

# PHYSIQUE CHIMIE

## Terminale spécialité

G.STRADI et E.SALINAS

2025-2026



Site internet

<https://www.physiquechimiestradi.com>

# SOMMAIRE

## **Thème A : Constitution et transformation de la matière**

Fiche A0 - Bases de chimie	<u>Page 2</u>
Fiche A1 - Transformations acido-basiques	<u>Page 6</u>
Fiche A2 - Acide base et applications	<u>Page 10</u>
Fiche A3 - Méthodes physiques d'analyse	<u>Page 14</u>
Fiche A4 - Dosage par titrage	<u>Page 19</u>
Fiche A5 - Dosage par titrage pHmétrique	<u>Page 21</u>
Fiche A6 - Dosage par titrage conductimétrique	<u>Page 23</u>
Fiche A7 - Cinétique chimique : aspect qualitatif	<u>Page 25</u>
Fiche A8 - Cinétique chimique : aspect quantitatif	<u>Page 27</u>
Fiche A9 - Loi de vitesse d'ordre 1	<u>Page 30</u>
Fiche A10 - Noyaux et radioactivité	<u>Page 32</u>
Fiche A11 - Décroissance radioactive	<u>Page 34</u>
Fiche A12 - Equilibre chimique	<u>Page 37</u>
Fiche A13 - Pile électrochimique	<u>Page 40</u>
Fiche A14 - Transformation chimique forcée et électrolyse	<u>Page 43</u>
Fiche A15 - Structures des molécules organiques	<u>Page 45</u>
Fiche A16 - Synthèses chimiques	<u>Page 49</u>
Fiche A17 - Stratégie de synthèses	<u>Page 51</u>
Fiche A18 - Modélisation microscopique d'une transformation chimique	<u>Page 54</u>

## **Thème B : Mouvements et interactions**

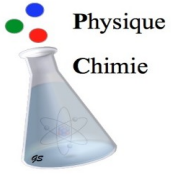
Fiche B1 - Cinématique dans le repère cartésien	<u>Page 56</u>
Fiche B2 - Mouvements rectilignes	<u>Page 60</u>
Fiche B3 - Cinématique dans le repère de Frenet	<u>Page 62</u>
Fiche B4 - Forces et lois de Newton	<u>Page 64</u>
Fiche B5 - Mouvement dans le champ de pesanteur uniforme	<u>Page 67</u>
Fiche B6 - Mouvement dans le champ électrique uniforme	<u>Page 71</u>
Fiche B7 - Mouvement dans le champ de gravitation	<u>Page 74</u>
Fiche B8 - Dynamique des fluides	<u>Page 77</u>

## **Thème C : Ondes et signaux**

Fiche C1 - Les ondes sonores	<u>Page 80</u>
Fiche C2 - Effet Doppler	<u>Page 83</u>
Fiche C3 - La diffraction	<u>Page 86</u>
Fiche C4 - Les interférences	<u>Page 88</u>
Fiche C5 - Généralités d'optique géométrique	<u>Page 91</u>
Fiche C6 - Un instrument d'optique : la lunette astronomique	<u>Page 93</u>
Fiche C7 - La lumière, un flux de photons	<u>Page 95</u>
Fiche C8 - Notions d'électrocinétique	<u>Page 97</u>
Fiche C9 - Circuit RC série	<u>Page 99</u>

## **Thème D : L'énergie : conversions et transferts**

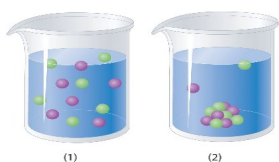
Fiche D1 - Gaz parfait	<u>Page 102</u>
Fiche D2 - Energie interne et premier principe de la thermodynamique	<u>Page 103</u>
Fiche D3 - Transferts, flux et résistance thermique	<u>Page 106</u>
Fiche D4 - Loi phénoménologique de Newton	<u>Page 108</u>
Fiche D5 - Bilan thermique du système Terre-atmosphère	<u>Page 111</u>
Tableau périodique	<u>Page 113</u>

	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A0 - Bases de chimie</b>	<b>Exercices obligatoires : 4 p 62 – 17 p 65</b>


## I-Quantité de matière

$N(X) = n(X) \times N_A$ <ul style="list-style-type: none"> <li>-N(X) : Nombre d'entités chimique X (sans unité)</li> <li>-n(X) : Quantité de matière d'entités chimiques X (mol)</li> <li>-N<sub>A</sub> : Constante d'Avogadro ( mol<sup>-1</sup> )</li> </ul>	<p>La masse molaire moléculaire ou ionique représente la masse d'une mole de molécules ou d'ions. Elle est égale à la somme des masses molaires atomiques des atomes constituant la molécule ou l'ion. Son unité est le gramme par mole ( g . mol<sup>-1</sup> ).</p> $M(A_a B_b) = a \times M(A) + b \times M(B)$
$n(X) = \frac{m(X)}{M(X)}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>-n(X) : Quantité de matière de X (mol)</li> <li>-m(X) : Masse de X (g)</li> <li>-M(X) : Masse molaire de X ( g . mol<sup>-1</sup> )</li> </ul>	$n(X) = \frac{V(X)}{V_m}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>-n(X) : Quantité de matière de X gazeux (mol)</li> <li>-V(X) : Volume de X gazeux (L)</li> <li>- V<sub>m</sub> : Volume molaire ( L . mol<sup>-1</sup> ) indépendant du gaz</li> </ul>
$P_m(X) = \frac{m(X)}{m_{tot}}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>-m(X) : masse de l'espèce pure X (g)</li> <li>- m<sub>tot</sub> : masse totale du mélange (g)</li> <li>- P<sub>m</sub>(X) : pourcentage massique de l'espèce X dans le mélange 0 ≤ P<sub>m</sub>(X) ≤ 1 (très souvent exprimé en %)</li> </ul>	$P_v(X) = \frac{V(X)}{V_{tot}}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>-V(X) : volume de l'espèce pure X (L)</li> <li>- V<sub>tot</sub> : volume total du mélange (L)</li> <li>- P<sub>v</sub>(X) : pourcentage volumique de l'espèce X dans le mélange 0 ≤ P<sub>v</sub>(X) ≤ 1 (très souvent exprimé en %)</li> </ul>
$\rho(X) = \frac{m(X)}{V(X)}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- ρ(X) : Masse volumique de X ( g . L<sup>-1</sup> )</li> <li>-m(X) : Masse de X (g)</li> <li>-V(X) : Volume de X (L)</li> </ul>	$d(X) = \frac{\rho(X)}{\rho(\text{eau})}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- d(X) : Densité de X (sans unité)</li> <li>- ρ(X) : Masse volumique de X ( g . L<sup>-1</sup> )</li> <li>- ρ(eau) : Masse volumique de l'eau ( g . L<sup>-1</sup> )</li> </ul>

## II-Les solutions



Une solution est obtenue par **dissolution** d'une espèce chimique appelée **soluté** dans un **solvant** (1). Lorsque le solvant est l'eau, la solution est appelée **solution aqueuse**. Une solution est dite **saturée** lorsque le soluté introduit n'est pas totalement dissous (2).

$t(X) = \frac{m(X)}{V_{sol}}$  $\rho(X) \neq t(X)$ <ul style="list-style-type: none"> <li>-t(X) : Concentration en masse du soluté X ( g . L<sup>-1</sup> )</li> <li>-m(X) : Masse du soluté X (g)</li> <li>- V<sub>sol</sub> : Volume de solution (L)</li> </ul>	$C(X) = \frac{n(X)}{V_{sol}}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>-C(X) : Concentration en quantité de matière du soluté X ( mol . L<sup>-1</sup> )</li> <li>-n(X) : Quantité de matière du soluté X (mol)</li> <li>- V<sub>sol</sub> : Volume de solution (L)</li> </ul>
$t(X) = C(X) \times M(X)$	

Le **titre massique W d'un soluté X en solution** correspond au rapport de la masse de soluté X dissous par la masse de la solution. C'est un nombre **compris entre 0 et 1** et qui n'a **pas d'unité**. Il est **très souvent exprimé en %**.

$W(X) = \frac{m(X)}{m_{\text{solution}}}$	-W(X) : Titre massique du soluté X dans la solution (sans unité) -m(X) : masse de soluté X dissous dans la solution (g) - m <sub>solution</sub> : masse de la solution (g)
---	--

**Exemple** : Une lessive de soude du commerce a un titre massique de 30,5 % c'est-à-dire qu'elle contient 30,5 g de soude (NaOH) pour 100 g de lessive de soude (solution).

La **densité d'une solution** correspond au rapport de la masse volumique de la solution par la masse volumique de l'eau. C'est un **nombre sans unité**.

$d_{\text{sol}} = \frac{\rho_{\text{sol}}}{\rho_{\text{eau}}}$	- d <sub>sol</sub> : Densité de la solution (sans unité) - ρ <sub>sol</sub> : masse volumique de la solution ( g . L <sup>-1</sup> , g . mL <sup>-1</sup> , kg . L <sup>-1</sup> ... ) - ρ <sub>eau</sub> : masse volumique de l'eau ( g . L <sup>-1</sup> , g . mL <sup>-1</sup> , kg . L <sup>-1</sup> ... )
--	--

### Préparation des solutions :

- **Dissolution :**

<p><b>Protocole :</b></p> <p>1-Prélever, à l'aide d'une balance, d'une spatule et d'un verre de montre, <b>m(X) g</b> de soluté à dissoudre.</p> <p>2-Introduire le soluté prélevé, à l'aide d'un entonnoir à solide, dans une fiole jaugée de <b>V<sub>sol</sub> mL</b>.</p> <p>3-Remplir au 2/3 la fiole jaugée avec de l'eau distillée.</p> <p>4-Homogénéiser.</p> <p>5-Compléter, avec de l'eau distillée, jusqu'au trait de jauge. Homogénéiser à nouveau.</p>	
---	--

=> Dissolution d'un solide ionique dans l'eau :

Soit l'équation de la réaction modélisant la dissolution totale dans l'eau d'un solide ionique de formule M<sub>n</sub>X<sub>p</sub>(s) constitué de cations M<sup>p+</sup> et d'anions X<sup>n-</sup> : M<sub>n</sub>X<sub>p</sub>(s)  $\xrightarrow{\text{eau}}$  n M<sup>p+</sup>(aq) + p X<sup>n-</sup>(aq) .

$[M^{p+}] = \frac{n(M^{p+})}{V_{\text{sol}}} \quad [X^{n-}] = \frac{n(X^{n-})}{V_{\text{sol}}}$	[M <sup>p+</sup> ] , [X <sup>n-</sup> ] : concentration en quantité de matière des ions en solution ( mol . L <sup>-1</sup> ) n(M <sup>p+</sup> ) , n(X <sup>n-</sup> ) : quantité de matière des ions en solution (mol) V <sub>sol</sub> : volume de la solution (L)
---	---

- **Dilution :**

<p><b>Protocole :</b></p> <p>1-Prélever, à l'aide d'une pipette jaugée (ou graduée) munie d'une propipette, <b>V<sub>mère</sub> mL</b> de solution mère.</p> <p>2-Introduire le volume prélevé dans une fiole jaugée de <b>V<sub>sol</sub> = V<sub>fille</sub> mL</b>.</p> <p>3-Remplir au 2/3 la fiole jaugée avec de l'eau distillée puis homogénéiser.</p> <p>4-Compléter, avec de l'eau distillée, jusqu'au trait de jauge. Homogénéiser à nouveau.</p>	
---	--

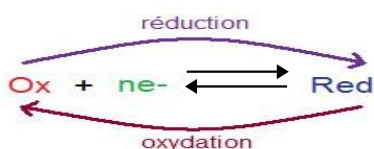
=> Loi de la dilution et facteur de dilution :

**Au cours d'une dilution la quantité de matière (ou la masse) de soluté X en solution se conserve.** La quantité de matière (ou la masse) de soluté X dans la solution mère prélevée est égale à la quantité de matière (ou la masse) de soluté X dans la solution fille créée.

**Facteur de dilution** :  $F = \frac{C(X)_{\text{mère}}}{C(X)_{\text{fille}}} = \frac{t(X)_{\text{mère}}}{t(X)_{\text{fille}}} = \frac{V_{\text{fille créée}}}{V_{\text{mère prélevé}}}$  et **F est toujours supérieur à 1 !**

### III-L'oxydoréduction

- **Oxydant** : Espèce chimique capable de **capter** un ou plusieurs électrons.
- **Réducteur** : Espèce chimique capable de **céder** un ou plusieurs électrons.



