hydrogène (et tous les acides forts) n'existe pas dans l'eau. On en déduit que H_3O^+ est l'acide le plus fort qui existe dans l'eau.

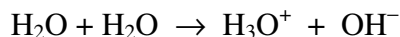
L'ion éthanolate $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}^-$ est une base qui réagit totalement avec l'eau :



C'est pourquoi l'ion éthanolate (et toutes les bases fortes) n'existe pas dans l'eau. On en déduit que l'ion hydroxyde OH^- est la base la plus forte qui existe dans l'eau.

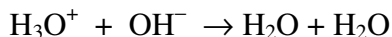
2.2.3.11 Autoprotolyse de l'eau

Au sein des solutions aqueuses, des chocs entre molécules d'eau conduisent à la formation des ions hydroxyde et oxonium :



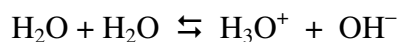
Cette réaction est très limitée, c'est-à-dire que les chocs efficaces sont rares.

Les ions libérés peuvent se recombiner :



Cette réaction est totale, c'est-à-dire que chaque choc est efficace.

L'existence de ces deux réactions, inverses l'une de l'autre, conduit à écrire l'équation-bilan de la réaction appelée « autoprotolyse de l'eau » :



2.2.3.12 Interprétation à l'échelle microscopique de l'autoprotolyse de l'eau

Imaginons le scénario suivant :

On possède un liquide ne contenant que des molécules d'eau. Les chocs successifs conduisent à la formation d'ions hydroxyde et oxonium.

Ces ions sont très dilués et les recombinaisons du type : $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$ sont rares.

La densité des ions augmente avec le temps et les recombinaisons sont de plus en plus nombreuses. Quand le nombre de recombinaisons = le nombre de formations d'ions, l'équilibre est atteint.

Les réactions continuent mais il n'y a plus accumulation d'ions. On appelle une telle situation un régime stationnaire. On est à l'équilibre.

2.2.3.13 Produit ionique de l'eau

La mesure du pH de l'eau pure, à 25°C, donne une valeur égale à 7,00. La concentration des ions oxonium dans l'eau pure est donc égale à $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}$.

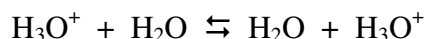
L'autoprotolyse, décrite précédemment, montre que l'eau pure contient aussi des ions hydroxyde OH^- . L'électroneutralité de l'eau impose que, à 25°C : $[\text{OH}^-] = [\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}$.

Ainsi, à 25°C : $K_e = [\text{H}_3\text{O}^+] * [\text{OH}^-] = 10^{-14}$

« K_e » est appelé produit ionique de l'eau. Sa valeur dépend de la température.

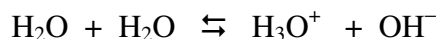
2.2.3.14 Echelle des pKa dans l'eau

L'équation-bilan de la réaction de l'eau avec l'acide le plus fort qui existe dans l'eau est :



$$\text{Ainsi } K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{H}_3\text{O}^+]} = 1 \quad (\text{ou } \text{p}K_a = 0)$$

L'eau est l'acide conjugué de la base la plus forte qui existe dans l'eau (couple $\text{H}_2\text{O} / \text{OH}^-$). L'équation-bilan de la réaction de l'eau avec l'eau est :



$$\text{Ainsi } K_a = [\text{H}_3\text{O}^+] * [\text{OH}^-] = 10^{-14} \quad (\text{ou } \text{p}K_a = 14)$$

Donc, l'acide le plus fort qui existe dans l'eau a un $\text{p}K_a$ égal à 0 et l'acide le moins fort qui existe dans l'eau (conjugué de la base la plus forte qui existe dans l'eau) a un $\text{p}K_a$ égal à 14. On en déduit :

« un acide ou une base n'existe dans l'eau que si son $\text{p}K_a$ est tel que : $0 \leq \text{p}K_a \leq 14$ ».

2.2.3.15 Domaines de prédominance

Au sein d'une solution d'acide ou de base faible, l'acide et sa base conjuguée (AH et B^-) existent simultanément.

Selon la valeur du pH de la solution, l'acide peut avoir une concentration molaire supérieure à celle de sa base conjuguée : $[\text{AH}] > [\text{B}^-]$. Dans ce cas, on dit que la forme acide prédomine.

L'inverse est bien sûr possible.

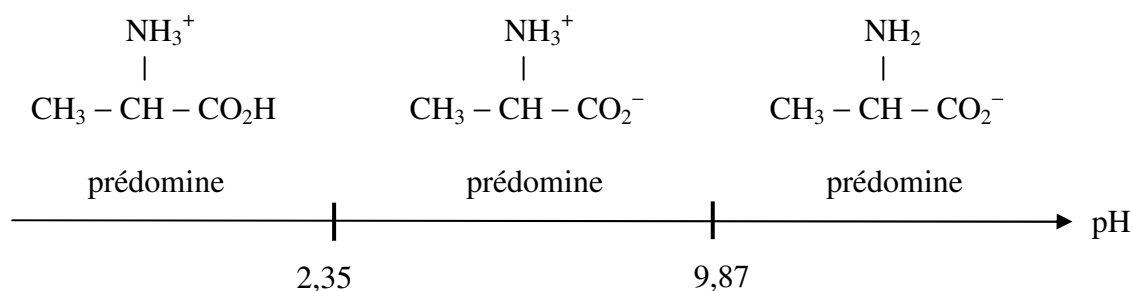


2.2.3.16 Domaines de prédominance pour un acide α -aminé

Les acides α -aminés possèdent deux couples acide base :

- le couple $-\text{CO}_2\text{H} / -\text{CO}_2^-$ associé au $\text{p}K_a$ le plus petit
- le couple $-\text{NH}_3^+ / -\text{NH}_2$ associé au $\text{p}K_a$ le plus grand

Exemple



2.2.3.17 Réaction entre un acide fort et une base forte

Une réaction acido basique est considérée totale si la différence entre les pKa des deux couples acide / base mis en jeu est ≥ 4 (au moins 99% des réactifs réagissent).

C'est évidemment le cas pour le mélange d'un acide fort et d'une base forte dans l'eau dont l'équation-bilan de la réaction est :



La réaction transfère de la chaleur à l'environnement. Elle est qualifiée d'exothermique.

2.2.3.18 pH d'une solution aqueuse d'acide fort ou de base forte

Un acide fort réagit totalement avec l'eau : $\text{AH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{B}^-$

On en déduit que $c(\text{AH}) = [\text{H}_3\text{O}^+]$ et que, aux concentrations usuelles, $\boxed{\text{pH} = -\log(c(\text{AH}))}$

Pour une base forte, on a $\boxed{\text{pH} = 14 + \log(c(\text{B}^-))}$

2.2.3.19 Solution tampon

Une solution tampon maintient son pH constant malgré l'addition de petites quantités d'acide ou de base, ou malgré une dilution.

Une solution tampon est souvent composée du mélange assez concentré d'un acide faible et de sa base conjuguée (ou d'une base faible et de son acide conjugué). Son pouvoir tampon est maximal lorsque $\text{pH} = \text{pKa}$.

Exemple le sang humain est une solution tampon qui utilise le couple acide base $\text{H}_2\text{CO}_3 / \text{HCO}_3^-$ et qui maintient son pH entre 7,35 et 7,45.

2.3 Energie, matière et rayonnement

2.3.1 Du macroscopique au microscopique

Les objets microscopiques sont les atomes, les ions et les molécules que l'on nomme des particules.

Quand un objet est formé de particules dont le nombre est de l'ordre de grandeur du nombre d'Avogadro ($N_A \cong 6.10^{23}$), il est qualifié de macroscopique.

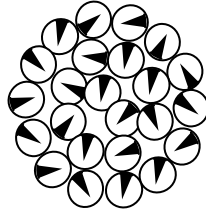
Rappel l'ordre de grandeur d'un nombre est la puissance de 10 qui s'en approche le plus.

2.3.2 Transferts d'énergie entre systèmes macroscopiques

2.3.2.1 Energie cinétique microscopique

Les particules du système ont un mouvement désordonné. Il n'y a pas de mouvement global car les vitesses et les directions des particules sont aléatoires. Un tel mouvement désordonné est le propre de l'agitation thermique. L'énergie cinétique microscopique varie quand la température du système varie.

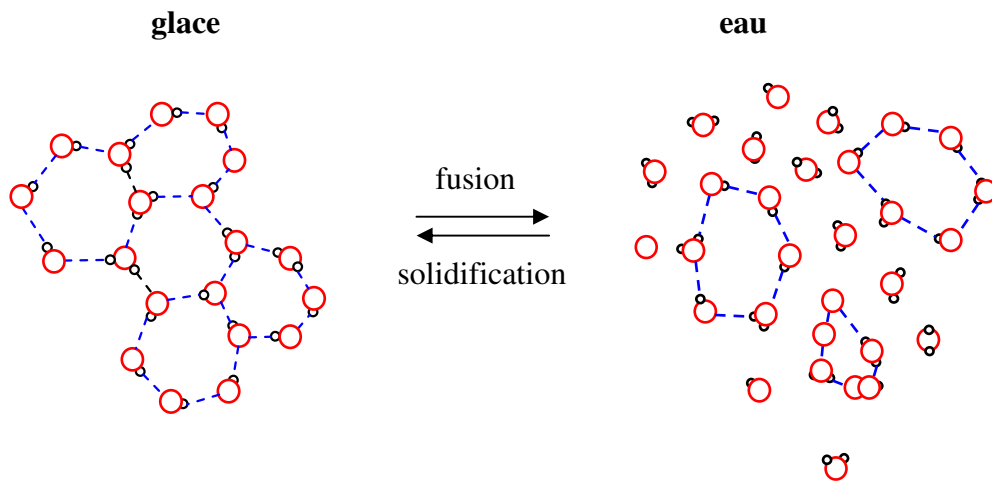
Exemple



2.3.2.2 Changement d'état

Un changement d'état s'interprète comme la modification de l'énergie potentielle d'interactions microscopiques entre les particules. Un changement d'état s'effectue à température constante.

Exemple



2.3.2.3 Energie interne

L'énergie interne « U » d'un système est égal à la somme de :

- l'énergie cinétique microscopique de chaque particule du système
- l'énergie potentielle d'interactions microscopiques entre les particules

2.3.2.4 Transfert thermique

L'énergie interne d'un système peut être modifiée par :

- le travail mécanique (déjà vu plus haut) ou électrique
- le transfert thermique qui intervient dès qu'il existe une différence de température. L'énergie est toujours transférée du chaud vers le froid.

Le transfert thermique s'effectue de trois manières différentes :

a La conduction

La conduction est un transfert d'énergie sans déplacement de matière. L'énergie cinétique microscopique se transmet lors de chocs entre particules voisines.

Exemple la main posée sur un objet chaud

b La convection

Le transfert thermique est provoqué par le déplacement d'un fluide qui transporte avec lui l'énergie cinétique microscopique des particules qu'il contient.

Exemple un sèche cheveux déplaçant de l'air chauffé

c Le rayonnement

Quelle que soit sa température, un corps émet un rayonnement qui peut se propager dans le vide. C'est ce rayonnement qui transfère de l'énergie entre deux corps séparés par un milieu transparent.

Exemple la surface du Soleil émettant surtout de la lumière visible qui se propage jusque la Terre.

2.3.2.5 Capacité thermique

On peut quantifier la variation d'énergie interne « ΔU » d'un corps de masse « m » en fonction de sa variation de température « $\Delta \theta$ ».

$$\boxed{\Delta U = m * c_p * \Delta \theta} \quad (\text{il n'y a pas de changement d'état})$$

« c_p » est appelée capacité thermique massique du corps

2.3.2.6 Flux thermique

Le flux thermique évalue la vitesse du transfert thermique à travers une surface.

Le flux thermique Φ s'obtient en divisant la quantité d'énergie Q du transfert thermique par sa durée Δt :

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

2.3.2.7 Résistance thermique d'une paroi plane

Dans le cas où les faces de la paroi sont maintenues chacune à une température constante, la relation entre le flux thermique Φ et l'écart de température $\Delta \theta$ entre ses deux faces est :

$$\Delta \theta = R_h * \Phi$$

R_h est appelée résistance thermique de la paroi. Plus sa valeur est grande, plus la paroi s'oppose au transfert thermique.