Deux espèces chimiques Ox et Red sont dites **conjuguées** et forment un **couple oxydant/réducteur** aussi appelé **couple rédox** noté **Ox/Red**, si elles peuvent être reliées par une **demi-équation d'oxydoréduction** ou **demi-équation rédox**.

#### Méthode pour équilibrer une demi-équation d'oxydoréduction :

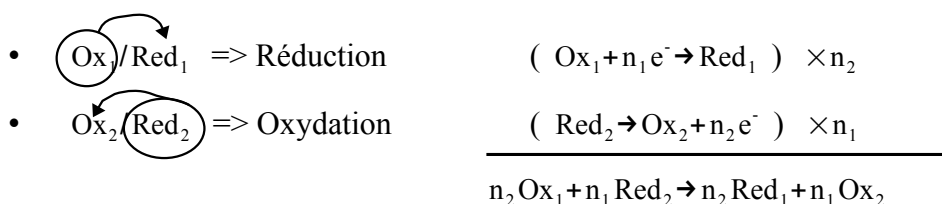
- 1-Equilibrer tous les éléments sauf l'oxygène O et l'hydrogène H
- 2-Equilibrer l'élément oxygène en ajoutant du bon côté de la demi-équation des molécules (
- 3-Equilibrer l'élément hydrogène en ajoutant du bon côté de la demi-équation des ions hydrogène  $H^+$
- 4-Equilibrer les charges en ajoutant, du côté de l'oxydant, des électrons  $e^-$



Exemples

Une **transformation d'oxydoréduction** est modélisée par une réaction au cours de laquelle des **électrons sont transférés entre les réactifs**.

Soit deux couples rédox  $Ox_1/Red_1$  et  $Ox_2/Red_2$ , on considère la réaction entre l'oxydant 1 et le réducteur 2.



**Il faut que  $n_1 \times n_2$  soit le plus petit possible si  $n_1 \neq n_2$  !**

#### Oxydants et réducteurs usuels :

- L'eau de javel est une solution oxydante due aux ions hypochlorite  $ClO^-$  (oxydant puissant) qu'elle contient (couple redox  $ClO^-/Cl^-$ );
- Le dioxygène et le dichlore sont des oxydants (couples  $O_2/H_2O$ ,  $Cl_2/Cl^-$ );
- L'acide ascorbique (vitamine C) est un réducteur (couple  $C_6H_6O_6/C_6H_8O_6$ ). Il possède des propriétés antioxydantes car il peut réagir avec le dioxygène de l'air et donc ralentir l'oxydation des aliments.
- Le dihydrogène est un réducteur (couple  $H^+/H_2$ );
- Les métaux sont des réducteurs. On peut expliquer le caractère réducteur des métaux du bloc s (colonne 1 et 2 du tableau périodique sauf l'hydrogène) grâce à leur configuration électronique. La couche de valence de ces métaux du bloc s est du type  $ns^1$  ou  $ns^2$ , il doivent donc perdre 1 ou 2 électrons pour obtenir la même configuration électronique que le gaz noble le plus proche : c'est donc bien la définition d'un réducteur.

### IV-Evolution d'un système chimique

On considère la transformation chimique modélisée par la réaction :  $aA + bB \rightarrow cC + dD$

où A et B sont les **réactifs**, C et D sont les **produits** et a, b, c et d sont les **coefficients stoechiométriques** associés aux réactifs et aux produits.

- **Mélange stoechiométrique :**

$\frac{n_i(A)}{a} = \frac{n_i(B)}{b}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>n_i(A)</math> : Quantité de matière dans l'état initial du réactif A (mol)</li> <li>- <math>n_i(B)</math> : Quantité de matière dans l'état initial du réactif B (mol)</li> <li>- a et b : coefficient stoechiométrique associé aux réactif A et B (sans unité)</li> </ul>
---------------------------------------	---

- **Tableau d'avancement de la transformation chimique :**

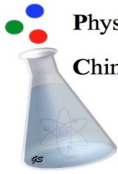
Equation chimique		a A	+	b B	→	c C	+	d D
Etat du système	Avancement (mol)	$n(A)$		$n(B)$		$n(C)$		$n(D)$
Etat initial	$x=0$	$n_i(A)$		$n_i(B)$		0		0
Etat intermédiaire	$x$	$n_i(A) - a x$		$n_i(B) - b x$		$c x$		$d x$
Etat final	$x_f$	$n_i(A) - a x_f$		$n_i(B) - b x_f$		$c x_f$		$d x_f$

- **Transformation chimique totale et avancement maximal :**

Une transformation chimique est dite **totale** si  $x_f = x_{\max}$ . Pour déterminer la valeur de l'avancement maximal  $x_{\max}$ , on calcule les valeurs de l'avancement qui annulent les quantités de chacun des réactifs. **La plus petite de ces valeurs fournit l'avancement maximal  $x_{\max}$  de la réaction : le réactif qui lui est associé est le réactif limitant.**

- **Bilan de matière à l'état final :**

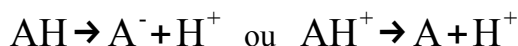
A partir de la valeur de l'avancement final  $x_f$ , il est possible de calculer les quantités de matière des réactifs et des produits lorsque la transformation est terminée.

 Physique Chimie	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A1 -</b> <b>Transformations acido-basiques et pH</b>	<b>Exercices obligatoires : 5 p 22 – 12 p 23 – 15 p 24 – 16 p 25 – 8 p 164</b> <b>Exercices en plus : 7 p 22 – 24 p 167</b>

## I-Les acides et bases selon la théorie de Brönsted-Lowry

### 1-Les acides :

Un acide est une espèce chimique susceptible de céder un ion hydrogène  $H^+$  (proton). L'espèce engendrée est une base.

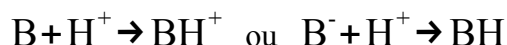


Un acide pouvant céder plusieurs ions hydrogène est appelé **polyacide** (exemples :  $H_2SO_4$ ,  $H_3PO_4$  ...):

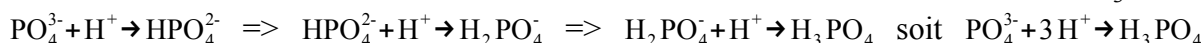


### 2-Les bases :

Une base est une espèce chimique susceptible de capter un ion hydrogène  $H^+$  (proton), ce qui nécessite l'existence d'un **doublet non liant** pour s'associer au proton  $H^+$ . L'espèce engendrée est un acide.



Une base pouvant capter plusieurs ions hydrogène est appelé **polybase** (exemples :  $CO_3^{2-}$ ,  $PO_4^{3-}$  ...):



### 3-Cas de l'eau :

L'eau est un **ampholyte** car elle peut se comporter comme un acide ou comme une base : on dit aussi que c'est une **espèce amphotère**.

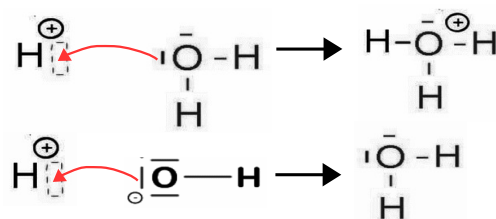
- L'eau se comporte comme un acide :  $H_2O \rightarrow HO^- + H^+$  ( $HO^- \Leftrightarrow$  ion hydroxyde)
- L'eau se comporte comme une base :  $H_2O + H^+ \rightarrow H_3O^+$  ( $H_3O^+ \Leftrightarrow$  ion oxonium)

## II-Couple et demi-équation acido-basique

Les espèces conjuguées acide et base forment un couple que l'on symbolise par : **Acide/Base**.

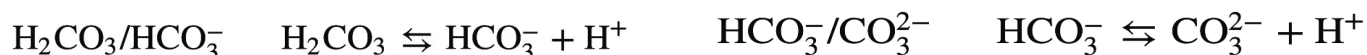
A tout couple acido-basique est associé une **demi-équation acido-basique** :  $Acide \Leftrightarrow Base + H^+$

- **Couples de l'eau**



**ATTENTION!** Les couples de l'eau sont à connaître par cœur !

- **Couples de l'acide carbonique**  $H_2CO_3$  (diacide) aussi noté  $CO_2, H_2O$



• **Couple d'un acide carboxylique RCOOH**

Acide carboxylique ( <b>acide</b> )	Ion carboxylate (base)
$\begin{array}{c} \text{R}-\text{C} \begin{array}{l} \nearrow \text{O} \\ \searrow \text{O}-\text{H} \end{array} \end{array}$ $\begin{array}{c} \text{R}-\text{C} \begin{array}{l} \nearrow \text{O} \\ \searrow \text{OH} \end{array} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{R}-\text{C} \begin{array}{l} \nearrow \text{O} \\ \searrow \text{O}^- \end{array} \end{array}$ $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{C}-\text{O}^- \end{array}$
$\text{RCOOH}/\text{RCOO}^- \quad \text{RCOOH} \rightleftharpoons \text{RCOO}^- + \text{H}^+$	

Les acides carboxyliques sont des acides selon Brønsted car il possède un **groupe carboxyle**. C'est l'**hydrogène de ce groupe carboxyle qui possède des propriétés acide**.

• **Couple d'une amine R<sub>1</sub>R<sub>2</sub>R<sub>3</sub>N (R=C ou H)**

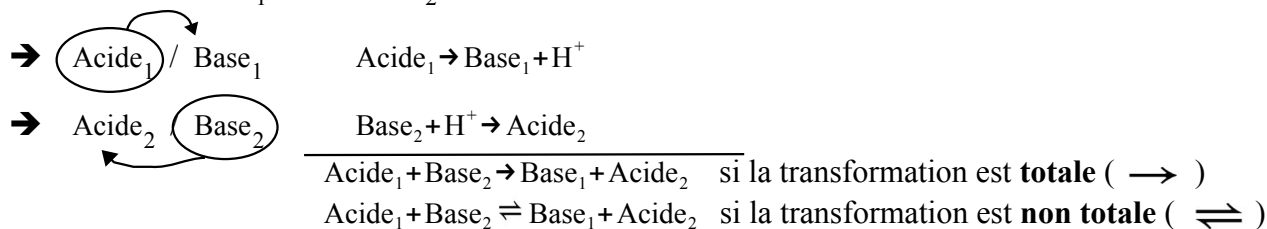
Ion ammonium (acide)	Amine ( <b>base</b> )
$\begin{array}{c} \text{R2} \\   \\ \text{R1}-\text{N}^+-\text{R3} \\   \\ \text{H} \end{array}$ $\begin{array}{c} \text{R2} \\   \\ \text{R1}-\text{N}^{\oplus}-\text{R3} \\   \\ \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{R2} \\   \\ \text{R1}-\text{N}-\text{R3} \end{array}$ $\begin{array}{c} \text{R2} \\   \\ \text{R1}-\text{N}-\text{R3} \end{array}$
$\text{R}_1\text{R}_2\text{R}_3\text{NH}^+/\text{R}_1\text{R}_2\text{R}_3\text{N} \quad \text{R}_1\text{R}_2\text{R}_3\text{NH}^+ \rightleftharpoons \text{R}_1\text{R}_2\text{R}_3\text{N} + \text{H}^+$	

**III-Equation de la réaction d'une transformation acido-basique**

On considère les couples Acide<sub>1</sub> / Base<sub>1</sub> et Acide<sub>2</sub> / Base<sub>2</sub>.



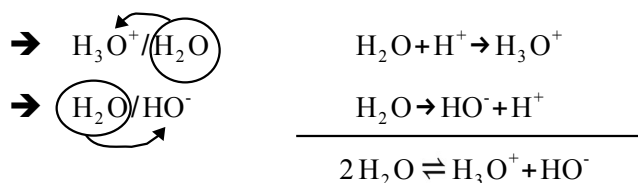
Réaction entre l' Acide<sub>1</sub> et la Base<sub>2</sub> :



**Une transformation acido-basique est modélisée par une réaction au cours de laquelle un transfert d'un ion hydrogène H<sup>+</sup> a lieu entre l'acide d'un couple et la base d'un autre couple.**

**Une transformation acido-basique particulière : l'autoprotolyse de l'eau**

L'autoprotolyse de l'eau est la transformation acido-basique (non totale) entre deux molécules d'eau.



**IV-pH d'une solution aqueuse**

**1-Définition du pH (potentiel Hydrogène) :**

Toute solution aqueuse contient des ions oxonium H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>. La concentration en quantité de matière de ces ions pouvant varier de quelques mol.L<sup>-1</sup> (cas des solutions acides) à 10<sup>-14</sup> ou 10<sup>-15</sup> mol.L<sup>-1</sup> (cas des solutions basiques).

La grandeur **pH**, définie en 1909 par le chimiste danois Sørensen, permet de comparer commodément les valeurs des concentrations des ions oxonium dans diverses solutions aqueuses.

$\text{pH} = -\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{C^\circ}\right)$	$[\text{H}_3\text{O}^+] = C^\circ \times 10^{-\text{pH}}$
<p>-pH : potentiel Hydrogène (sans unité)                  - <math>[\text{H}_3\text{O}^+]</math> : concentration en quantité de matière des ions oxonium ( mol.L<sup>-1</sup> )                  - <math>C^\circ</math> : concentration standard avec <math>C^\circ = 1 \text{ mol.L}^{-1}</math></p>	

$$\text{pH} = -\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{C^\circ}\right) \Leftrightarrow -\text{pH} = \log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{C^\circ}\right) \Leftrightarrow 10^{-\text{pH}} = 10^{\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{C^\circ}\right)} = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{C^\circ} \Leftrightarrow [\text{H}_3\text{O}^+] = C^\circ \times 10^{-\text{pH}}$$

**ATTENTION!** Plus le pH est petit, plus la concentration en quantité de matière en ions oxonium est élevée.

Limite : Cette relation n'est utilisable que pour des solutions aqueuses de concentration en quantité de matière d'ion oxonium inférieure à  $10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ .



## 2-Mesure du pH :

Mesure rapide : Papier pH	Mesure précise : pH-mètre
<p>C'est un papier qui a trempé dans une solution appelée « indicateur universel ». Cet indicateur est un mélange qui contient différentes espèces chimiques ; chacune d'elles réagissent à un certain pH en donnant un produit d'une certaine couleur. La mesure au papier pH permet de donner une <b>valeur approchée du pH</b>.</p>	<p>Pour effectuer la mesure précise du pH, on utilise un <b>pH-mètre étalonné</b> (température et solutions étalons/tampons pH=4 et pH=7). Une <b>agitation permanente</b> de la solution est nécessaire pour atteindre la bonne valeur du pH de la solution. La précision de la mesure du pH d'une solution dépend de plusieurs facteurs : soin avec lequel la solution a été préparée, état de l'électrode de mesure, qualité de l'étalonnage etc.</p>

**ATTENTION!** Le résultat de la mesure du pH, à l'aide d'un pH-mètre, d'une solution aqueuse sera toujours raisonnablement donné avec une décimale.

## V-Transformation acido-basiques des acides et des bases avec l'eau

### 1-Taux d'avancement final :

Le taux d'avancement final d'une transformation chimique est une grandeur, sans unité, définie par :

$\tau_f = \frac{x_f}{x_{\max}}$	<p><math>x_f</math> : Avancement final (mol)  <math>x_{\max}</math> : Avancement maximal si la réaction est totale (mol)  <math>\tau_f</math> : Taux d'avancement final compris entre 0 et 1 et souvent exprimé en %</p>
---------------------------------	--

**ATTENTION!** Si  $\tau_f < 1$  (  $x_f < x_{\max}$  ) la transformation n'est pas totale.  
 Si  $\tau_f = 1$  (  $x_f = x_{\max}$  ) la transformation est totale.

## 2-Force des acides et des bases dans l'eau :

-Si la transformation chimique acido-basique modélisée par la réaction entre un acide (ou une base) et l'eau est une transformation non totale (  $x_f < x_{\max}$  et  $\tau_f < 1$  ) alors l'acide (ou la base) est faible dans l'eau.

-Si la transformation chimique acido-basique modélisée par la réaction entre un acide (ou une base) et l'eau est une transformation totale (  $x_f = x_{\max}$  et  $\tau_f = 1$  ) alors l'acide (ou la base) est fort(e) dans l'eau.



### Méthode de détermination du caractère fort ou faible d'un acide ou d'une base dans l'eau :

Pour déterminer le caractère fort ou faible d'un acide ou d'une base dans l'eau il faut :

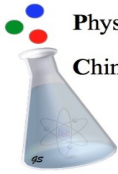
-Mesurer, précisément, le pH de la solution aqueuse d'acide ou de base de concentration donnée ;

-Ecrire, si elle n'est pas donnée, l'équation de la réaction modélisant la transformation chimique entre l'acide (ou la base) et l'eau (réaction acido-basique à partir des couples acide-base) ;

-Etablir littéralement le tableau d'avancement de la transformation puis déterminer la valeur de  $x_{\max}$  à partir du réactif limitant et la valeur de  $x_f$  à partir de la valeur du pH (et donc de  $[H_3O^+]_f$  ) ;

-Calculer le taux d'avancement final et conclure.



 Physique Chimie	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A2 -</b> <b>Acide-Base et applications</b>	<b>Exercices obligatoires : 23 p 167 – 25 p 168 – 30 p 169 – 31 p 170</b> <b>Exercices en plus : 20 p 166 – 28 p 168</b>

## I-Acidité, neutralité ou basicité d'une solution aqueuse

Toutes les solutions aqueuses contiennent des ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  et  $\text{HO}^-$  à cause de l'autoprotolyse de l'eau, mais leur concentration peut varier selon le caractère de la solution :

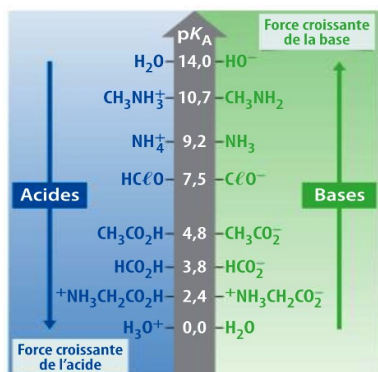


## II-Réactions des acides et des bases avec l'eau

Réaction entre un acide fort et l'eau $\text{AH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{A}^-$	Réaction entre une base forte et l'eau $\text{A}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HO}^- + \text{AH}$
$[\text{H}_3\text{O}^+]_f = \text{C}$ où C est la concentration de acide AH donc $\text{pH} = -\log\left(\frac{\text{C}}{\text{C}^\circ}\right)$	$[\text{HO}^-]_f = \text{C}$ où C est la concentration de la base $\text{A}^-$ donc $\text{pH} = \text{pK}_e + \log\left(\frac{\text{C}}{\text{C}^\circ}\right)$
Réaction entre un acide faible et l'eau $\text{AH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{A}^-$	Réaction entre une base faible et l'eau $\text{A}^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HO}^- + \text{AH}$
$[\text{H}_3\text{O}^+]_f < \text{C}$ où C est la concentration de acide AH	$[\text{HO}^-]_f < \text{C}$ où C est la concentration de la base $\text{A}^-$

## III-Force des acides et des bases dans l'eau

### 1-Comparaison de la force des acides et de bases dans l'eau :



Plus un acide est fort dans l'eau, plus son  $\text{pK}_A$  est faible (plus son  $K_A$  est élevé) et plus sa base conjuguée est faible dans l'eau.

Plus une base est forte, plus son  $\text{pK}_A$  est élevé (plus son  $K_A$  est faible) et plus son acide conjuguée est faible dans l'eau.

Dans l'eau cette échelle est bornée par les couples de l'eau. L'acide le plus fort dans l'eau est  $\text{H}_3\text{O}^+$  ( $\text{pK}_A(\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2\text{O})=0$ ) et la base la plus forte dans l'eau est  $\text{HO}^-$  ( $\text{pK}_A(\text{H}_2\text{O}/\text{HO}^-)=14$ ).

### 2-Diagrammes de distribution et de prédominance :

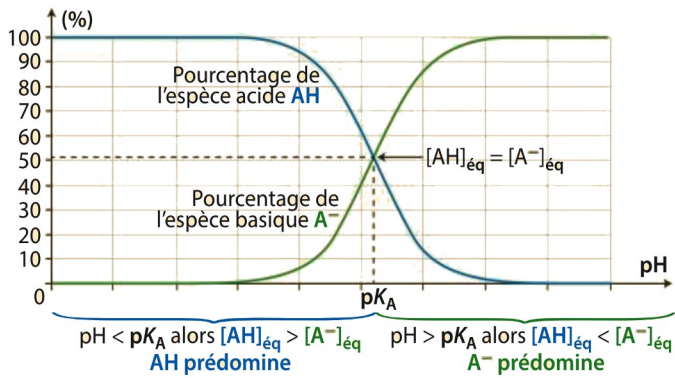
- Relation d'Henderson :**

Pour tout couple acido-basique  $\text{AH}/\text{A}^-$ , on peut écrire : 
$$\text{pH} = \text{pK}_A + \log\left(\frac{[\text{A}^-]_{\text{eq}}}{[\text{AH}]_{\text{eq}}}\right)$$

$$K_A = \frac{[\text{A}^-]_{\text{eq}} \times [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{eq}}}{[\text{AH}]_{\text{eq}} \times \text{C}^\circ} = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{eq}}}{\text{C}^\circ} \times \frac{[\text{A}^-]_{\text{eq}}}{[\text{AH}]_{\text{eq}}} \Leftrightarrow -\log(K_A) = -\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{eq}}}{\text{C}^\circ} \times \frac{[\text{A}^-]_{\text{eq}}}{[\text{AH}]_{\text{eq}}}\right)$$

$$\underbrace{-\log(K_A)}_{\text{pK}_A} = \underbrace{-\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{eq}}}{\text{C}^\circ}\right)}_{\text{pH}} - \log\left(\frac{[\text{A}^-]_{\text{eq}}}{[\text{AH}]_{\text{eq}}}\right) \Leftrightarrow \text{pK}_A = \text{pH} - \log\left(\frac{[\text{A}^-]_{\text{eq}}}{[\text{AH}]_{\text{eq}}}\right) \Leftrightarrow \text{pH} = \text{pK}_A + \log\left(\frac{[\text{A}^-]_{\text{eq}}}{[\text{AH}]_{\text{eq}}}\right)$$

• **Diagramme de distribution :**



Pourcentage de la forme acide ou basique :

$$P(\text{AH}) = \frac{[\text{AH}]_{\text{eq}}}{C_0} \Leftrightarrow P(\text{AH}) = \frac{1}{1 + 10^{\text{pH} - \text{pK}_A}}$$

$$P(\text{A}^-) = \frac{[\text{A}^-]_{\text{eq}}}{C_0} \Leftrightarrow P(\text{A}^-) = \frac{10^{\text{pH} - \text{pK}_A}}{1 + 10^{\text{pH} - \text{pK}_A}}$$

avec :

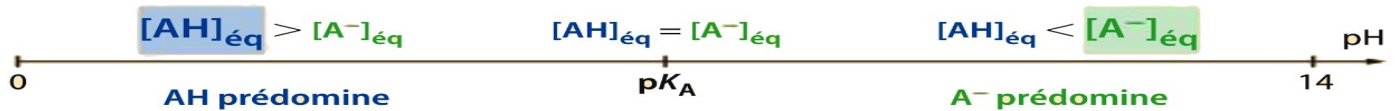
-  $C_0$  la concentration initiale de l'acide ou de la base quelque soit le pH

$$- C_0 = [\text{AH}]_{\text{eq}} + [\text{A}^-]_{\text{eq}} \text{ car } P(\text{AH}) + P(\text{A}^-) = 1$$



• **Diagramme de prédominance :**

Pour un couple acido-basique  $\text{AH}/\text{A}^-$ , le diagramme de prédominance permet de **déterminer l'espèce prédominante en fonction de la valeur du pH.**



-Si  $\text{pH} = \text{pK}_A$  alors  $\log\left(\frac{[\text{A}^-]_{\text{eq}}}{[\text{AH}]_{\text{eq}}}\right) = 0 \Leftrightarrow \frac{[\text{A}^-]_{\text{eq}}}{[\text{AH}]_{\text{eq}}} = 1$  d'où  $[\text{A}^-]_{\text{eq}} = [\text{AH}]_{\text{eq}}$

-Si  $\text{pH} > \text{pK}_A$  alors  $\log\left(\frac{[\text{A}^-]_{\text{eq}}}{[\text{AH}]_{\text{eq}}}\right) > 0 \Leftrightarrow \frac{[\text{A}^-]_{\text{eq}}}{[\text{AH}]_{\text{eq}}} > 1$  d'où  $[\text{A}^-]_{\text{eq}} > [\text{AH}]_{\text{eq}}$  :  **$\text{A}^-$  prédomine.**

-Si  $\text{pH} < \text{pK}_A$  alors  $\log\left(\frac{[\text{A}^-]_{\text{eq}}}{[\text{AH}]_{\text{eq}}}\right) < 0 \Leftrightarrow \frac{[\text{A}^-]_{\text{eq}}}{[\text{AH}]_{\text{eq}}} < 1$  d'où  $[\text{A}^-]_{\text{eq}} < [\text{AH}]_{\text{eq}}$  :  **$\text{AH}$  prédomine.**



**IV-Applications**

**1-Solutions aqueuses d'acides et de bases courantes :**

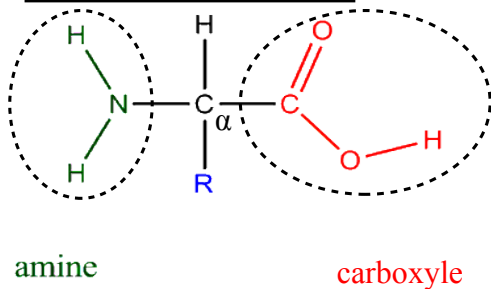
Les solutions aqueuses d'acide chlorhydrique ( $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}), \text{Cl}^-(\text{aq})$ ) et d'acide nitrique ( $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}), \text{NO}_3^-(\text{aq})$ ) sont des solutions d'acide fort car  $\text{H}_3\text{O}^+$  est l'acide le plus fort dans l'eau. Le pH de ces solution est donnée par :  $\text{pH} = -\log\left(\frac{C}{C^\circ}\right)$ .