2.3.2.8 Notion d'irréversibilité

Il est très simple de convertir le travail en transfert thermique.

Exemple allumer un feu en frottant du bois sec

Il est impossible de convertir totalement ce même transfert thermique en travail.

Exemple comment faire bouger du bois avec un feu ?

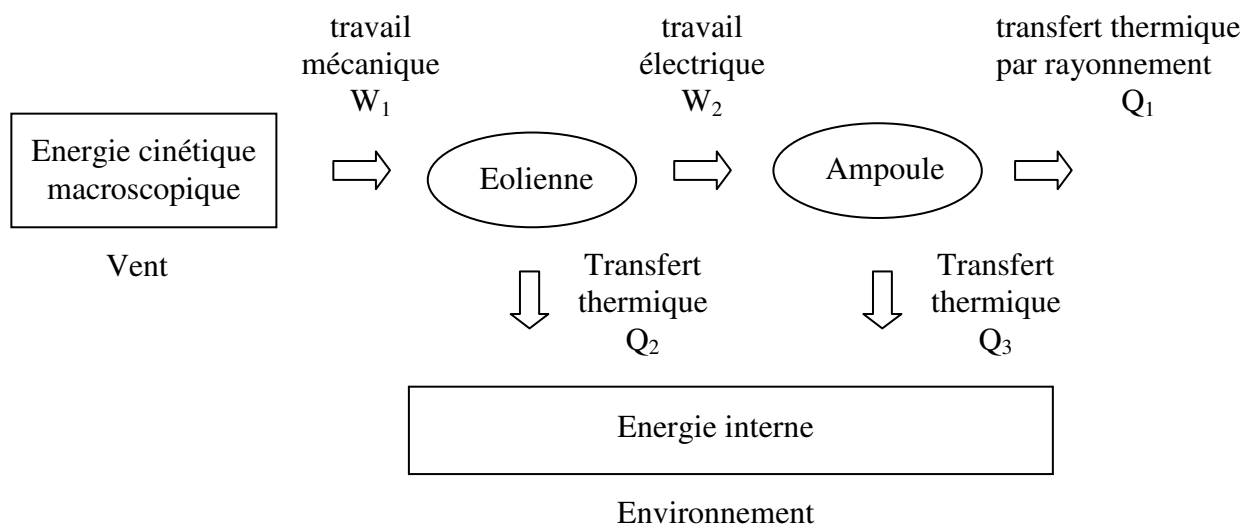
La conversion ne peut être inversée : il y a irréversibilité. Ceci justifie le qualificatif donné au transfert thermique d'être une dégradation de l'énergie.

2.3.2.9 Bilans d'énergie

L'énergie interne d'un système varie s'il échange de l'énergie avec son environnement par travail ou par transfert thermique :

$$\Delta U = W + Q$$

Exemple l'énergie liée à la vitesse du vent, transformée en électricité, peut être utilisée pour l'éclairage. Cette série de transformations forme une chaîne énergétique :



Bilan d'énergie appliqué au système { Eolienne } : $\Delta U = W_1 - W_2 - Q_2$

2.3.3 Transferts quantiques d'énergie

2.3.3.1 Energie d'un photon

On a vu en 1S que l'énergie d'un photon est donnée par la relation d'Einstein :

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

L'énergie d'un photon est donc proportionnelle à la fréquence de l'onde qui lui est associée. Un photon de grande énergie a une fréquence élevée (ou une longueur d'onde faible).

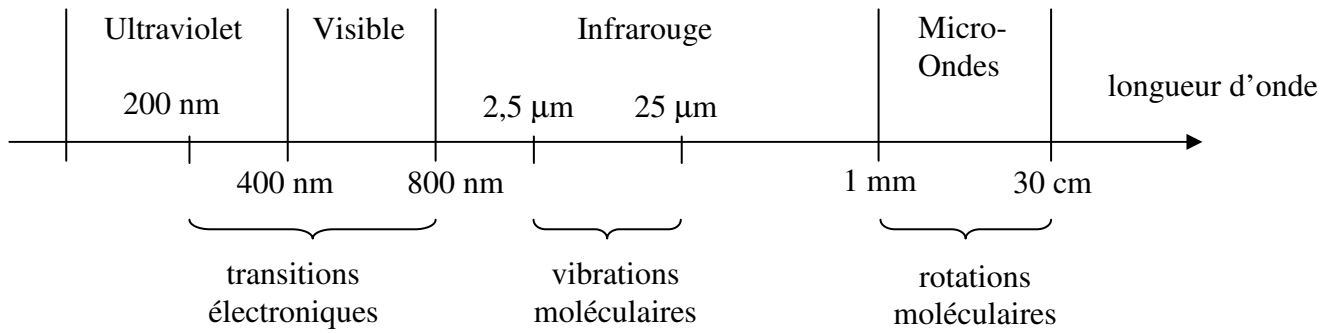
2.3.3.2 Transitions d'énergie électronique et vibratoire

On peut approximativement diviser en trois le mouvement des particules constituant une molécule :

- translations et rotations de la molécule elle-même
- vibrations des atomes
- mouvements des électrons

L'énergie nécessaire pour provoquer ces mouvements ne peut prendre que certaines valeurs (on dit qu'elle est quantifiée). Un peu comme lorsque l'on monte un escalier en passant d'une marche à une autre (on ne peut pas monter d'une demi marche ...).

Un photon frappant une molécule peut transporter l'énergie nécessaire pour la mettre en mouvement. L'effet dépend de l'énergie du photon et donc de la longueur d'onde qui lui est associée :



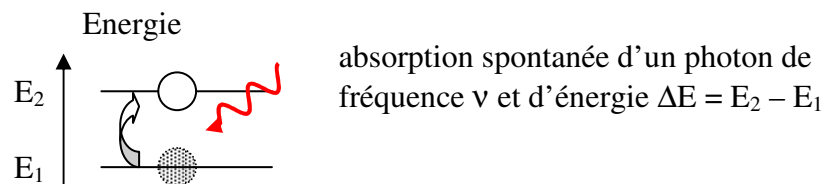
2.3.3.3 Emission et absorption d'énergie par les atomes

L'électron d'un atome peut changer de couche et passer à un niveau d'énergie différent. Lors de cette transition électronique, du travail ou du transfert thermique sont échangés avec l'environnement.

Dans cette partie, on s'intéressera uniquement aux transitions associées au transfert thermique par rayonnement. Lors de cette transition, trois mécanismes sont toujours présents en même temps :

a Absorption spontanée

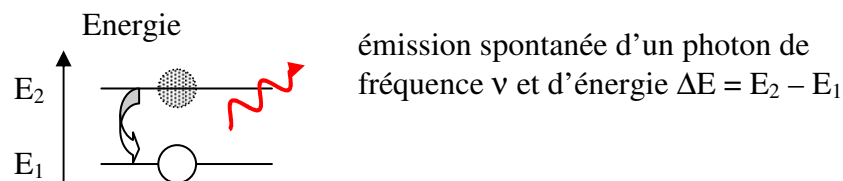
Pour passer à un état excité, l'atome peut absorber de l'énergie sous forme de rayonnement. C'est à dire par absorption d'un photon.



Remarque si l'atome reçoit un photon d'énergie inférieure ou supérieure à $(E_2 - E_1)$, la transition n'a pas lieu.

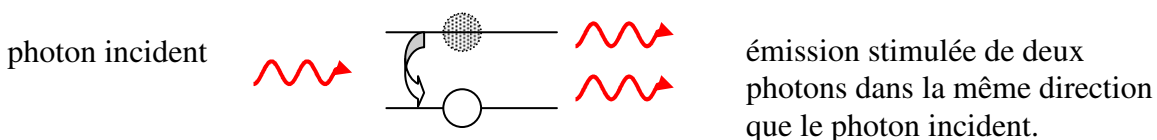
b Emission spontanée

L'atome excité est instable. Il évolue, plus ou moins rapidement, vers un état plus stable. C'est-à-dire un état de plus faible énergie. Il restitue sous forme d'un photon cette différence d'énergie. Le photon est émis dans n'importe quelle direction



c Emission stimulée

Par l'action d'un photon incident, un atome peut se désexciter en émettant un photon dit « stimulé » dont les propriétés sont exactement les mêmes que le photon incident.



2.3.3.4 Amplification d'une onde lumineuse

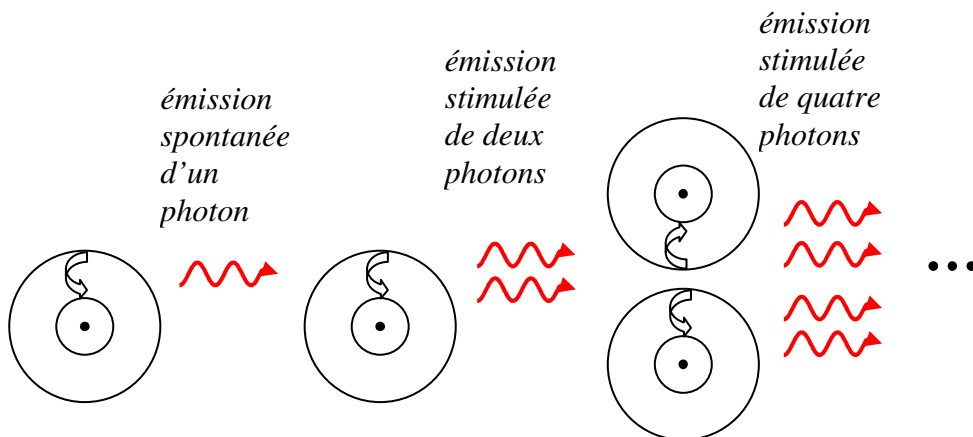
Pour la lumière visible, le phénomène d'émission spontanée est beaucoup plus important que le phénomène d'émission stimulée. Les atomes excités disparaissent rapidement.

On enferme donc les atomes dans une cavité permettant à un rayon lumineux d'effectuer de nombreux aller retours (il y a des miroirs aux deux extrémités).

Exemple avec une cavité de l'ordre de 20 cm, le rayon lumineux fait environ 10^9 allers retours en 1s. On a un oscillateur optique.

On transfère constamment, aux atomes de la cavité, de l'énergie pour les amener à l'état excité.

Tôt ou tard, un photon émis par émission spontanée aura une trajectoire perpendiculaire aux miroirs. En rencontrant une particule excitée, il va stimuler l'émission d'un deuxième photon. Les deux photons identiques peuvent à leur tour stimuler d'autres émissions de photons et ainsi de suite ...



A chaque aller-retour du rayon lumineux dans la cavité, le nombre de photons stimulés augmente. Le rayonnement issu de l'émission stimulée devient prépondérant devant celui provenant de l'émission spontanée, qui lui part dans toutes les directions.

C'est l'amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement (Light Amplification Stimulated Emission Radiation) ou effet laser.

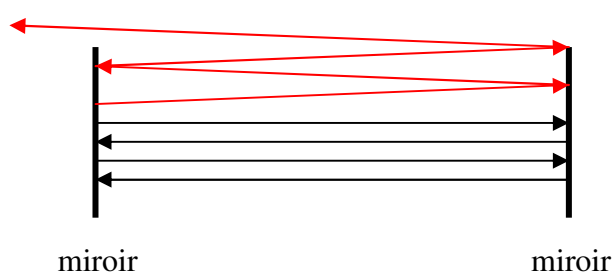
Un des deux miroirs n'est pas complètement réfléchissant, ce qui fait qu'à partir d'une certaine puissance le faisceau finit par émerger de manière appréciable.

2.3.3.5 Propriétés du laser

C'est la cavité qui donne au rayonnement laser ses propriétés particulières :

a Directivité

La cavité sélectionne uniquement les rayons lumineux qui ont la direction de son axe. Le faisceau laser est très peu divergent (il est très directif).

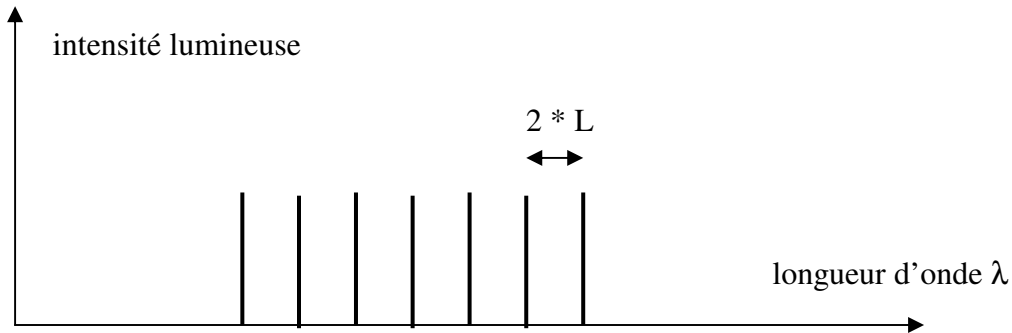


b Monochromaticité

La cavité a un rôle de filtre sur le spectre de la lumière émise par le laser. Seules des ondes de certaines longueurs d'onde peuvent s'y propager. Ces longueurs d'onde sont telles que :

$$\lambda = \frac{2 * L}{k} \quad \text{« k » est un entier et « L » la longueur de la cavité}$$

Le spectre de la lumière émise par le laser ressemble à un peigne de longueurs d'onde régulièrement espacées :



Il est possible de sélectionner une seule longueur d'onde parmi celles qui peuvent exister à l'aide de filtres insérés dans la cavité.

2.3.4 Dualité onde-particule

2.3.4.1 Effet photoélectrique

On a vu en 1S que :

- un métal soumis à un rayonnement lumineux riche en ultraviolets peut perdre des électrons. C'est l'effet photoélectrique.
- si la lumière qui arrive sur le métal ne contient pas d'ultraviolets, l'effet photoélectrique ne se manifeste pas (même si la lumière est très intense).

On doit postuler que, dans cette expérience, l'énergie transportée par la lumière dépend de sa fréquence ($E = h * \nu$) et non de son amplitude.

Par ailleurs, on observe un effet de seuil : les électrons ne sont éjectés du métal qu'au-dessus d'une certaine fréquence. La lumière a donc un aspect discontinu (sous forme de paquets d'énergie de valeur bien déterminée comme l'avait formulé Planck quelques années auparavant).

Einstein montre que ces phénomènes peuvent être expliqués si l'énergie est transportée par la lumière sous forme discontinue (des « quanta lumineux » dira Einstein).

Le « quanta » a une énergie suffisante pour arracher un électron (cas du quanta d'énergie ultraviolet) ou le quanta a une énergie insuffisante pour arracher un électron et rien ne se passe (l'échange d'énergie n'a pas lieu).

Plus tard, le nom de « photon » s'imposera pour nommer le « quanta lumineux ».

2.3.4.2 Diffraction de la lumière

On a vu que la diffraction est un phénomène très général qui concerne toutes les ondes (mécaniques, sonores, lumineuses, ...).

Ainsi, l'observation de la diffraction de la lumière conduit à penser que le photon est une onde.

2.3.4.3 Aspects ondulatoire et particulaire

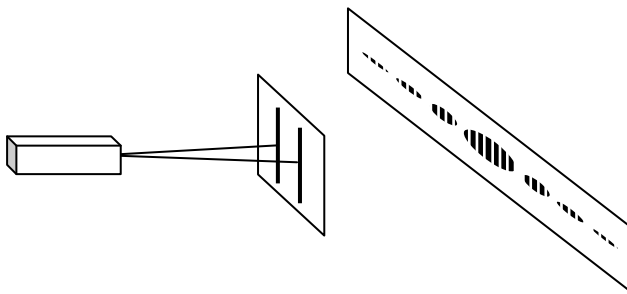
La lumière présente des aspects d'une onde et d'une particule. C'est ce que l'on appelle la dualité « onde particule ».

La métaphore du cylindre montre qu'un cylindre n'est ni un rond ni un rectangle. Selon une certaine direction, il apparaît comme un rond, selon une autre, comme un rectangle, mais ce n'est ni l'un ni l'autre.

De la même manière, le photon n'est ni une onde, ni une particule mais un exemple d'objet quantique.

2.3.4.4 Interférences photon par photon

On a vu que là où deux ondes de même mêmes fréquences « se rencontrent » il y a interférence : on observe des franges alternativement brillantes et sombres :



franges d'interférence de deux ondes issues d'un même pinceau laser et séparées par deux fentes identiques (fentes d'Young)

Si l'on utilise une source lumineuse capable d'émettre un photon à la fois, la figure d'interférence demeure visible. Elle est alors constituée d'un brouillard de points lumineux dont la densité varie en suivant l'intensité des franges d'interférence :



Les photons sont soumis à des lois probabilistes. Seule l'étude d'un grand nombre de photons permet d'établir un comportement.

2.3.4.5 Relation de de Broglie

En 1924, dans sa thèse, Louis de Broglie affirma que toute matière (et pas seulement la lumière) a une nature ondulatoire. Il associa la quantité de mouvement « p » d'une particule à une longueur d'onde « λ », appelée longueur d'onde de de Broglie :

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \text{avec } p = m * v$$

Cette relation ($\lambda = h / p$) implique que l'aspect ondulatoire de la matière n'est observable que pour des objets de masse très faible comme l'électron ou le neutron.

Exemple un grain de poussière de masse $1,0 \cdot 10^{-15}$ kg et de vitesse $1,0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a une longueur d'onde de de Broglie de $6,6 \cdot 10^{-16}$ m.

Le phénomène de diffraction est observable lorsque la dimension de l'ouverture est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de de Broglie.

Ainsi l'observation d'un comportement probabiliste du grain de poussière à la traversée d'une ouverture nécessiterait un orifice de dimension inférieure à tout objet connu.

2.3.4.6 Particule matérielle et onde de matière

On retrouve la dualité onde-particule avec l'électron ou toute autre particule matérielle.

Le microscope électronique possède une résolution et un grossissement très supérieurs aux microscopes optiques.

Ces qualités sont dues au fait que la longueur d'onde de Broglie d'un électron est beaucoup plus petite que celle d'un photon de lumière visible.

Exemple un électron de masse $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg dont la vitesse est de $7,0 \cdot 10^6$ m.s⁻¹ a une longueur d'onde de de Broglie de $1,0 \cdot 10^{-10}$ m.

Cette longueur d'onde est bien ajustée à l'échelle des atomes que l'on veut explorer.

3 Agir

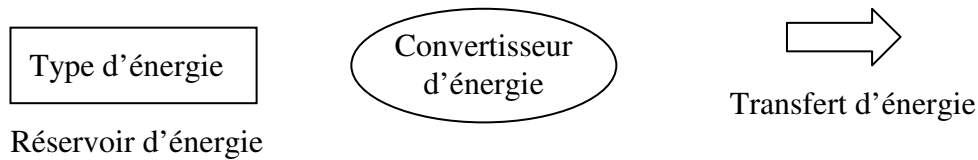
3.1 Economiser les ressources et respecter l'environnement

3.1.1 Enjeux énergétiques

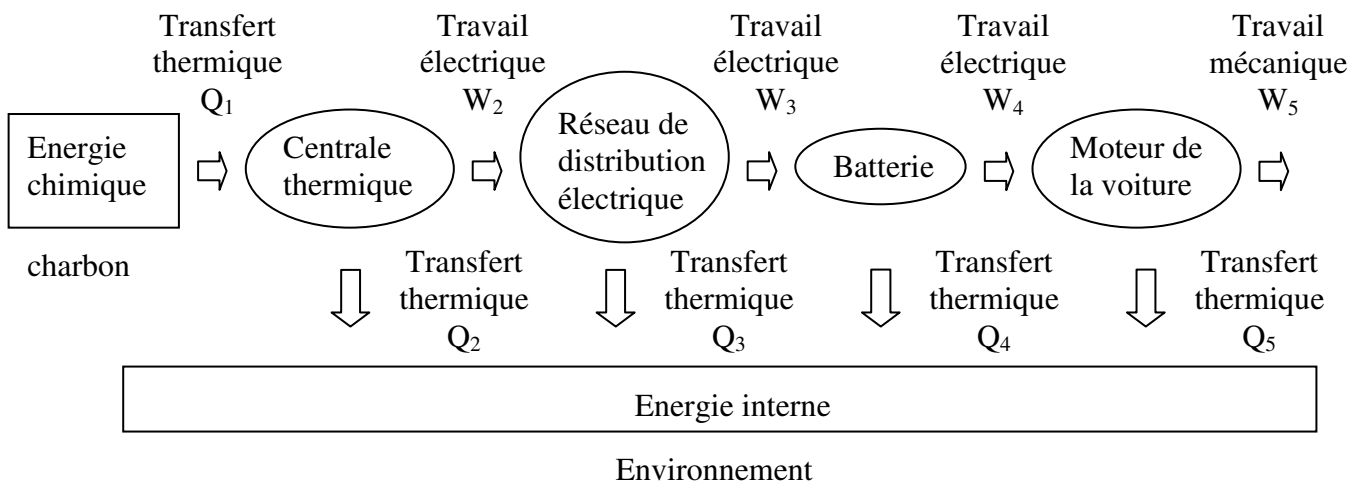
3.1.1.1 Chaîne énergétique

On a vu en 1S qu'une chaîne énergétique permet de représenter graphiquement les transferts d'énergie entre différents systèmes.

Notations associées à une chaîne énergétique :



Exemple de chaîne énergétique dans le domaine du transport

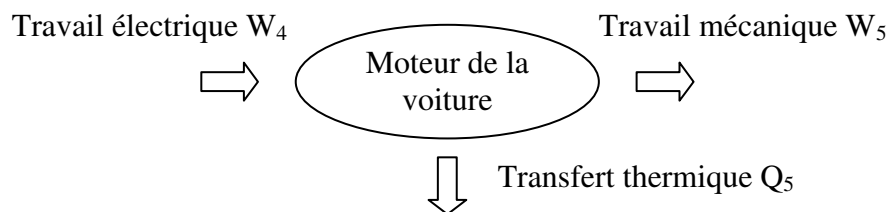


3.1.1.2 Notion de rendement de conversion

On a vu en 1S que le rendement « η » indique la part de l'énergie convertie jugée utile par l'utilisateur :

$$\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie reçue}}$$

Exemple un moteur de électrique de voiture convertit le travail électrique qu'il reçoit sous forme de chaleur et de travail mécanique :



En considérant que l'énergie utile convertie par le moteur est le travail mécanique alors le rendement est : $\eta = \frac{W_5}{W_4} = 0,80$.

Exemple Le rendement d'une transformation est toujours inférieur à 1. Pour un enchaînement de transformations le rendement global est : $\eta = \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 \dots$

Pour la chaîne énergétique de la voiture électrique, on a :

- rendement d'une centrale thermique au charbon $\eta_1 = 0,50$
- les pertes de distribution de l'électricité sont de 8 % ($\eta_2 = 0,92$)
- le stockage de l'électricité dans la batterie fait perdre 20 % de l'électricité ($\eta_3 = 0,80$)
- rendement du moteur $\eta_4 = 0,80$

$$\eta = \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \eta_4 = 0,50 * 0,92 * 0,80 * 0,80 \cong 0,30$$

3.1.2 Apport de la chimie au respect de l'environnement

3.1.2.1 La chimie durable

a Concept

Le concept de « chimie durable (ou verte) » est une idée récente. Elle a été définie en 1998 par deux chimistes américains : Paul Anastas et John Warner.

L'idée est de développer des processus chimiques et des produits non polluants.