La solution de soude ou d'hydroxyde de sodium ( $\text{Na}^+(\text{aq}), \text{HO}^-(\text{aq})$ ) est une solution de base forte car  $\text{HO}^-$  est la base la plus forte dans l'eau. Le pH de cette solution est donné par :  $\text{pH} = \text{pK}_e + \log\left(\frac{C}{C^\circ}\right)$ .

La solution d'acide éthanoïque ( $\text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq})$ ) est une solution d'acide faible.

La solution d'ammoniac ( $\text{NH}_3(\text{aq})$ ) est une solution de base faible.

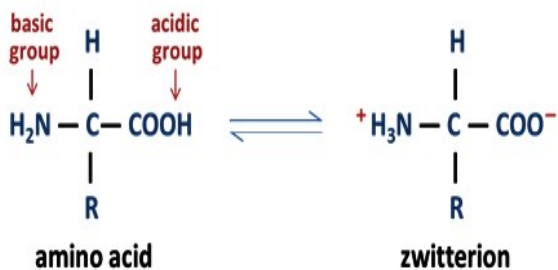
**2-Les acides alpha-aminés :**



Un acide  $\alpha$ -aminé possède deux groupes caractéristiques (carboxyle et amine) portés par le même atome de carbone (carbone  $\alpha$ ).

Ces deux groupes, très proches puisque portés par le même atome de carbone, réagissent entre eux, en solution aqueuse : l'ion hydrogène susceptible d'être cédé par le **groupe carboxyle** (acide) est effectivement capté par le **groupe amine** (base) : il s'agit d'une **réaction acido-basique intramoléculaire.**

En solution aqueuse, un acide  $\alpha$ -aminé existe essentiellement sous la forme d'ion dipolaire appelé **amphion** ou **zwitterion**.



L'amphion est un ampholyte. En solution aqueuse, l'amphion peut être considéré comme :

- l'acide du couple amphion/anion ( $\text{AH}^{+-}/\text{A}^-$ ) :  

$$\text{AH}^{+-} \rightleftharpoons \text{A}^- + \text{H}^+$$
- la base du couple cation/amphion ( $\text{AH}_2^+/\text{AH}^{+-}$ ) :  

$$\text{AH}_2^+ \rightleftharpoons \text{AH}^{+-} + \text{H}^+$$



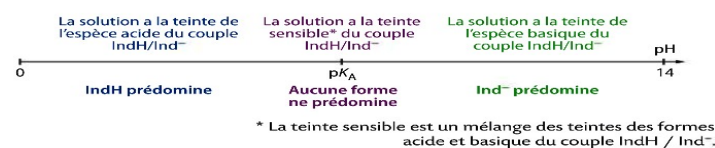
L'amphion appartient à deux couples acido-basiques, il y a donc **deux valeurs de  $\text{pK}_A$**  à placer sur le diagramme de prédominance.

Exemple : L'alanine

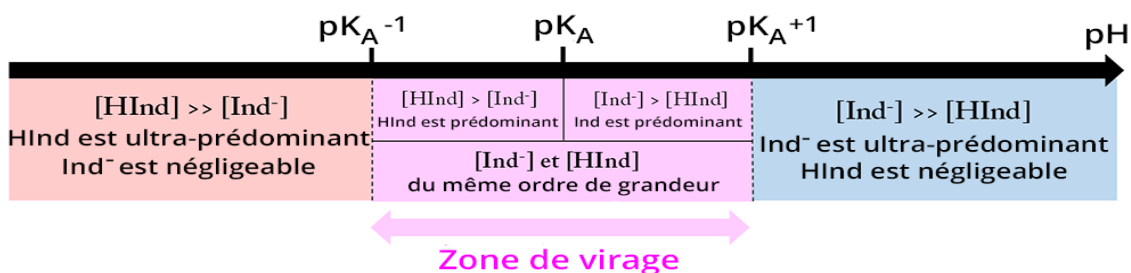


### 3-Indicateur coloré acido-basique :

Un indicateur coloré acido-basique est un **couple acide/base noté  $\text{IndH}/\text{Ind}^-$** , dont les espèces conjuguées ont des couleurs différentes. Suivant le pH de la solution, l'une des deux formes prédomine et donne sa couleur à la solution.

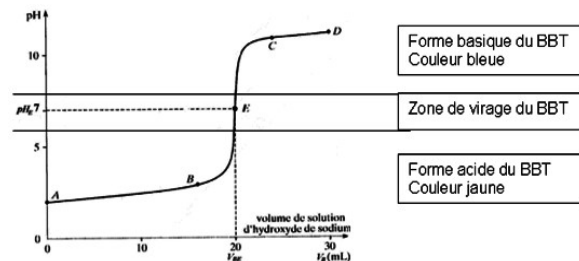


La zone comprise entre  $\text{pK}_A - 1$  et  $\text{pK}_A + 1$  est appelée **zone de virage de l'indicateur coloré**. Dans cette zone, la couleur de la solution est un mélange des deux couleurs : on parle de **teinte sensible**.



Suivant les teintes et la sensibilité de l'œil à ces teintes, la zone de virage de certains indicateurs peut être légèrement différente de deux unités de pH (voir tableau indicateur coloré ci-dessous).

Indicateur coloré	Teinte acide	Zone de virage	$\text{pK}_A$	Teinte basique
Hélianthine	Rouge	3,1 – 4,4	3,4	Jaune
Vert de bromocrésol	Jaune	3,8 – 5,4	4,9	Bleu
Bleu de bromothymol (BBT)	Jaune	6,0 – 7,6	7,1	Bleu
Rouge de crésol	Jaune	7,2 – 8,8	8,5	Rouge
Phénolphtaléine	Incolore	8,2 – 10,0	9,4	Rose
Rouge d'alizarine	Violet	10,0 – 12,0	≈ 11	Jaune
Carmin d'indigo	Bleu	11,6 – 14,0	12,6	Jaune



Un indicateur coloré acido-basique est adapté à un dosage par titrage colorimétrique dont la réaction support du titrage est une réaction acido-basique si sa zone de virage contient le pH à l'équivalence.

#### 4-Les solutions tampons :

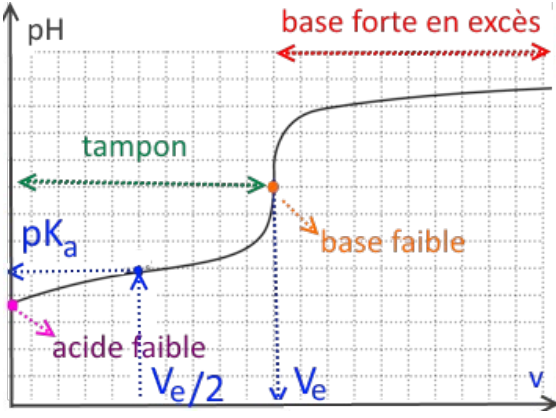
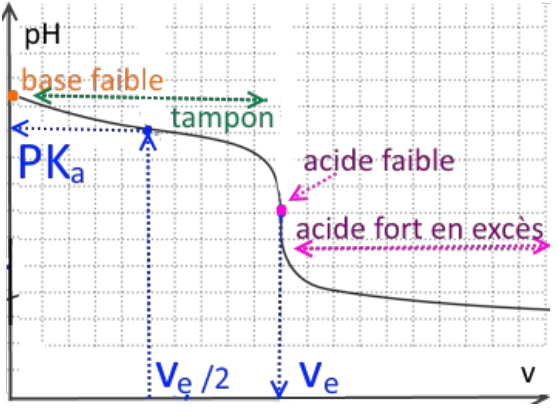
Une **solution tampon** est une solution dont la **composition est telle que le pH varie peu par ajout modéré de petites quantités d'acide ou de base, ou par dilution.**

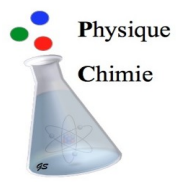
Un solution aqueuse contenant un acide faible et sa base conjuguée, et dont le pH est égal ou voisin du pKa du couple, est un exemple de solution tampon.

Exemple :

On trouve dans le sang humain une solution tampon physiologique formée par le couple  $\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-$  qui maintient le pH sanguin entre 7,35 et 7,45.

#### 5-Demi-équivalence lors d'un dosage par titrage pH-métrique :

Titration d'un acide faible AH par une base forte HO <sup>-</sup>	Titration d'une base faible B par un acide fort H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>
	
$\text{AH} + \text{HO}^- \rightarrow \text{A}^- + \text{H}_2\text{O}$	$\text{B} + \text{H}_3\text{O}^+ \rightarrow \text{BH}^+ + \text{H}_2\text{O}$
<p><u>A l'équivalence</u> : <math>n(\text{AH})_i = n(\text{HO}^-)_E = C_b \times V_e</math>  <u>A la demi-équivalence (Ve/2)</u> :</p> $n(\text{AH})_{E/2} = n(\text{HO}^-)_{E/2} = C_b \times \frac{V_e}{2} = \frac{n(\text{AH})_i}{2}$ <p>Or d'après l'équation de la réaction, pour une mole de AH consommée on forme une mole de A<sup>-</sup> car la transformation est totale.</p> $n(\text{AH})_{E/2} = n(\text{A}^-)_{E/2} \Leftrightarrow [\text{AH}]_{E/2} = [\text{A}^-]_{E/2}$ $\text{pH} = \text{pK}_A + \log\left(\frac{[\text{A}^-]_{E/2}}{[\text{AH}]_{E/2}}\right) = \text{pK}_A + \log(1) = \text{pK}_A$	<p><u>A l'équivalence</u> : <math>n(\text{B})_i = n(\text{H}_3\text{O}^+)_E = C_a \times V_e</math>  <u>A la demi-équivalence (Ve/2)</u> :</p> $n(\text{B})_{E/2} = n(\text{H}_3\text{O}^+)_{E/2} = C_a \times \frac{V_e}{2} = \frac{n(\text{B})_i}{2}$ <p>Or d'après l'équation de la réaction, pour une mole de AH consommée on forme une mole de A<sup>-</sup> car la transformation est totale.</p> $n(\text{B})_{E/2} = n(\text{BH}^+)_{E/2} \Leftrightarrow [\text{B}]_{E/2} = [\text{BH}^+]_{E/2}$ $\text{pH} = \text{pK}_A + \log\left(\frac{[\text{B}]_{E/2}}{[\text{BH}^+]_{E/2}}\right) = \text{pK}_A + \log(1) = \text{pK}_A$

 Physique Chimie	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A3 -</b> <b>Méthodes physiques d'analyse</b>	<b>Exercices obligatoires : 7 p 40 – 17 p 43 – 24 p 47 – 6 p 312</b> <b>Exercices en plus : 14 p 42 – 23 p 46</b>

## I-Analyse par mesure de l'absorbance

### 1-Absorbance et loi de Beer-Lambert :

- Absorbance :



L'absorbance **A** d'une solution est une grandeur **sans unité**. Elle caractérise l'aptitude des espèces chimiques colorées présentes dans la solution à absorber une radiation lumineuse de longueur d'onde donnée. L'absorbance est une grandeur additive et se mesure à l'aide d'un **spectrophotomètre** (ci-contre).