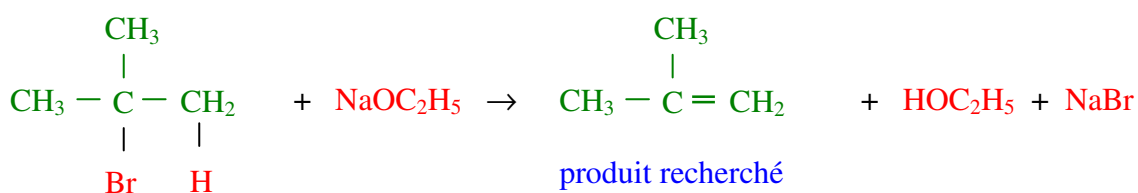
En pratique, la chimie verte propose de :

- trouver des substituts aux matières premières dangereuses ou non renouvelables
- concevoir des processus chimiques qui réduisent les déchets et qui consomment peu d'énergie

Ces pratiques nouvelles doivent préserver la croissance économique et l'innovation tout en fournissant des produits et des services abordables à une population mondiale grandissante.

b Economie d'atomes

Exemple réaction de déhydrohalogénéation du 2-bromo-2-méthylpropane par l'éthanolate de sodium



On classe les atomes des réactifs en deux catégories : ceux qui sont incorporés dans le produit recherché (en vert) et ceux qui se retrouvent dans des sous-produits indésirables (en rouge).

Dans l'exemple ci-dessus, seuls 27 % en masse des atomes des réactifs sont incorporés dans le produit recherché. Les 73 % qui restent constituent des déchets qu'il faudra séparer puis traiter pour les recycler ou les détruire, avec un impact environnemental et financier important.

Il est donc souhaitable d'optimiser le procédé de fabrication du produit recherché. L'utilisation d'un catalyseur permet, le plus souvent, d'optimiser l'efficacité du procédé.

3.1.2.2 La valorisation du dioxyde de carbone

a Effet de serre

On a vu en 1S que le dioxyde de carbone est produit lors de tous les processus de combustion. La concentration atmosphérique de ce gaz a augmenté d'environ 21 % depuis 1957.

Le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère est responsable de « l'effet de serre ».

Il est donc nécessaire, d'un point de vue écologique, de diminuer la quantité de dioxyde de carbone émise dans l'atmosphère. Deux solutions sont possibles : stocker ou valoriser le dioxyde de carbone.

b Stocker le dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone émis par les transports et l'habitat est trop diffus pour qu'il puisse être capté et stocké. Seules les grandes sources industrielles peuvent le faire (cimenterie, aciérie, raffinerie, centrale thermique).

Il s'agit d'enfouir dans le sous-sol du dioxyde de carbone préalablement « capté » en sortie d'installations industrielles. C'est un procédé qui n'est pas aujourd'hui économiquement rentable.

c Valoriser le dioxyde de carbone

La valorisation du dioxyde de carbone est une autre solution. Plusieurs procédés sont possibles :

- Valorisation sans transformation du dioxyde de carbone

Récupération assistée des hydrocarbures (injection dans les puits de pétrole afin d'augmenter le volume extrait).

Remplacement de gaz réfrigérants ou de solvants (CO₂ supercritique).

- Valorisation par transformation chimique

Ajouter un composant réactif au dioxyde de carbone afin de générer une réaction chimique pour obtenir un produit utile ou un produit énergétique.

- Valorisation par transformation biologique

Cultiver des microalgues qui absorbent du dioxyde de carbone pour pousser.

Utiliser des enzymes pour stimuler une réaction chimique et convertir le dioxyde de carbone en molécules intéressantes (biocatalyse).

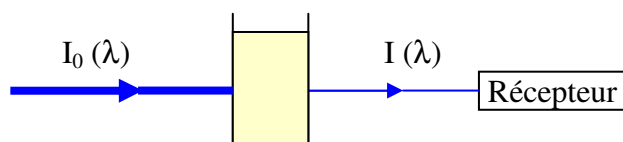
3.1.3 Contrôle de la qualité par dosage

Doser une espèce dans une solution consiste à déterminer la concentration molaire de cette espèce.

3.1.3.1 Dosage de solutions par étalonnage

a Dosage avec un spectrophotomètre

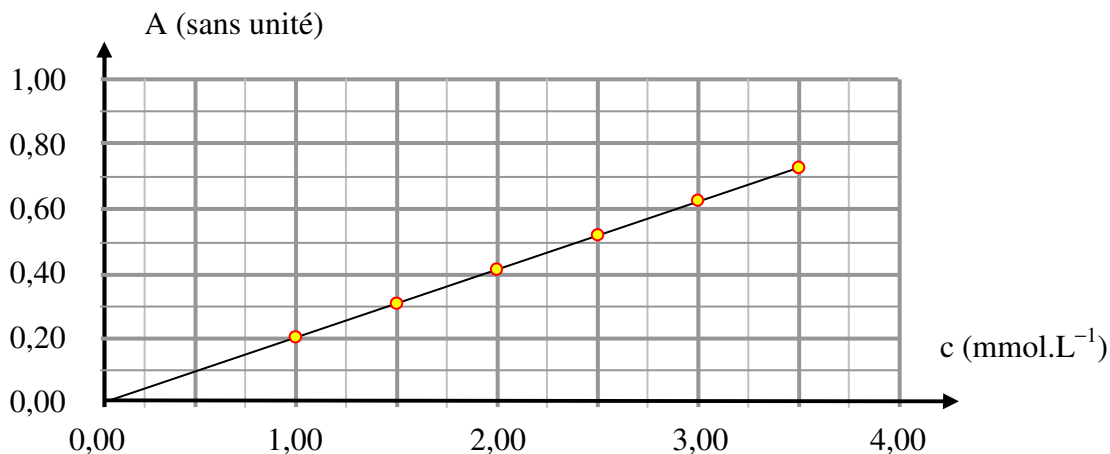
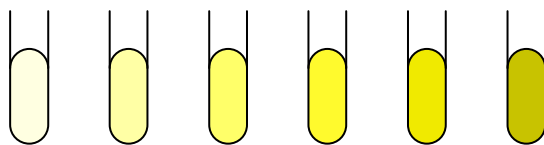
Cette méthode de dosage peut-être utilisée lorsque la solution à doser est colorée.



Une lumière incidente monochromatique de longueur d'onde « λ » et d'intensité lumineuse « I_0 » frappe une cuve de largeur « L » contenant une solution colorée. L'intensité lumineuse « I » sortant de la cuve est reçue par un récepteur. On définit l'absorbance « A » de la solution colorée par :

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

La courbe d'étalonnage montre comment l'absorbance « A » est liée à la concentration molaire « c » du soluté coloré :

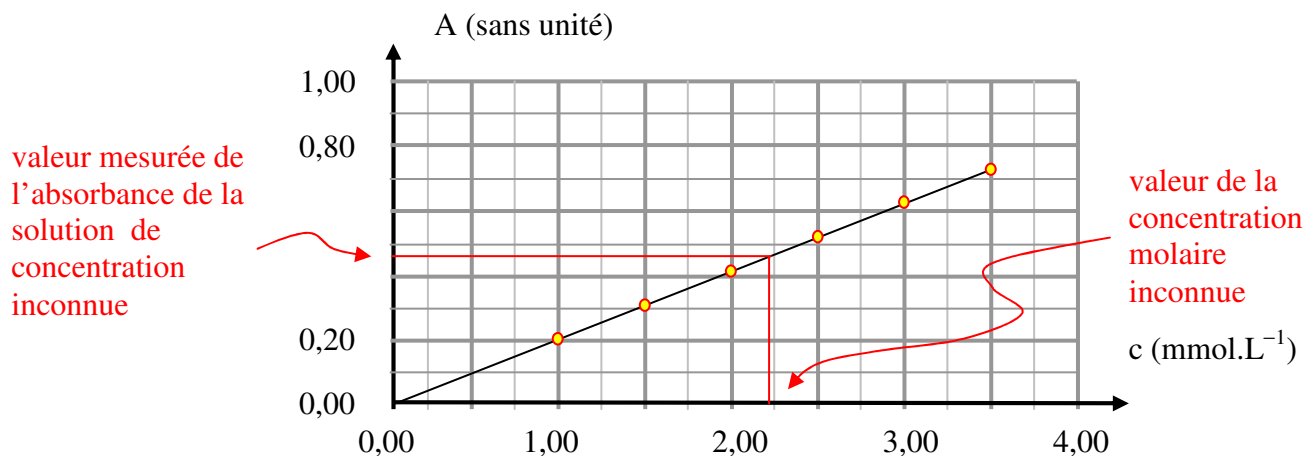


Cette courbe d'étalonnage suggère que l'absorbance « A » d'une solution colorée est proportionnelle à la concentration molaire « c » en soluté :

$$A = k * c$$

Remarque la relation précédente, nommée loi de Beer-Lambert, est vérifiée si la concentration molaire « c » est suffisamment faible (en pratique $c < 10 \text{ mmol.L}^{-1}$)

La courbe d'étalonnage peut être utilisée pour déterminer une concentration inconnue (mêmes espèces, mêmes conditions expérimentales).

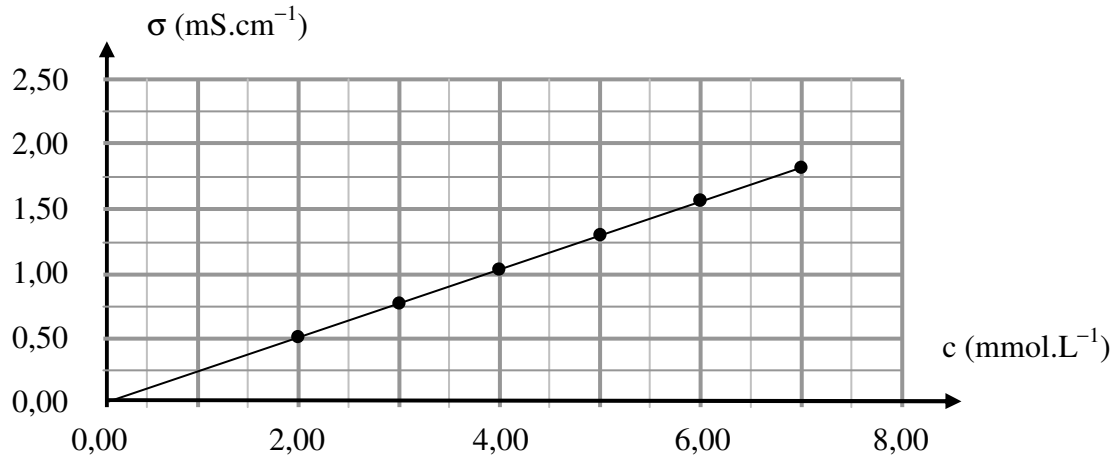


b Dosage avec un conductimètre

Cette méthode de dosage peut-être utilisée lorsque la solution à doser contient des ions.

La conductimétrie consiste à mesurer la conductivité électrique « σ » (prononcer « sigma ») d'une solution ionique et à en tirer des renseignements sur sa composition.

La courbe d'étalonnage ci-dessous montre comment la conductivité électrique « σ » est liée à la concentration molaire « c » du soluté :



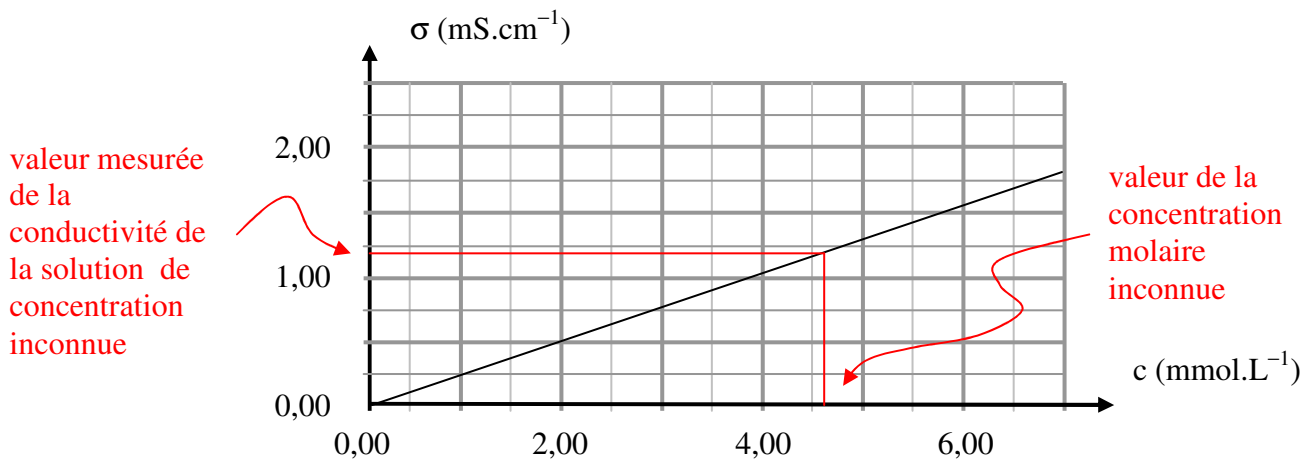
Cette courbe d'étalonnage suggère que la conductivité « σ » d'une solution ionique est proportionnelle à la concentration molaire « c » en soluté :

$$\sigma = k * c$$

« k » est une constante qui ne dépend que de la nature du soluté et de la température.

Remarque la relation précédente, nommée loi de Kohlrausch, est vérifiée si la concentration molaire « c » est suffisamment faible (en pratique $c < 10$ mmol.L⁻¹)

La courbe d'étalonnage peut être utilisée pour déterminer une concentration inconnue (mêmes ions, mêmes conditions expérimentales).



3.1.3.2 Dosages par titrage direct

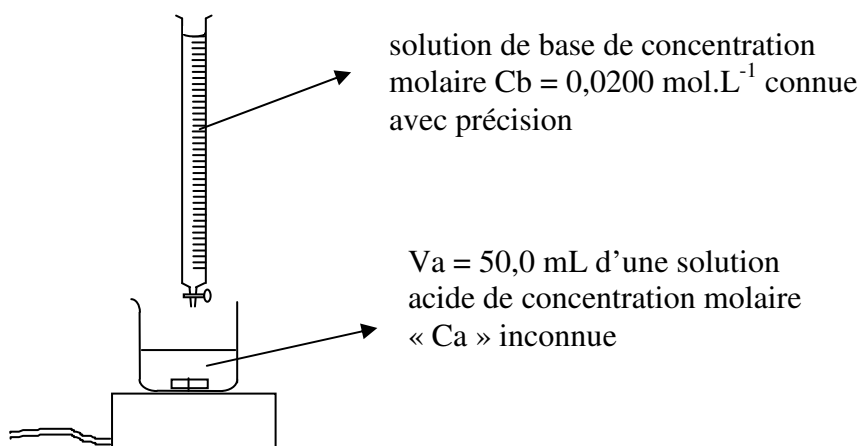
Le dosage par titrage direct est une méthode mettant en oeuvre une réaction chimique entre l'espèce à doser (ou réactif titré) et une autre espèce appelée le réactif titrant.

La réaction de titrage doit être totale (elle s'effectue dans un seul sens) et si possible rapide.

a Notion d'équivalence

On verse la solution contenant le réactif titrant (de concentration molaire connue), dans la solution contenant le réactif titré (de concentration molaire inconnue).

Exemple



Le réactif titrant est versé jusqu'à ce qu'il ait totalement réagi. On dit alors qu'on est à l'équivalence.

A l'équivalence, le réactif titré et le réactif titrant ont été entièrement consommés. L'avancement x de la réaction de dosage atteint alors sa valeur maximale x_{\max} .

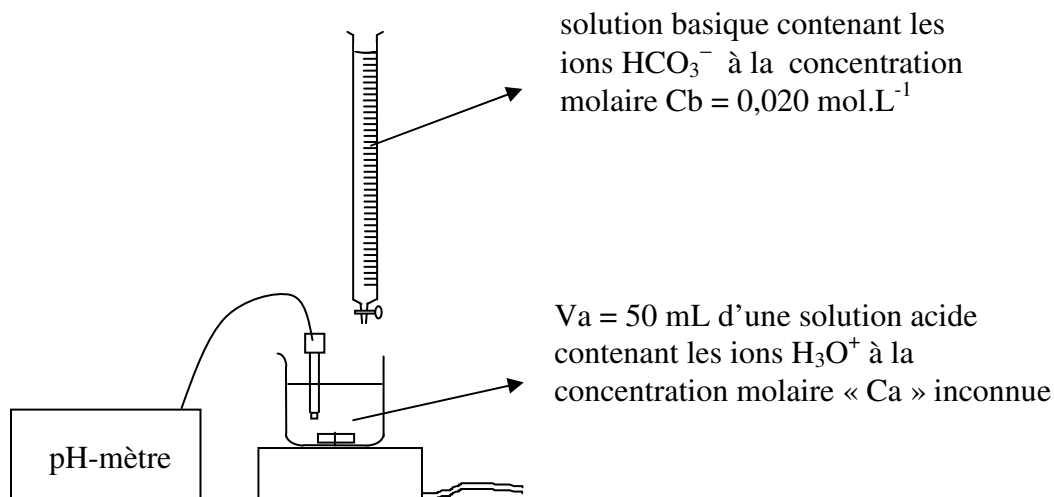
{ en mol. }	avanct	a A	+	b B	→	c C	+	d D
état initial	0	$C_A * V_A$		$C_B * V_{B_éq}$		0		0
état intermédiaire	x	$C_A * V_A - a * x$		$C_B * V_{B_éq} - b * x$		$c * x$		$d * x$
équivalence	x_{\max}	$C_A * V_A - a * x_{\max} = 0$		$C_B * V_{B_éq} - b * x_{\max} = 0$		$c * x_{\max}$		$d * x_{\max}$

On voit qu'à l'équivalence, on a : $\frac{c_A * V_A}{a} = \frac{c_B * V_{B_éq}}{b}$ et on en déduit « C_A ».

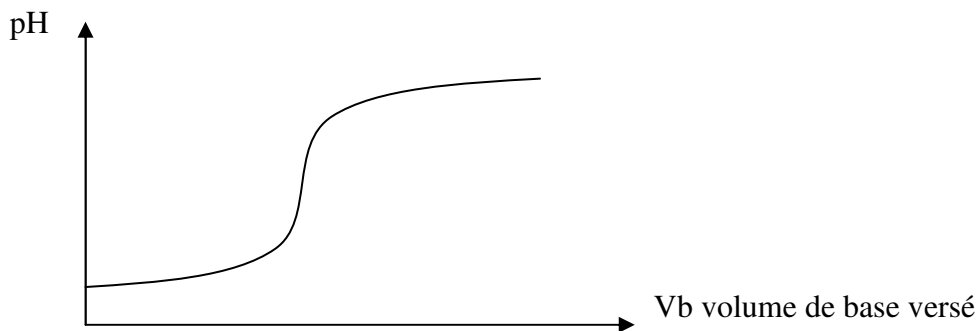
b Repérage de l'équivalence pour un titrage pH-métrique

Pour réaliser le titrage d'un acide par une méthode pH-métrique, on utilise un pH-mètre permettant, tout au long du dosage, de mesurer le pH de la solution contenue dans le bécher ainsi que le volume de base versé.

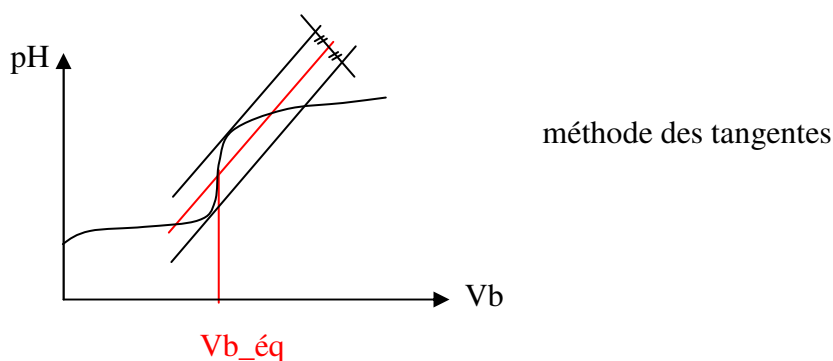
Exemple



La courbe d'évolution du pH présente une zone particulière, nommée « saut de pH », pour laquelle le pH s'élève brutalement :



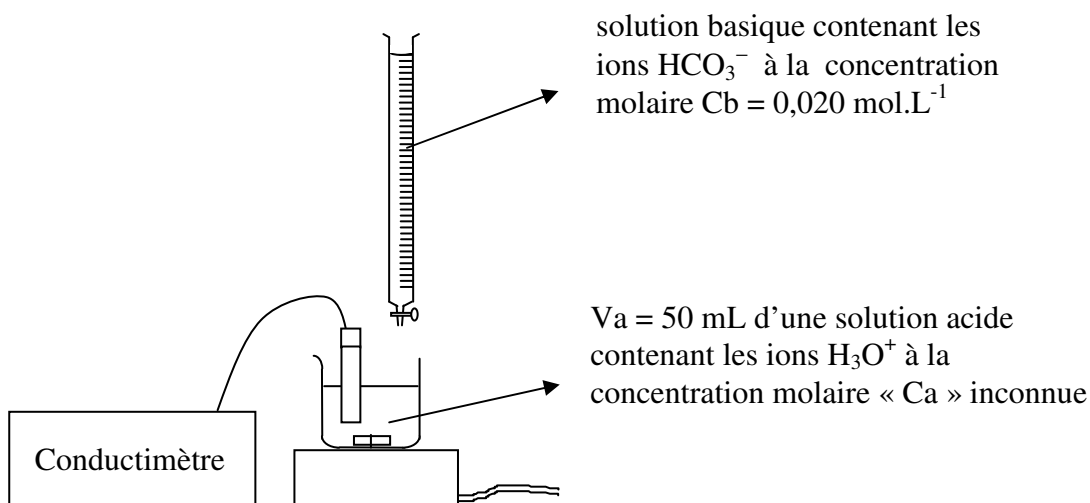
Une méthode de détermination du point d'équivalence à partir de la courbe $\text{pH} = f(V_b)$, nommée « méthode des tangentes », consiste à tracer deux tangentes parallèles de part et d'autre du saut de pH, puis de tracer une troisième droite équidistante et parallèle aux deux premières :



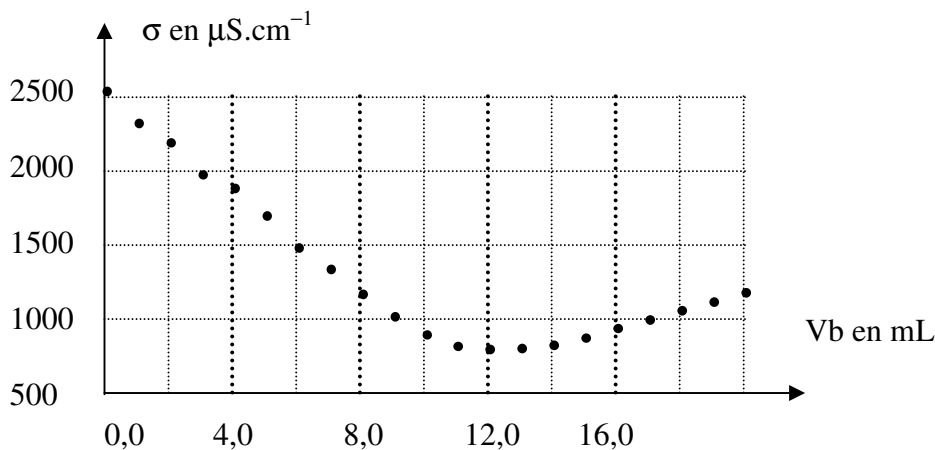
c Repérage de l'équivalence pour un titrage conductimétrique

Pour réaliser le titrage d'un acide par une méthode conductimétrique, on utilise un conductimètre permettant, tout au long du dosage, de mesurer la conductivité « σ » de la solution contenue dans le bécher ainsi que le volume de base versé.