- Loi de Beer-Lambert :

$A = \varepsilon_{\lambda} \times \ell \times C(X)$ $A = k \times C(X) \text{ avec } k = \varepsilon_{\lambda} \times \ell$ <p style="text-align: center;">ou</p> $A = k' \times t(X) \text{ avec } k' = \frac{k}{M(X)}$	-A : Absorbance de la solution contenant l'espèce colorée X (sans unité) - $\varepsilon_{\lambda}$ : Coefficient d'absorption molaire de l'espèce colorée X à la longueur d'onde $\lambda$ ( $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$ ) - $\ell$ : Largeur de la cuve (cm) - C(X) ou t(X) : Concentration de l'espèce colorée X ( $mol \cdot L^{-1}$ ou $g \cdot L^{-1}$ )
--	---



**Limite** : La loi de Beer-Lambert n'est utilisable que pour des **solutions colorées de concentration en quantité de matière de soluté X inférieure à  $10^{-2} mol \cdot L^{-1}$**  (domaine linéaire de la loi).

### 2-Dosage par étalonnage spectrophotométrique :

Pour déterminer la concentration en quantité de matière ou en masse d'une espèce chimique colorée X dans une solution inconnue, il faut réaliser un **dosage par étalonnage spectrophotométrique** :

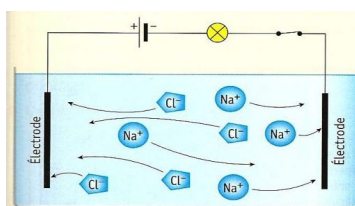


- Réaliser une **échelle de teinte** à partir d'une solution mère de concentration connue en espèce colorée X ;

Méthode graphique	Méthode calculatoire
-Réaliser une <b>courbe d'étalonnage</b> $A=f(C)$ ou $A=f(t)$ à partir des mesures de l'absorbance des solutions de l'échelle de teinte et de leur concentration ; -Réaliser la mesure, dans les mêmes conditions, de l' <b>absorbance de la solution inconnue</b> ; -A partir de la courbe d'étalonnage et par <b>lecture graphique</b> (ou <b>modélisation</b> ), déterminer la valeur de la concentration de l'espèce chimique colorée X dans la solution inconnue.	-A partir des mesures de l'absorbance des solutions de l'échelle de teinte et de leur concentration, <b>calculer les valeurs du coefficient de proportionnalité k puis faire la moyenne <math>k_{moy}</math></b> . -Ecrire l'expression numérique de la <b>loi de Beer-Lambert en précisant les unités utilisées</b> . -A partir de l' <b>expression numérique</b> , déterminer la valeur de la concentration de l'espèce chimique colorée X dans la solution inconnue.

## II-Analyse par mesure de conductivité

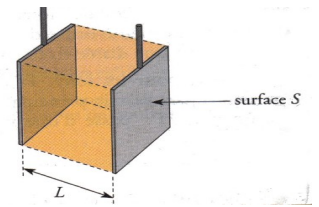
### 1-Conductance, conductivité et loi de Kohlrausch :



Une solution ionique, aussi appelée **solution électrolytique**, conduit le courant électrique contrairement à une solution moléculaire qui ne contient pas d'ions. Une solution ionique se comporte comme un **conducteur ohmique de résistance R** obéissant à la loi d'Ohm. Le passage d'un courant dans une telle solution est dû à la double migration des ions dans deux sens opposés (photo ci-contre).

• **Conductance :**

La conductance d'une portion de solution (de surface S et de longueur L) comprise entre les électrodes correspond à l'**inverse de la résistance R**. Elle se note **G** et s'exprime en **siemens (S)**. Elle est proportionnelle à la surface S, à la conductivité  $\sigma$  et inversement proportionnelle à l'écartement entre les électrode L.



• **Conductivité :**

La conductivité d'une solution traduit son **aptitude à conduire le courant électrique**. Plus les ions que contient la solution sont nombreux et mobiles, plus la conductivité est élevée. Elle se note  $\sigma$  et s'exprime en **siemens par mètre ( S.m<sup>-1</sup> )**.

La conductivité  $\sigma$  d'une solution se mesure avec un **conductimètre** et d'une **cellule conductimétrique** (ci-contre). Pour obtenir des résultats fiables, le **conductimètre doit être étalonné** avant utilisation à l'aide d'une solution étalon de chlorure de potassium,  $(K^+, Cl^-)_{(aq)}$ , de conductivité connue et stable dépendant de la température de la solution.

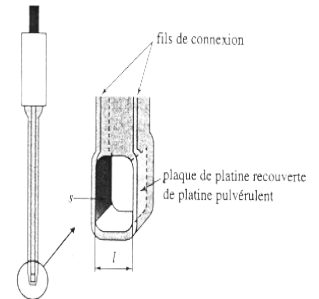


Schéma d'une cellule conductimétrique.

• **Loi de Kohlrausch :**

$\sigma = \sum_{ion} \lambda(ion) \times [ion]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\sigma</math> : Conductivité de la solution ( S.m<sup>-1</sup> )</li> <li>- <math>\lambda(ion)</math> : Conductivité molaire ionique de l'ion en solution ( S.m<sup>2</sup>.mol<sup>-1</sup> )</li> <li>- <math>[ion]</math> : Concentration en quantité de matière de l'ion en solution ( mol.m<sup>-3</sup> ) <b>ATTENTION!</b></li> </ul>
---	---



**Limite** : La conductivité molaire ionique de l'ion  $\lambda(ion)$  dépend de la valeur de la concentration, en se plaçant dans le cas de **solutions peu concentrées ( C < 10<sup>-2</sup> mol.L<sup>-1</sup> )** on peut considérer que  $\lambda(ion) \approx \lambda^\circ(ion)$  (  $\lambda^\circ(ion)$  est la **conductivité molaire ionique limite** de l'ion c'est-à-dire quand la concentration tend vers 0, ces valeurs sont connues et tabulées).

**Conversion de concentration en quantité de matière :**

- $1 \frac{mol}{L} = 1 \frac{mol}{dm^3} = 1 \frac{mol}{(10^{-1} m)^3} = 1 \frac{mol}{10^{-3} m^3} = 1 \times 10^3 \frac{mol}{m^3}$  ( mol.L<sup>-1</sup> => mol.m<sup>-3</sup> )
- $1 \frac{mol}{m^3} = 1 \frac{mol}{(10 dm)^3} = 1 \frac{mol}{10^3 dm^3} = 1 \frac{mol}{10^3 L} = 1 \times 10^{-3} \frac{mol}{L}$  ( mol.m<sup>-3</sup> => mol.L<sup>-1</sup> )



Pour une solution obtenue par dissolution d'**un seul solide ionique**, la loi de Kohlrausch se simplifie par :  $\sigma = k \times C$  ou  $\sigma = k' \times t$  avec « C » et « t » la concentration en quantité de matière ou en masse du solide ionique dissous dans la solution.

**Exemple** : Conductivité d'une solution de sulfate de sodium

Le sulfate de sodium ( Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ) est un solide ionique. L'équation de la réaction modélisant la dissolution totale dans l'eau est :  $Na_2SO_4(s) \xrightarrow{eau} 2 Na^+(aq) + SO_4^{2-}(aq)$  .

L'expression de la conductivité de la solution est :  $\sigma = \lambda(Na^+) \times [Na^+] + \lambda(SO_4^{2-}) \times [SO_4^{2-}]$  .

L'équation de la réaction permet d'écrire :  $[Na^+] = 2 \times \frac{n_0(Na_2SO_4)}{V_{sol}}$  et  $[SO_4^{2-}] = \frac{n_0(Na_2SO_4)}{V_{sol}}$

On pose  $C = \frac{n_0(Na_2SO_4)}{V_{sol}}$   $\Leftrightarrow \sigma = \lambda(Na^+) \times 2C + \lambda(SO_4^{2-}) \times C \Leftrightarrow \sigma = [2\lambda(Na^+) + \lambda(SO_4^{2-})] \times C = k \times C$

La conductivité de la solution est proportionnelle à la concentration C du sulfate de sodium dissous.

## 2-Dosage par étalonnage conductimétrique :



Pour pouvoir réaliser une dosage par étalonnage conductimétrique, il faut que la solution à doser contienne **un seul solide ionique dissous**.

Pour déterminer la concentration du solide ionique X dissous dans une solution inconnue, il faut réaliser un **dosage par étalonnage conductimétrique** :



- Réaliser une **gamme d'étalonnage** à partir d'une solution mère de concentration connue en solide ionique X ;

Méthode graphique	Méthode calculatoire
<p>-Réaliser une <b>courbe d'étalonnage</b> <math>\sigma=f(C)</math> ou <math>\sigma=f(t)</math> à partir des mesures de la conductivité des solutions de la gamme d'étalonnage et de leur concentration ;</p> <p>-Réaliser la mesure, dans les mêmes conditions, de la <b>conductivité de la solution inconnue</b> ;</p> <p>-A partir de la courbe d'étalonnage et par <b>lecture graphique</b> (ou <b>modélisation</b>), déterminer la valeur de la concentration du solide ionique X dissous dans la solution inconnue.</p>	<p>-A partir des mesures de la conductivité des solutions de la gamme d'étalonnage et de leur concentration, <b>calculer les valeurs du coefficient de proportionnalité k puis faire la moyenne <math>k_{moy}</math></b> .</p> <p>-Ecrire l'expression numérique de la <b>loi de Kohlrausch simplifiée en précisant les unités utilisées</b>.</p> <p>-A partir de l'<b>expression numérique</b>, déterminer la valeur de la concentration du solide ionique X dissous dans la solution inconnue.</p>

## III-Analyse par mesure de la pression d'un gaz

### 1-Equation des gaz parfaits :

- **Gaz parfait :**

Un gaz parfait est un **modèle** décrivant le comportement des **gaz à basse pression** (les molécules de gaz sont suffisamment éloignées les unes des autres pour que l'on puisse négliger les interactions électrostatiques qui dépendent de la nature du gaz (molécules polaires ou apolaires)).

On considérera un gaz comme parfait pour des **pressions inférieures à quelques bars (jusqu'à 10 bars)**.

- **Equation des gaz parfaits :**

$P \times V(X) = n(X) \times R \times T$	<p>-P : pression du gaz parfait (Pascal <math>\Leftrightarrow</math> Pa) 1 bar = <math>10^5</math> Pa = <math>10^3</math> hPa</p> <p>-V(X) : volume occupé par le gaz parfait X ( <math>m^3</math> ) 1 L = <math>10^{-3} m^3</math></p> <p>-n(X) : quantité de matière du gaz parfait X (mol)</p> <p>-R : constante des gaz parfaits ( <math>R = 8,314 Pa \cdot m^3 \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}</math> )</p> <p>-T : température du gaz parfait (Kelvin <math>\Leftrightarrow</math> K) <math>T(K) = \theta(^{\circ}C) + 273,15</math></p>
--	--



Pour un gaz parfait X, on peut trouver l'expression du **volume molaire**  $V_m$  .

$$V_m = \frac{V(X)}{n(X)} \text{ or } n(X) = \frac{P \times V(X)}{R \times T} \Leftrightarrow V_m = \frac{V(X) \times R \times T}{P \times V(X)} \Leftrightarrow V_m = \frac{R \times T}{P}$$

**Le volume molaire d'un gaz parfait ne dépend que de la température et de la pression du gaz.**

### 2-Mesure de la pression d'un gaz :

La pression d'un gaz peut être mesurée grâce à un **manomètre** ou un **pressiomètre**.