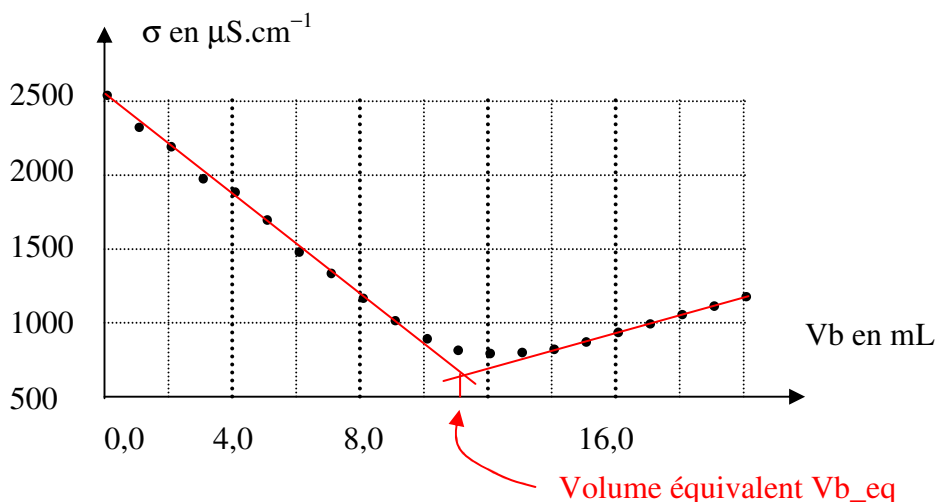
Exemple



La courbe d'évolution de la conductivité est constituée approximativement de deux droites :



Le point d'intersection de ces deux droites permet de repérer l'équivalence du dosage :



Les ions contenus dans le bécher participent chacun à la conductivité de la solution.

Notons « λ » (nommée conductivité molaire ionique) la contribution d'un ion à la conductivité « σ » d'une solution ionique, on a :

$$\sigma = \sum_i \lambda_i * [X_i] \quad \text{avec } [X_i] \text{ en mol.m}^{-3}$$

Exemple conductivité d'une solution de chlorure de magnésium :

$$\sigma (\text{Mg}^{2+} + 2\text{Cl}^-) = \lambda (\text{Mg}^{2+}) * [\text{Mg}^{2+}] + \lambda (\text{Cl}^-) * [\text{Cl}^-]$$

Remarque Les ions H_3O^+ et OH^- (aq) ont des conductivités molaires ioniques nettement supérieures à celles des autres ions.

On rappelle l'équation-bilan de la réaction : $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{HCO}_3^- (\text{aq}) \rightarrow \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$

Avant l'équivalence les ions oxonium H_3O^+ présents dans le bécher sont consommés par les ions hydrogénocarbonate HCO_3^- apportés : la conductivité diminue.

Après l'équivalence les ions H_3O^+ ont tous réagi. La réaction chimique support du dosage est terminée. La solution basique, versée à l'aide de la burette, apporte des ions HCO_3^- et des ions Na^+ : la conductivité augmente.

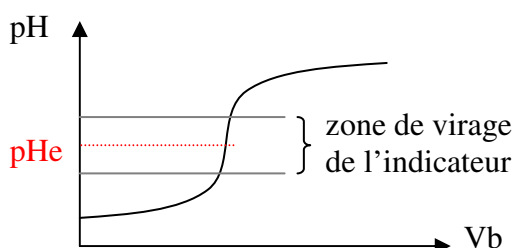
d Repérage de l'équivalence par utilisation d'un indicateur de fin de réaction

Les indicateurs colorés changent de couleur dans une zone de pH bien définie.

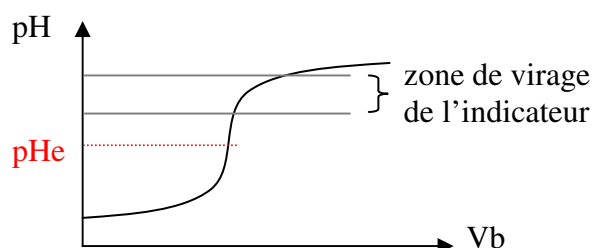
Exemples

	couleur en milieu acide	pH de la zone de virage	couleur en milieu basique
hélianthine	rouge	3,1 – 4,4	jaune
bleu de bromothymol (BBT)	jaune	6,0 – 7,6	bleu
phénolphthaleine	incolore	8,2 – 10,0	rouge

Si la zone de virage de l'indicateur coloré contient le pH à l'équivalence, il peut-être utilisé comme indicateur de fin de réaction :



choix correct de l'indicateur coloré



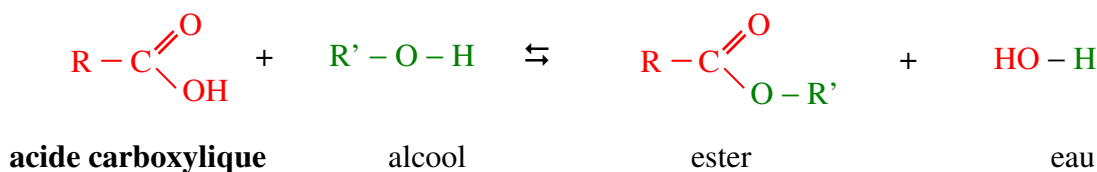
choix incorrect car la zone de virage ne contient pas le pH à l'équivalence

3.2 Synthétiser des molécules, fabriquer de nouveaux matériaux

3.2.1 Stratégie de la synthèse organique

On prendra dans cette partie, l'exemple de la réaction de synthèse d'un ester.

Un ester peut être obtenu par la réaction d'un acide carboxylique $R-CO_2H$ avec un alcool $R'-OH$ selon l'équation bilan :



Cette réaction, nommée « estérification », est équilibrée et lente.

a Choix du catalyseur

On ajoute un catalyseur pour augmenter la vitesse d'une réaction chimique sans modifier l'état d'équilibre du système.

Exemple l'ajout d'une faible quantité d'un acide fort augmente la vitesse d'estérification. La durée de la réaction est ainsi diminuée.

b Détermination des quantités des espèces mises en jeu

De nombreuses réactions sont équilibrées. Pour augmenter le rendement, on peut déplacer l'équilibre.

Déplacer l'équilibre c'est faire évoluer le mélange vers un nouvel état d'équilibre où les proportions des constituants sont différentes.

Exemple un des réactifs est bon marché

ajout d'un excès
d'alcool



alcool + acide

sens de
déplacement de
l'équilibre



eau + ester

Exemple un des produits est volatil

sens de
déplacement de
l'équilibre



alcool + acide

élimination de l'ester
par distillation



eau + ester

Le rendement « η » de la synthèse est donné par le quotient de la quantité finale d'ester obtenue (produit désiré) par la quantité maximale d'ester attendue :

$$\eta = \frac{n(\text{ester})}{n_{\text{max}}(\text{ester})}$$

c Choix des paramètres expérimentaux

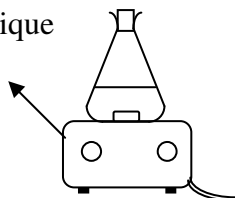
La température permet de modifier la vitesse d'une réaction chimique sans modifier l'état d'équilibre du système.

Exemple l'augmentation de la température augmente la vitesse d'estérification. La durée de la réaction est ainsi diminuée.

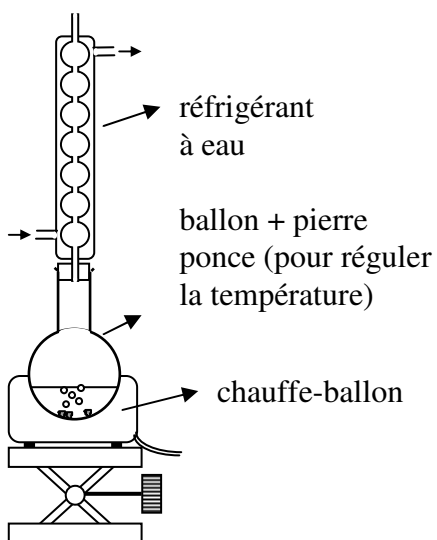
d Choix du montage

Exemples

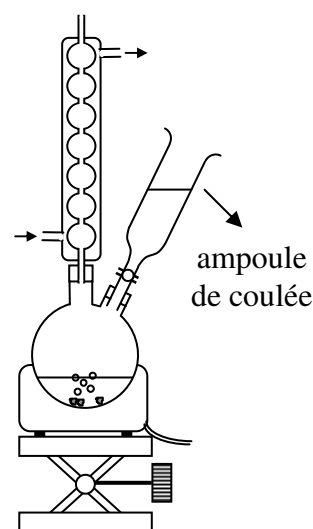
agitateur
magnétique



montage permettant
d'agiter le milieu à
froid



montage à reflux pour
augmenter la température
sans perte par vaporisation

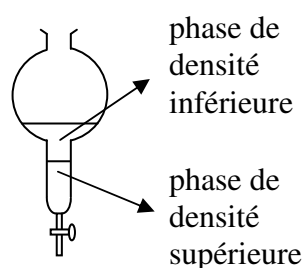


bicol muni d'une ampoule
de coulée (pour verser un
réactif au goutte-à-goutte)

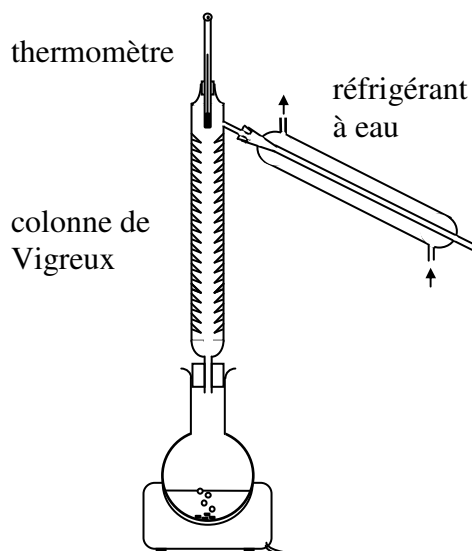
e Choix de la technique de purification

La purification consiste à éliminer les impuretés contenues dans le milieu réactionnel afin d'obtenir le produit désiré pur.

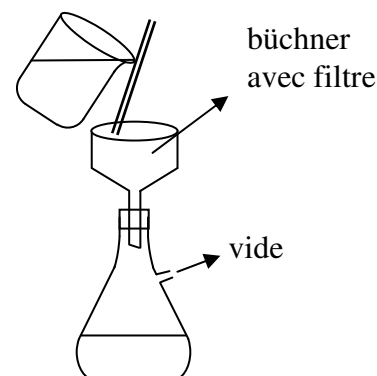
Les impuretés peuvent être des réactifs, des produits, le solvant, un catalyseur, ...



extraction liquide-liquide avec une ampoule à décanter (l'espèce chimique à purifier est plus soluble dans le solvant que dans le milieu réactionnel. Les deux phases ne sont pas miscibles)



distillation fractionnée (technique de séparation des constituants d'un mélange liquide homogène)



la filtration sépare les solides et les liquides

f Choix de l'analyse du produit

Différents types d'analyse permettent d'identifier et de contrôler la pureté du produit synthétisé : chromatographie sur couche mince (CCM), spectroscopies UV-visible, IR et RMN, température de fusion (avec un banc Koffler par exemple).

3.2.2 Sélectivité en chimie organique

3.2.2.1 Composé polyfonctionnel

Certaines molécules possèdent plusieurs groupes caractéristiques.

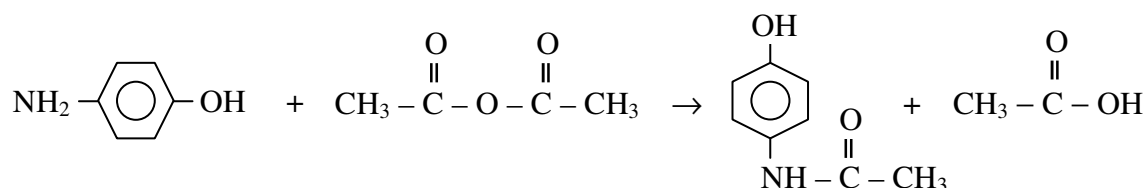
Exemple les acides aminés possèdent :

- le groupe caractéristique – COOH de la fonction acide carboxylique
- le groupe caractéristique – NH₂ de la fonction amine

3.2.2.2 Réactif chimiosélectif

Un réactif est chimiosélectif lorsqu'il ne réagit qu'avec un seul groupe caractéristique d'un composé polyfonctionnel.

Exemple l'anhydride d'acide acétique réagit avec le groupe caractéristique de la fonction amine de la molécule de para-aminophénol pour donner le paracétamol



Le groupe caractéristique de la fonction alcool de la molécule de para-aminophénol ne réagit pas.

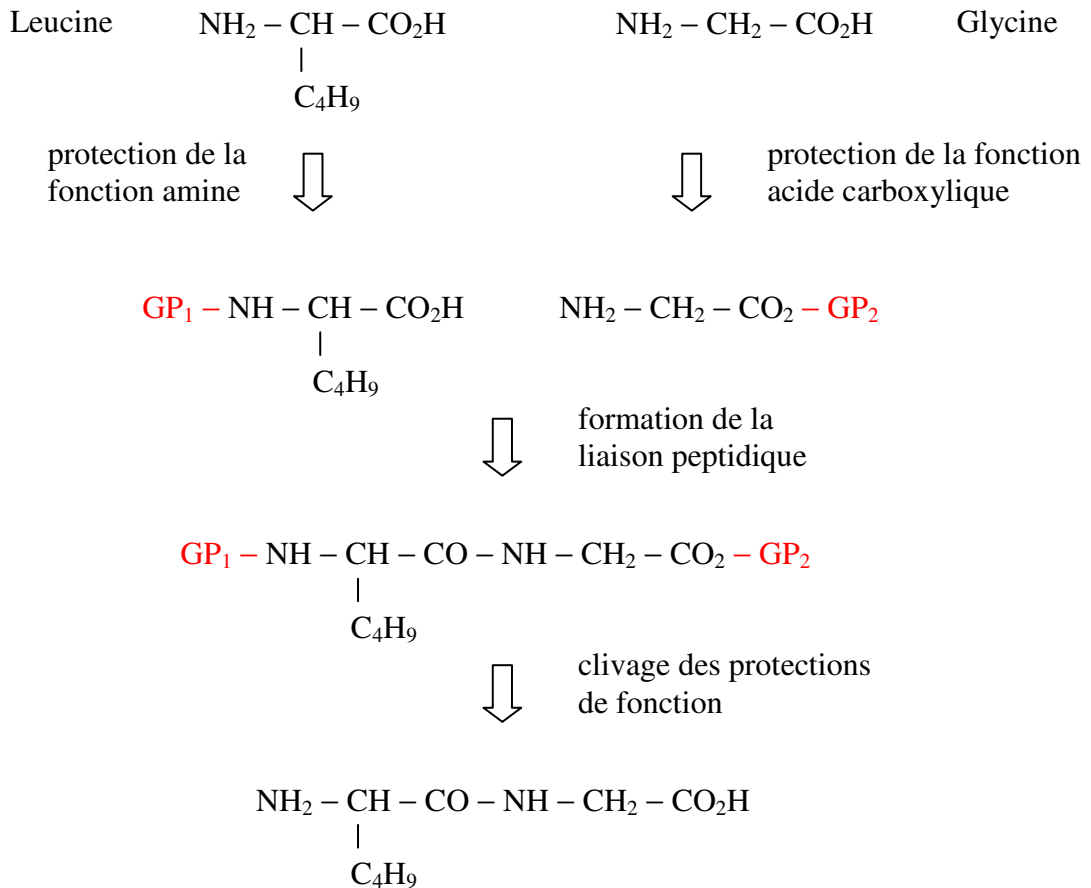
3.2.2.3 Protection de fonctions

La protection de fonctions a pour but de préserver un groupe caractéristique dans un composé polyfonctionnel.

On préserve un groupe caractéristique d'une molécule en le transformant temporairement en un autre groupe caractéristique.

Le groupe protecteur résiste aux réactions chimiques ultérieures que subit la molécule. Il est ensuite enlevé pour retrouver le groupe caractéristique initial.

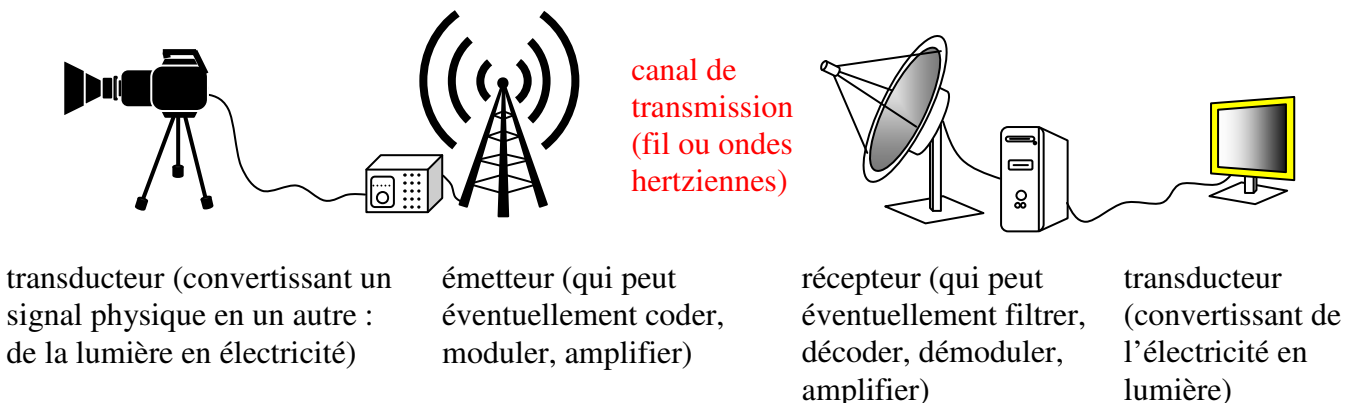
Exemple synthèse du dipeptide Leucine-Glycine



Si aucune précaution n'est prise, on obtient plusieurs dipeptides : Leucine- Leucine, Glycine-Glycine, ...

3.3 Transmettre et stocker de l'information

3.3.1 Chaîne de transmission d'informations



3.3.2 Images numériques

3.3.2.1 Pixellisation

Une image numérique est composée d'un grand nombre de points colorés, appelés « pixels », organisés dans un tableau.

Les caractéristiques de chaque point (emplacement, couleur, ...) sont stockés sous forme de nombres dans un fichier informatique.

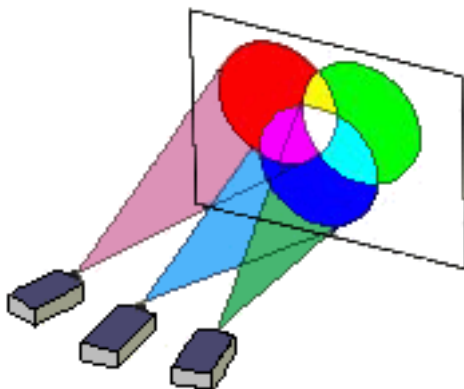
Exemple



196111066	204121066	213132068	235161081	237169079
215121070	213129063	202117059	205120060	201121064
152081051	218139073	235155077	210123063	209128067
058021021	123068042	156097050	183109064	208131072
044024032	046020030	050016025	073026017	154090055

3.3.2.2 Codage RVB

On a vu en 1S que la synthèse additive consiste à combiner la lumière colorée de plusieurs sources afin d'obtenir une nouvelle couleur.



Rappels

cyan = bleu + vert

jaune = rouge + vert

magenta = rouge + bleu

Un écran d'ordinateur ou de téléphone portable utilise le procédé de la synthèse additive.

La couleur de chaque pixel dépend de l'intensité de ses composantes rouge, verte et bleue (couleurs auxquelles sont sensibles les cônes de la rétine de l'œil).

Exemples intensité de la couleur (256 nuances) :

Rouge = 0 Vert = 255 Bleu = 255 \Rightarrow couleur cyan

Rouge = 218 Vert = 165 Bleu = 32 \Rightarrow couleur saumon

3.3.2.3 Niveaux de gris

Une image numérique peut être représentée en nuances de gris. Cela permet de ne stocker qu'un seul nombre (l'intensité du gris) au lieu de trois en codage RVB.

Le codage en nuance de gris d'une image permet d'obtenir un fichier informatique de taille réduite.

Exemple

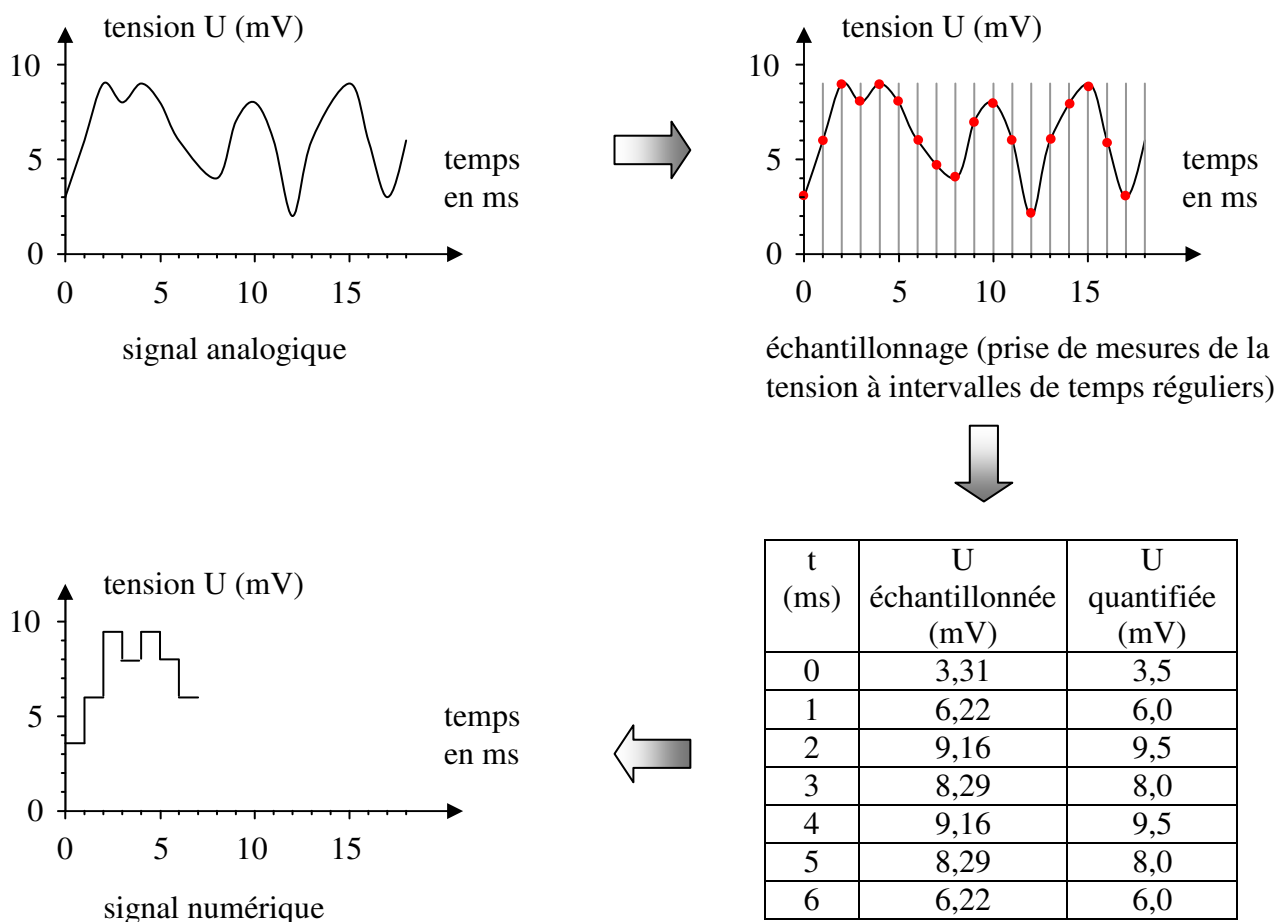


3.3.3 Signal analogique et signal numérique

3.3.3.1 Conversion d'un signal analogique en signal numérique

Un signal analogique varie de façon continue dans le temps tandis qu'un signal numérique varie de façon discrète (il ne peut prendre que certaines valeurs).