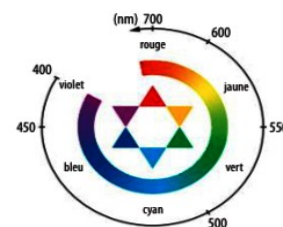


## IV-Analyse par spectroscopie

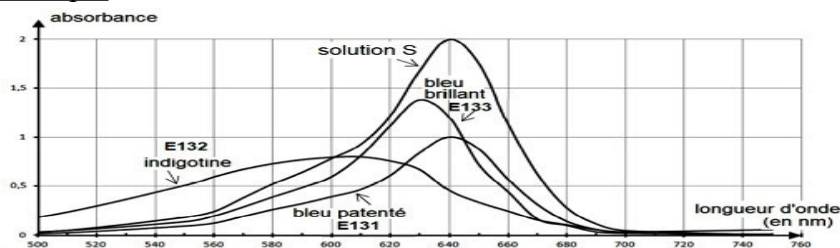
### 1-Spectroscopie UV-visible :

Une **espèce chimique est caractérisée par son spectre d'absorption UV-visible** c'est-à-dire le graphique représentant les variations de l'absorbance en fonction de la longueur d'onde. On réalise un spectre d'absorption UV-visible grâce à un **spectrophotomètre** relié à un ordinateur.

Pour les espèces chimiques colorées, la détermination de la **longueur d'onde du maximum d'absorbance** permet de remonter à la **couleur de l'espèce chimique** : une espèce chimique **absorbe la lumière colorée correspond à  $\lambda_{\max}$**  et elle **diffuse la lumière colorée complémentaire** à celle absorbée (voir cercle chromatique ci-contre).



Exemple : Différents colorants bleus



Par comparaison des différents spectres d'absorption UV-visible, la solution S est une solution contenant du bleu patenté E131 car ils ont le même  $\lambda_{\max}$ .

## 2-Spectroscopie infrarouge :

La spectroscopie infrarouge est une **technique de diagnostic**, permettant de **déterminer la nature des liaisons chimiques présentes dans une molécule**, qui utilise les radiations infrarouges comme source de radiation.

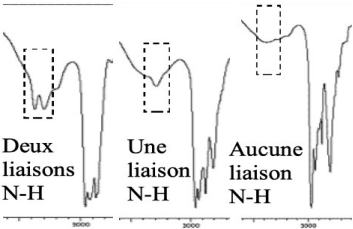
Une **bande d'absorption** est une bande de nombre d'onde bien déterminé qui **correspond à une baisse de la transmittance**. **A chaque bande d'absorption est associée un type de liaison.**

La région se trouvant entre  $1500\text{cm}^{-1}$  et  $4000\text{cm}^{-1}$  correspond à la région des bandes d'absorption correspondantes aux liaisons des groupes caractéristiques. **L'analyse de cette région permet de déterminer les groupes caractéristiques présents dans la molécule analysée.**



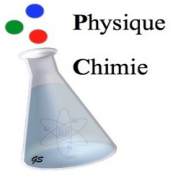
Les tables de données IR fournissent les valeurs de référence des nombres d'onde des bandes caractéristiques. Il ne faut donc pas apprendre par cœur les valeurs mais **savoir reconnaître la forme des bandes.**

<p><b>Bande associée à la liaison C-H</b></p>		<p>Pour un carbone à géométrie tétraédrique <math>\sigma \in [2800; 3000]\text{cm}^{-1}</math></p>
<p><b>Bande associée à la liaison O-H (alcool)</b></p>		<p>Large bande d'absorption de forte intensité <math>\sigma \in [3200; 3400]\text{cm}^{-1}</math>.</p>
<p><b>Bande associée à la liaison O-H (acide carboxylique)</b></p>		<p>Très large bande d'absorption de forte intensité <math>\sigma \in [2600; 3500]\text{cm}^{-1}</math> =&gt; <b>Chevauchement des bandes d'absorption des liaisons O-H et C-H</b> conduisant à un aspect très caractéristique du spectre.</p>
<p><b>Bande associée à la liaison C=O</b></p>		<p>La liaison C=O chez les aldéhydes, cétones, acide carboxyliques, esters et amides. La position <math>\sigma \in [1650; 1750]\text{cm}^{-1}</math> de la bande d'absorption dépend de la famille.</p>

<p><b>Bande associée à la liaison N-H</b></p>	 <p>Deux liaisons N-H      Une liaison N-H      Aucune liaison N-H</p>	<p>La liaison N-H (amine et amide) donne lieu à une (ou deux) bande(s) d'absorption de faible intensité <math>\sigma \in [3100; 3500] \text{ cm}^{-1}</math>.</p>
<p><b>Bande associée à la liaison C-O</b></p>	<p>La liaison C-O (alcool, acide carboxylique, ester) a une bande d'absorption de forte intensité situé entre <math>1050</math> et <math>1450 \text{ cm}^{-1}</math>. Cette bande se situe dans la zone d'empreinte digitale, elle est donc difficilement identifiable.</p>	



Animation : Ostralo - Spectre IR (exemples)

	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A4 - Dosages par titrage</b>	<b>Exercices obligatoires : 6 p 62 – 14 p 64</b>

Les dosages par titrage sont des dosages destructifs car ils font intervenir une transformation chimique.

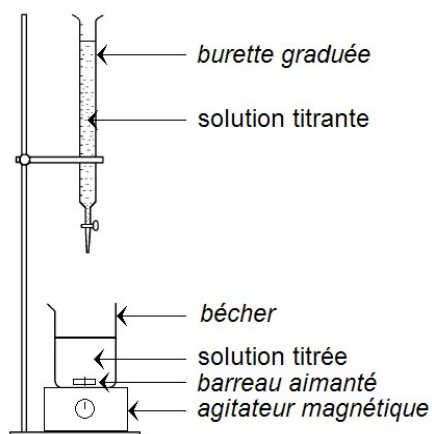
### I-Principe du dosage par titrage

Un dosage par titrage direct est une technique de dosage mettant en jeu une transformation chimique. Cette **transformation chimique support du titrage** doit être **totale**, **rapide** et **unique**.

Soit l'équation de la réaction modélisant la transformation chimique support du titrage :  $a A + b B \rightarrow c C + d D$  .

Le **réactif titré A** dont on cherche à déterminer la quantité de matière  $n_i(A)$  réagit avec le **réactif titrant B**, de concentration connue  $C_B$  .

#### -Dispositif de dosage par titrage :



Solution titrée contenant le réactif titré A :

- espèce A dans le bécher (ou dans un erlenmeyer)
- $C_A$  inconnue
- $V_A$  connu précisément (mesuré à la pipette jaugée)

Solution titrante contenant le réactif titrant B :

- espèce B dans la burette graduée
- $C_B$  connue
- $V_B$  versé connu (mesuré à la burette graduée)

Le réactif titrant B est versé petit à petit grâce à la burette graduée : il se produit alors **la transformation chimique support du titrage** qui met en jeu le réactif titré A et le réactif titrant B.



L'agitateur magnétique et le barreau aimanté permettent d'homogénéiser le mélange après chaque ajout de réactif titrant.

#### -Evolution du système chimique :

Le tableau d'avancement ci-dessous permet de décrire l'évolution de la composition du système chimique au cours du titrage :

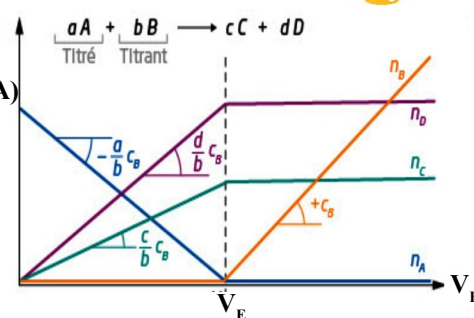


Equation support du titrage	a A	+ b B	→	c C	+ d D
<b>Avant l'équivalence</b> $V_B < V_E$ $\Rightarrow x_{\max} = \frac{C_B V_B}{b}$	$C_A V_A - a x_{\max}$ $C_A V_A - \frac{a}{b} C_B V_B$	$C_B V_B - b x_{\max} = 0$		$c x$ $\frac{c}{b} C_B V_B$	$d x$ $\frac{d}{b} C_B V_B$
<b>A l'équivalence</b> $V_B = V_E$ $\Rightarrow x_E = \frac{C_B V_E}{b} = \frac{C_A V_A}{a}$	$C_A V_A - a x_E = 0$	$C_B V_E - b x_E = 0$		$c x_E$ $\frac{c}{b} C_B V_E$	$d x_E$ $\frac{d}{b} C_B V_E$
<b>Après l'équivalence</b> $V_B > V_E$ $\Rightarrow x_E = \frac{C_B V_E}{b}$ Il n'y a plus de réaction chimique !	$C_A V_A - a x_E = 0$	$C_B V_B - b x_E$ $C_B V_B - C_B V_E$ $C_B (V_B - V_E)$		$c x_E$ $\frac{c}{b} C_B V_E$	$d x_E$ $\frac{d}{b} C_B V_E$

Au bout de l'ajout d'un certain volume de réactif titrant B, il se produit un **changement de réactif limitant** : on est à **l'équivalence du titrage**.

A l'équivalence, les réactifs **ont été introduits dans les proportions stœchiométriques de l'équation de la réaction support du titrage**.

Le volume  $V_B$  de solution titrante versé à l'équivalence est appelé **volume équivalent** ou **volume à l'équivalence** et **se note**  $V_E$ .



**Relation à l'équivalence :**

$\frac{n_i(A)_{\text{titré}}}{a} = \frac{n_E(B)_{\text{titrant versé}}}{b}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>n_i(A)_{\text{titré}}</math> : Quantité de matière du réactif titré A introduite dans le bécher (mol)</li> <li>- <math>n_E(B)_{\text{titrant versé}}</math> : Quantité de matière du réactif titrant B versé à l'équivalence (mol)</li> <li>- a et b : Coefficients stœchiométriques associés à A et B.</li> </ul>
---	---

## **II-Les dosages par titrage colorimétrique**

Lors de certains dosage par titrage, un changement de couleur de la solution contenue dans le bécher est observé. Il s'agit d'un **dosage par titrage colorimétrique**.

**Comment repère-t-on l'équivalence ?**



-Soit un changement de couleur du milieu réactionnel lors du changement de réactif limitant, c'est le cas lorsque l'un des réactifs ou des produits est une espèce colorée : on parle de **dosage auto-indicateur** ;

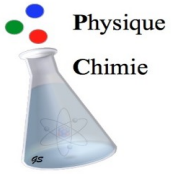
-Soit un changement de couleur d'un **indicateur coloré**, appelé **indicateur de fin de réaction**, introduit préalablement en très petite quantité dans le bécher, lors du changement de réactif limitant.

**Réalisation d'un dosage par titrage colorimétrique :**

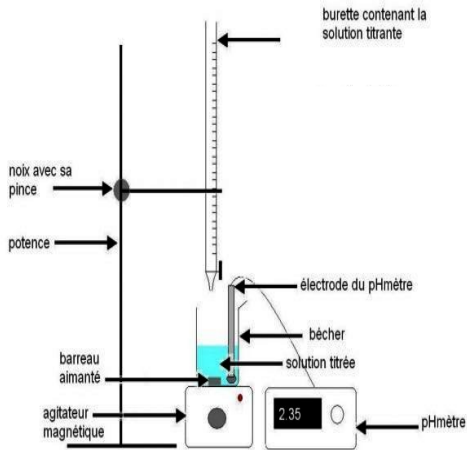
-Faire un titrage rapide en versant le réactif titrant mL par mL et en repérant le volume équivalent approximatif ;

-Faire un titrage précis en versant rapidement le réactif titrant jusqu'à environ 2 mL avant le volume équivalent approximatif, puis faire un goutte à goutte lent ;

-Relever le volume à l'équivalence lorsque la solution a changé de couleur.