Exemple



quantification (la valeur échantillonnée est remplacée par la valeur permise la plus proche)

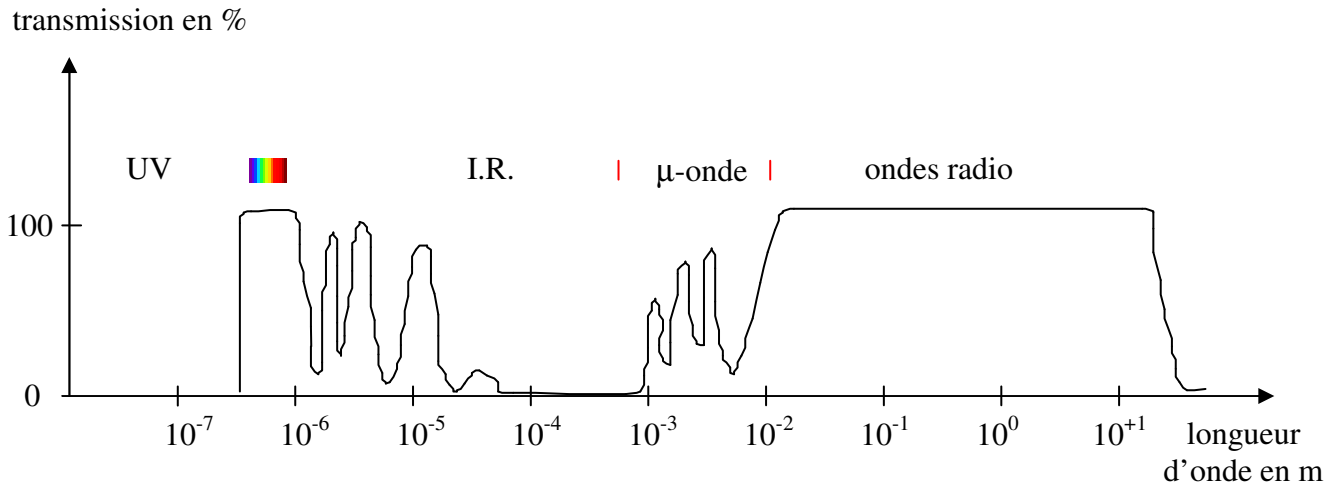
3.3.3.2 Procédés physiques de transmission

a Propagation libre

Les ondes hertziennes ($\lambda > 0,5$ cm) sont bien adaptées à la transmission des informations dans l'atmosphère.

En effet, l'atmosphère terrestre absorbe les ondes électromagnétiques sauf le visible et les ondes hertziennes.

Exemple



b Propagation guidée

La transmission des informations peut également s'effectuer par :

- câble électrique pour les faibles distance car le signal électrique s'atténue rapidement.

L'atténuation d'un signal de puissance « P » dépend de la longueur « L » du câble dans lequel il se propage. Le coefficient d'atténuation « α » est défini par :

$$\alpha = \frac{10}{L} * \log\left(\frac{P_{\text{entrée}}}{P_{\text{sortie}}}\right)$$

- fibre optique dans laquelle on guide la lumière à l'aide d'un fil de verre. Le débit binaire peut être très élevé.

Le débit binaire mesure la quantité de données numériques transmises par unité de temps. Si le signal possède « n » bits émis pendant « Δt », le débit binaire « D » est défini par :

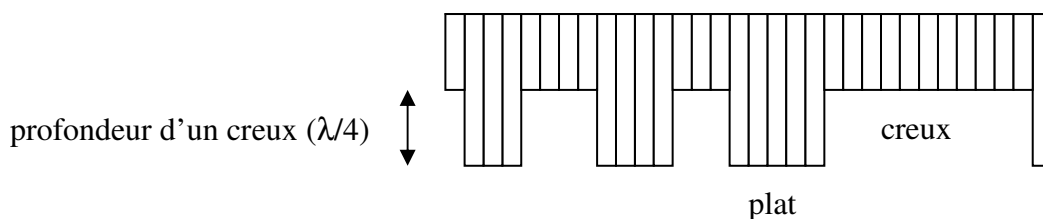
$$D = \frac{n}{\Delta t}$$

Exemple chacune des 2 voies d'un CD audio (stéréo) possède une fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz et une quantification sur 16 bits (2^{16} valeurs quantifiées). Le débit binaire d'une voie est donc égal à $D = 44\ 100 * 16 = 705\ 600$ bits par seconde (bps)

3.3.3.3 Stockage optique

Les données du CD (DVD et BD) sont lues sur la surface du disque par un laser de longueur d'onde « λ ». Les bits de données sont stockés sous forme d'alternance creux / plats.

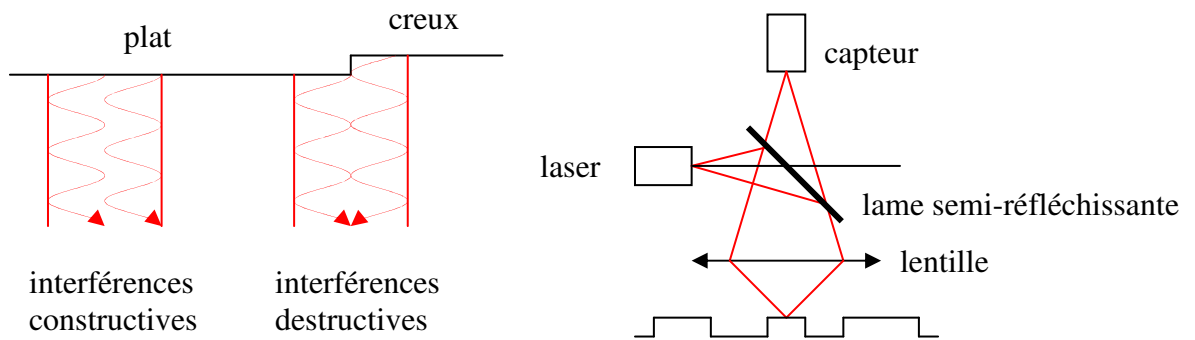
Exemple



a Lecture des données

Lorsque la lumière laser atteint un creux, une partie est réfléchiée par le creux et une autre par un plat.

Exemple



La lumière réfléchi sur un creux et la lumière réfléchi sur un plat interfèrent et génère une baisse d'intensité de la luminosité mesurée par le capteur.

Ainsi, tous les creux et plats sont des « 0 » et c'est le passage d'un creux à un plat (ou l'inverse) qui représente un « 1 ».

b Capacités de stockage

Sur un CD (DVD, BD), les creux et les plats sont disposés le long d'une spirale. Allonger la spirale permet d'augmenter la capacité de stockage.

Pour cela, il faut diminuer la taille des creux et des plats. Il faut également diminuer le diamètre du faisceau laser pour ne pas intercepter deux spires contiguës de la spirale.

Un faisceau plus fin est d'autant plus facile à obtenir que la longueur d'onde de la lumière du laser est petite en raison du phénomène de diffraction.

3.4 Notations, unités et valeurs en chimie

[]	concentration molaire d'une espèce en solution, en mol.L ⁻¹
A	absorbance calculée par un spectrophotomètre. [A] = sans unité
c	concentration molaire d'un soluté à l'origine de la solution. [c] = mol.L ⁻¹
k	constante de proportionnalité. [k] = l'unité dépend de l'équation
Ka	constante d'équilibre d'une réaction acido-basique. [Ka] = sans unité (on assimile la valeur de la concentration molaire à celle de l'activité chimique, grandeur sans unité)
Ke	produit ionique de l'eau. [Ke] = sans unité (voir Ka)
log	logarithme décimal.
n	nombre de mol. ou quantité de matière. [n] = mol.
N _A	nombre d'Avogadro. N _A = 6,023.10 ²³ mol. ⁻¹
pH	potentiel hydrogène. [pH] = sans unité
pKa	constante d'équilibre d'une réaction acido-basique (pKa = -log Ka). [pKa] = sans unité
pKe	produit ionique de l'eau (pKe = -log Ke). [pKe] = sans unité
t	temps. [t] = s
t _{1/2}	temps de demi réaction. [t] = s
T	transmittance. [T] = sans unité
U	énergie interne d'un système. [U] = J
V	volume d'une solution. [V] = L
x	avancement d'une réaction. [x] = mol.
x _{max}	avancement maximal d'une réaction. [x _{max}] = mol.
δ	déplacement chimique en spectroscopie RMN. [δ] en ppm (partie pour million)
δ	charge électrique partielle portée par un atome dans une molécule. [δ] = C
δ	électronégativité dans l'échelle de Pauling. [δ] = sans unité
η	rendement. [η] = sans unité
θ	température dans l'échelle Celcius. [θ] = °C
λ	conductivité molaire ionique d'un ion. [λ] = S .m ² .mol ⁻¹
λ	longueur d'onde. [λ] = m
σ	conductivité d'une solution ionique. [σ] = S .m ⁻¹
σ	nombre d'onde en spectroscopie RMN. [σ] = cm ⁻¹

3.5 Notations, unités et valeurs en physique

\vec{a}	vecteur accélération
a	valeur du vecteur accélération. [a] = m.s ⁻²
a	longueur du demi grand axe d'une ellipse. [a] = m
a	largeur d'une fente ou d'un fil. [a] = m
b	longueur du demi petit axe d'une ellipse. [b] = m
\vec{c}_{const}	vecteur constant
c	célérité de la lumière. [c] = m.s ⁻¹
cp	capacité thermique massique d'un corps. [cp] = J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹
C	constante de la loi des aires de Kepler. [C] = s ² .m ⁻³
d	distance. [d] = m
d/dt	opérateur de dérivation
\vec{e}	vecteur unitaire de base d'un système d'axe
e	charge électrique élémentaire. e = 1,6.10 ⁻¹⁹ C
\vec{E}	vecteur champ électrostatique
E	valeur du vecteur champ électrostatique. [E] = V.m ⁻¹
Ec	énergie cinétique. [Ec] = J
Em	énergie mécanique. [Em] = J
Ep	énergie potentielle de pesanteur. [Ep] = J

\vec{f}	vecteur résultante des forces de frottement
f	valeur de la résultante des forces de frottement. [f] = N
f	fréquence. [f] = Hz
\vec{F}	vecteur force
F	valeur du vecteur force. [F] = N
\vec{g}	vecteur accélération de la pesanteur
g	valeur du vecteur accélération de la pesanteur (ou intensité de la pesanteur). [g] = $m.s^{-2}$
G	constante de gravitation. $G = 6,67.10^{-11} N.m^2.kg^{-2}$
h	altitude par rapport au sol. [h] = m
h	constante de Plank. $h = 6,63.10^{-34} J.s$
I	intensité sonore ou lumineuse. [I] = $W.m^{-2}$
L	niveau sonore. [L] = dB_A (décibel acoustique)
L	longueur. [L] = m
m	masse. [m] = kg
p	quantité de mouvement. [p] = $kg.m.v^{-1}$
\vec{P}	vecteur poids
P	valeur du vecteur poids. [P] = N
q	charge électrique. [q] = C
Q	charge de l'armature d'un condensateur. [Q] = C
Q	transfert thermique. [Q] = J
R	rayon d'un cercle ou d'une sphère. [R] = m
Rh	résistance thermique d'une paroi. [Rh] = $^{\circ}C.W^{-1}$
t	temps. [t] = s
T	période. [T] = s
U	tension électrique ou différence de potentiel électrique. [U] = V
\vec{v}	vecteur vitesse d'une onde ou d'un système
v	valeur du vecteur vitesse d'une onde ou d'un système. [v] = $m.s^{-1}$
V	potentiel électrique. [V] = V
W	travail mécanique ou électrique. [W] = J
α	angle. [α] = rad
Δ	variation d'une quantité physique. $\Delta =$ quantité finale – quantité initiale
η	rendement. [η] = sans unité
θ	angle. [θ] = rad
θ	température dans l'échelle Celcius. [θ] = $^{\circ}C$
λ	longueur d'onde. [λ] = m
ν	fréquence d'une onde. [ν] = Hz
τ	retard d'une perturbation entre deux points. [τ] = s
ϕ	phase d'une onde à l'origine des temps. [ϕ] = rad
Φ	flux thermique. [Φ] = W
τ_0	durée de vie moyenne propre d'un muon
$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$	composantes du vecteur position dans un repère de R^3 (on dit aussi les coordonnées du vecteur)
$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}$	composantes du vecteur accélération dans un repère de R^3

$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}$ composantes du vecteur vitesse dans un repère de \mathbb{R}^3