	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A5 -</b> <b>Dosage par titrage pH-métrique</b>	<b>Exercices obligatoires : 11 p 63 – 19 p 65 – 25 p 69</b> <b>Exercice en plus : 18 p 65</b>

## I-Principe d'un dosage par titrage pH-métrique



Un dosage par titrage pH-métrique peut être envisagé lorsque **la transformation chimique support du titrage est une transformation acido-basique.**

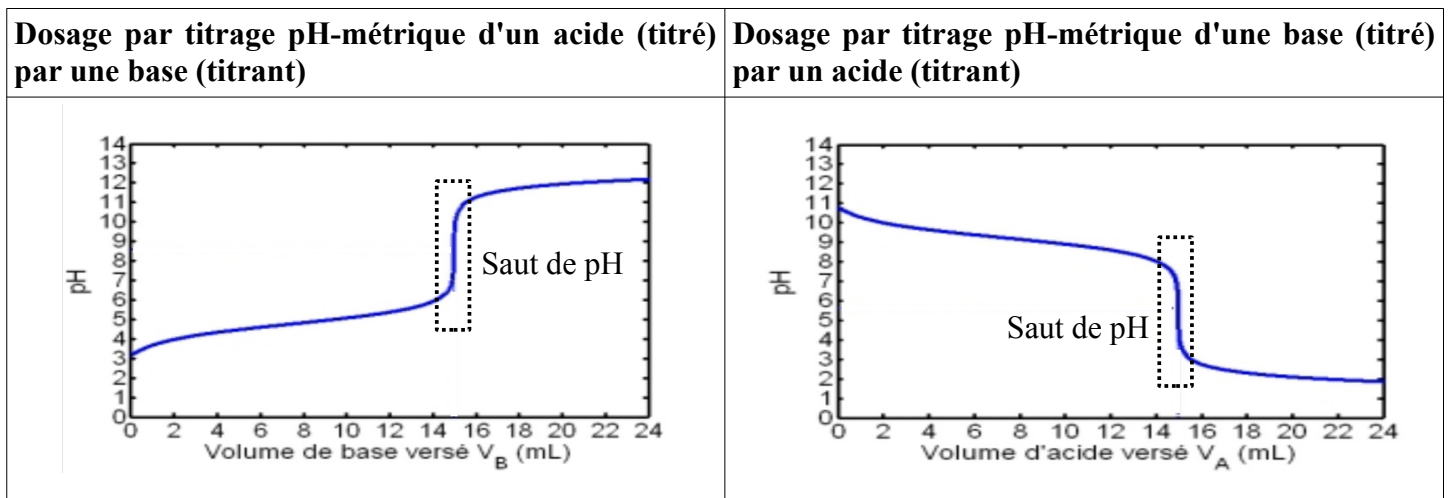
Il faut :

- Etalonner correctement le pH-mètre à l'aide des solutions étalon (solutions tampons).
- Relever la valeur du pH en fonction du volume de solution titrante versé  $V$  (mL par mL) ;
- Tracer le graphique représentant l'évolution du pH en fonction du volume de solution titrante versé ( $\text{pH}=f(V)$ ).



Il est possible de rajouter de l'eau distillée dans le bêcher afin que l'électrode du pH-mètre soit immergée **sans modifier la quantité de matière initiale du réactif titré !**

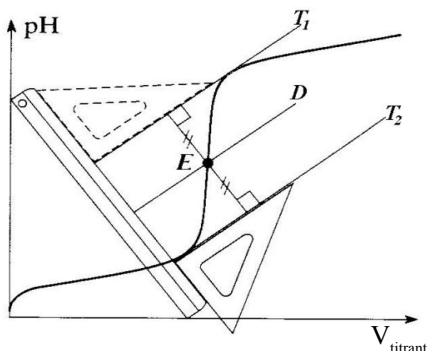
### Allure des courbes $\text{pH}=f(V)$ :



**ATTENTION!** Le pH du mélange réactionnel varie fortement au voisinage de l'équivalence. Cette variation brutalement du pH se traduit sur la courbe  $\text{pH}=f(V)$  par un **saut de pH**.

## II-Détermination de l'équivalence

- **Par la méthode des tangentes parallèles :**



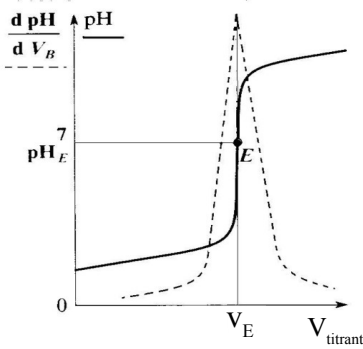
Le point équivalent E caractéristique de l'équivalence peut être déterminé graphiquement par **la méthode des tangentes parallèles** :

- On trace deux tangentes ( $T_1$  et  $T_2$ ) à la courbe, parallèles, en deux points situés, l'un, avant l'équivalence, l'autre, après, dans les domaines de forte concavité ;
- Puis on trace, entre ces deux droites, la parallèle équidistante (D) : elle coupe la courbe au point équivalent E.

L'abscisse du point équivalent E correspond au **volume équivalent** et l'ordonnée du point équivalent correspond au **pH à l'équivalence**.



• **Par la méthode de la courbe dérivée :**



Le point équivalent E peut être déterminé graphiquement par **la méthode de la courbe dérivée** si l'on dispose d'un ordinateur :

-On crée une grandeur  $\text{dpH} = \frac{d\text{pH}}{dV_{\text{titrant}}}$

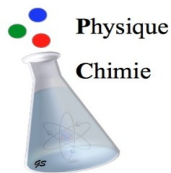
-On trace, grâce à un tableur-grapheur comme Regressi, la courbe  $\text{dpH} = f(V_{\text{titrant}})$

-Cette courbe passe par un extremum (minimum ou maximum) pour le point équivalent E. **L'abscisse de cet extremum donne la valeur du volume équivalent.**



Si la courbe  $\text{pH} = f(V)$  est croissante, la courbe dérivée présentera un maximum.

Si la courbe  $\text{pH} = f(V)$  est décroissante, la courbe dérivée présentera un minimum.

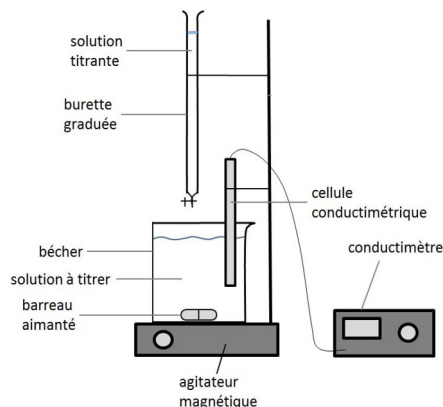


# Constitution et transformation de la matière

## - Fiche A6 - Dosage par titrage conductimétrique

Exercices obligatoires : 16 p 64 – 21 p 66

### I-Principe d'un dosage par titrage conductimétrique



Un titrage conductimétrique peut être envisagé lorsque **la transformation chimique support du titrage fait intervenir des ions**. C'est par exemple le cas pour toutes les transformations acido-basiques.

Il faut :

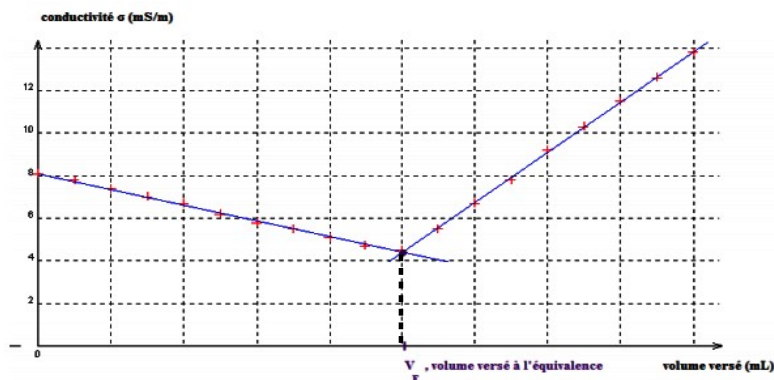
- Etalonner correctement le conductimètre ;
- Relever la valeur de la conductivité  $\sigma$  en fonction du volume de solution titrante versé  $V$  (mL par mL) ;
- Tracer le graphique représentant l'évolution de la conductivité  $\sigma$  en fonction du volume de solution titrante versé.



Dans le cas de dosage par titrage conductimétrique, on ajoute très souvent une **grande quantité d'eau** (mesurée à l'éprouvette graduée car la précision importe peu !) ce qui **permet de négliger les effets de dilution** lors du titrage et que la **conductivité mesurée soit une fonction affine du volume de solution titrante versée**.

### II-Détermination de l'équivalence

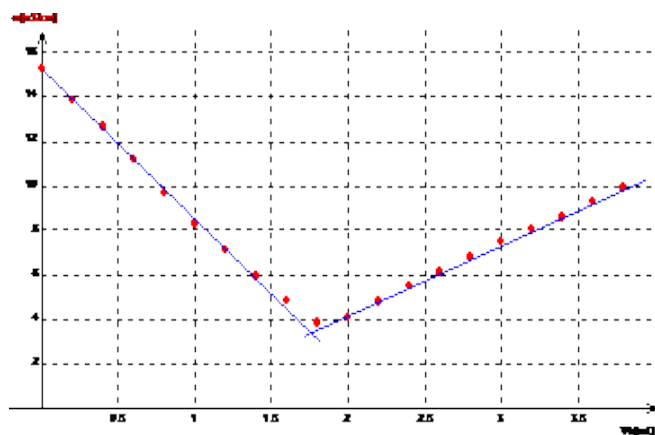
Le graphique est la réunion de deux portions de droite de coefficients directeur différents **si la dilution est négligeable au cours de l'ajout du réactif titrant lors du titrage**.



Détermination du volume à l'équivalence :

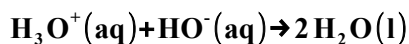
- On trace les deux portions de droite moyenne à la règle (sur papier) ou on modélise, avec Regressi, par deux fonctions affine chaque portion de droite (avec un ordinateur)
- L'abscisse du point d'intersection des deux portions de droite est le volume à l'équivalence  $V_E$ .

### III-Interprétation qualitative de la courbe $\sigma=f(V)$

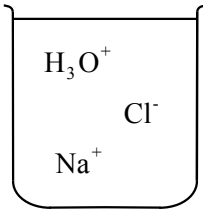
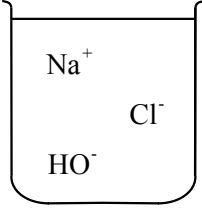


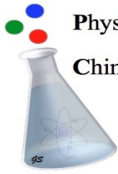
L'interprétation des courbes de ce type se base toujours sur l'évolution des quantités des diverses espèces ioniques présentes en solution, ainsi que sur leur mobilité respective caractérisée par leur conductivité molaire ionique  $\lambda$ .

On se propose ici d'interpréter en détail la courbe  $\sigma=f(V)$  pour le dosage par titrage conductimétrique d'une solution d'acide chlorhydrique,  $(H_3O^+ + Cl^-)_{(aq)}$ , par une solution d'hydroxyde de sodium,  $(Na^+ + HO^-)_{(aq)}$  :



L'expression de la conductivité  $\sigma$  du milieu réactionnel dépend de **tous les ions présents, y compris les ions spectateurs.**

Avant l'équivalence	Après l'équivalence
<p><u>Réactif titré</u> : <math>[\text{H}_3\text{O}^+]</math> <b>en excès</b>  <u>Réactif titrant</u> : <math>[\text{HO}^-]</math> <b>limitant</b>  <u>Solution titrée</u> : <math>(\text{H}_3\text{O}^+ + \text{Cl}^-)_{(\text{aq})}</math>  <u>Solution titrante</u> : <math>(\text{Na}^+ + \text{HO}^-)_{(\text{aq})}</math></p>	<p><u>Réactif titré</u> : <math>[\text{H}_3\text{O}^+]</math> <b>limitant</b>  <u>Réactif titrant</u> : <math>[\text{HO}^-]</math> <b>en excès</b>  <u>Solution titrée</u> : <math>(\text{H}_3\text{O}^+ + \text{Cl}^-)_{(\text{aq})}</math>  <u>Solution titrante</u> : <math>(\text{Na}^+ + \text{HO}^-)_{(\text{aq})}</math></p>
	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>[\text{H}_3\text{O}^+]</math> diminue</li> <li>- <math>[\text{Cl}^-]</math> reste constante si la dilution est négligeable</li> <li>- <math>[\text{Na}^+]</math> augmente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>[\text{Na}^+]</math> augmente</li> <li>- <math>[\text{HO}^-]</math> augmente</li> <li>- <math>[\text{Cl}^-]</math> reste constante si la dilution est négligeable</li> </ul>
<p>Pour un ion <math>\text{H}_3\text{O}^+</math> consommé par la réaction de titrage, on ajoute un ion <math>\text{Na}^+</math> issu de la solution titrante : un ion <math>\text{H}_3\text{O}^+</math> est donc remplacé par un ion <math>\text{Na}^+</math>.</p>	<p>Les ions <math>\text{Na}^+</math> et <math>\text{HO}^-</math> continuent à être ajoutés au bécher à chaque ajout de solution titrante.</p>
<p style="text-align: center;"><math>\lambda(\text{Na}^+) \ll \lambda(\text{H}_3\text{O}^+)</math></p> $\sigma = \underbrace{\lambda(\text{H}_3\text{O}^+)[\text{H}_3\text{O}^+]}_{\text{diminu fortement}} + \underbrace{\lambda(\text{Na}^+)[\text{Na}^+]}_{\text{augmente faiblement}} + \underbrace{\lambda(\text{Cl}^-)[\text{Cl}^-]}_{\text{reste constant}}$ <p>=&gt; La <u>conductivité diminue fortement.</u>  =&gt; On observe donc une <u>droite décroissante.</u></p>	<p style="text-align: center;"><math>\lambda(\text{Na}^+) \ll \lambda(\text{HO}^-)</math></p> $\sigma = \underbrace{\lambda(\text{Na}^+)[\text{Na}^+]}_{\text{augmente faiblement}} + \underbrace{\lambda(\text{Cl}^-)[\text{Cl}^-]}_{\text{reste constant}} + \underbrace{\lambda(\text{HO}^-)[\text{HO}^-]}_{\text{augmente fortement}}$ <p>=&gt; La <u>conductivité augmente fortement.</u>  =&gt; On observe donc une <u>droite croissante.</u></p>

 Physique Chimie	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A7 -</b> <b>Cinétique chimique : aspect qualitatif</b>	<b>Exercices obligatoires : 3 p 84 – 5 p 85</b>

La cinétique chimique consiste à étudier le **déroulement temporel des transformations chimiques**. Elle est fondamentale pour la chimie appliquée car une transformation chimique trop lente ne sera pas assez rentable ni assez efficace.

## I-Transformations lentes et rapides

### • Transformation rapide

On dit qu'une transformation est rapide si elle se fait en une durée trop courte pour que son évolution puisse être suivie "à l'œil nu" ou avec les appareils de mesure courants. C'est-à-dire qu'il est impossible de distinguer des états intermédiaires entre l'état initial et l'état final du système.

### • Transformation lente

Une transformation sera considérée lente si l'évolution temporelle d'un paramètre physico-chimique (comme la couleur, le pH, etc) de ce système peut s'apprécier à l'œil nu ou à l'aide d'un appareil de mesure (pHmètre, conductimètre, spectrophotomètre ...)



**Vidéo :**  
**Expériences**

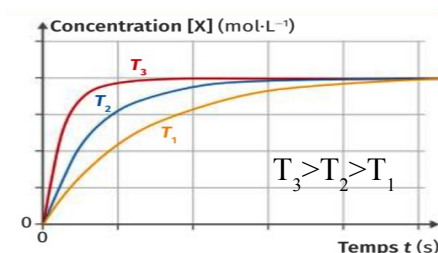
## II-Facteurs cinétiques

Un **facteur cinétique** est un paramètre expérimental qui modifie la durée d'une transformation chimique mais qui ne modifie pas l'état final du système chimique.

### 1-La température :

La température du milieu réactionnel est l'un des facteurs cinétiques le plus souvent utilisé pour modifier la durée d'une transformation chimique.

**Plus la température du milieu réactionnel est élevée, plus la durée de la transformation est courte et par conséquent l'évolution du système chimique sera rapide.**



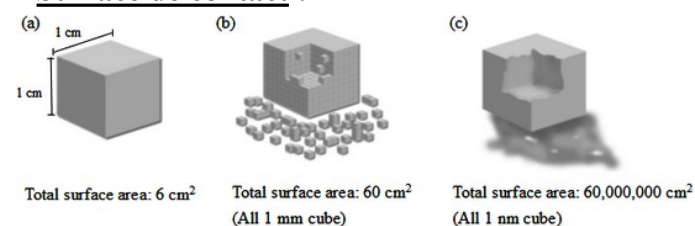
### 2-La concentration des réactifs :

**Plus la concentration des réactifs est importante, plus la transformation chimique qui est associée à ces réactifs sera rapide.**

### 3-Le choix du solvant :

Le solvant choisi pour dissoudre des réactifs n'est pas censé participer à la réaction chimique mais il est susceptible de dissoudre des quantités variables de solutés dont la concentration est un facteur cinétique important. Par ailleurs un solvant peut aussi avoir une influence directe sur la durée d'une transformation, il peut en effet interagir avec les réactifs (principalement par le biais de sa polarisation, des interactions de Van der Waals et des liaisons hydrogène) et ainsi favoriser ou empêcher leur contact ce qui accélère ou ralentit la transformation.

### 4-Surface de contact :



Pour un réactif solide, l'étendue de sa surface de contact avec les autres réactifs est un facteur cinétique. **Plus le solide est divisé, plus sa surface de contact est grande et plus la durée de la transformation chimique est courte.**

### III-Catalyseur et catalyse

#### 1-Définitions :

-Un catalyseur est une espèce chimique qui diminue la durée d'une transformation chimique sans toutefois apparaître dans l'équation de la réaction chimique.

Le catalyseur ne modifie pas l'état final de la transformation chimique et il peut être introduit en très faible quantité par rapport aux réactifs de la réaction.

-Catalyse : Processus qui vise à modifier la cinétique d'une transformation chimique dans l'objectif de diminuer sa durée.

#### 2-Différents types de catalyses :

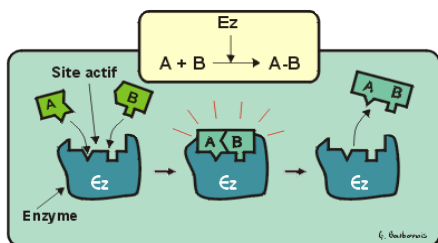
Il existe trois types de catalyse :

-**La catalyse homogène** : les réactifs et le catalyseur **sont dans la même phase** (liquide ou gazeuse en général).

Exemple : Décomposition de l'eau oxygénée en présence d'ion fer (III)

-**La catalyse hétérogène** : les réactifs et le catalyseur **ne sont pas dans la même phase**. L'immense majorité des cas de catalyse hétérogène fait intervenir un catalyseur sous forme solide, les réactifs étant alors gazeux et/ou liquides : la catalyse se fait alors à la surface du catalyseur.

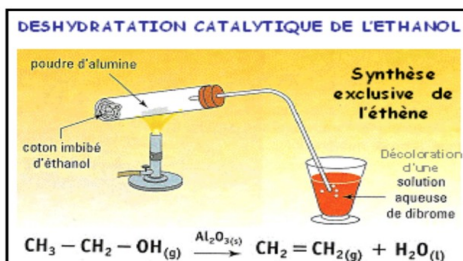
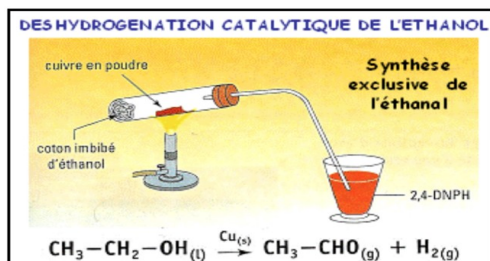
Exemple : Décomposition de l'eau oxygénée en présence de platine



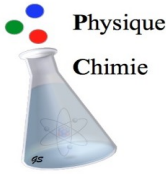
-**La catalyse enzymatique** : en biologie, les enzymes sont des catalyseurs des réactions métaboliques. Elles ont des structures basées sur des protéines. Les enzymes solubles peuvent être considérées comme intermédiaires entre les catalyseurs homogènes et hétérogènes; elles sont homogènes au niveau macroscopique mais au niveau moléculaire les réactions catalysées ont lieu sur la surface de l'enzyme comme pour la catalyse hétérogène.

Exemple : Décomposition de l'eau oxygénée en présence de sang ou de navet (enzyme : catalase)

#### 3-Sélectivité d'un catalyseur :



Un catalyseur est **sélectif si son action est spécifique**. Cela signifie qu'un système peut évoluer différemment selon le catalyseur utilisé, ou encore, **qu'un catalyseur peut orienter une transformation chimique**.

	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A8 -</b> <b>Cinétique chimique : aspect quantitatif</b>	<b>Exercices obligatoires : 8 p 85 – 9 p 85</b> <b>Exercice en plus : 22 p 90</b>

## I-Suivi cinétique

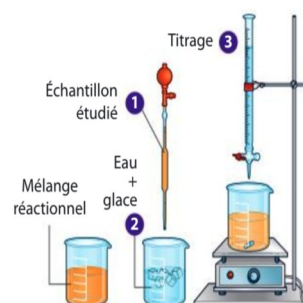
Le suivi cinétique d'une transformation chimique consiste à suivre l'évolution temporelle d'une grandeur physique ou chimique du système chimique au cours du temps.

Le suivi cinétique peut se faire :

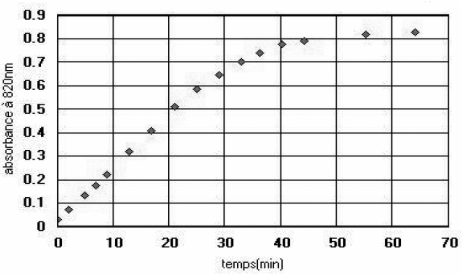
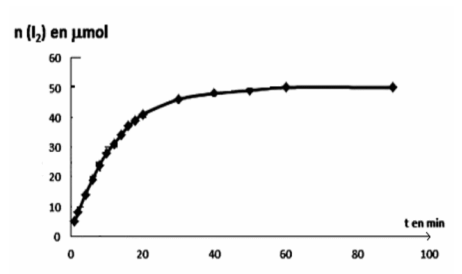
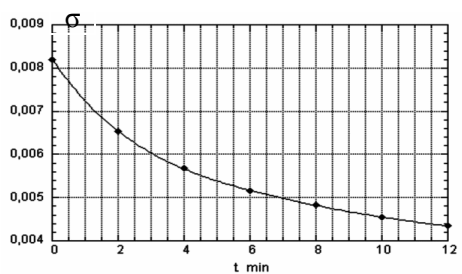
-à partir de la **mesure d'une grandeur physique (absorbance, conductivité, pH, pression, volume ..) grâce à un capteur (spectrophotomètre, conductimètre, pH-mètre ...)** ;

-à partir de **titrages successifs** de l'une des espèces du mélange réactionnel à intervalles de temps réguliers (voir photo ci-contre). Il est alors nécessaire de réaliser des **trempes** c'est-à-dire un **refroidissement brutal** du système chimique qui permet de **stopper l'évolution du système chimique**.

- 1 Prélèvement d'un échantillon du mélange réactionnel.
- 2 Réalisation d'une trempée avec dilution pour stopper la réaction.
- 3 Détermination de la concentration d'une des espèces chimiques présentes par titrage.



Allure de courbes obtenues par suivi cinétique :


Suivi cinétique par spectrophotométrie	Suivi cinétique par dosage par titrage	Suivi cinétique par conductimétrie
Mesure de l'absorbance à l'aide d'un spectrophotomètre	Détermination d'une quantité de matière ou concentration par titrage	Mesure de la conductivité à l'aide d'un conductimètre
		

L'évolution de ces grandeurs au cours du temps permet de déterminer l'évolution de vitesse de la réaction.

## II-Vitesses volumiques

### 1-Vitesse volumique d'apparition pour un produit :

La vitesse volumique d'apparition, à volume constant, pour un produit P à la date  $t_i$  peut être **assimilée** au rapport de la variation de la concentration du produit P  $\Delta[P]$  sur la durée  $\Delta t$  entre **deux instants,  $t_i$  et  $t_{i+1}$ , très proches**. On peut donc écrire :

 
$$v_{\text{app}}(P)(t_i) = \frac{\Delta[P]}{\Delta t} = \frac{[P](t_{i+1}) - [P](t_i)}{t_{i+1} - t_i} = \frac{[P](t_{i+1}) - [P](t_i)}{\Delta t} \quad \text{or} \quad t_{i+1} = t_i + \Delta t$$

On a donc 
$$v_{\text{app}}(P)(t_i) = \frac{[P](t_i + \Delta t) - [P](t_i)}{\Delta t}$$

Or lorsque  $\Delta t$  tend vers 0, 
$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{[P](t_i + \Delta t) - [P](t_i)}{\Delta t} \right) = \frac{d[P](t_i)}{dt}$$
 (définition de la dérivée à la date  $t_i$ )

La vitesse volumique d'apparition, à volume constant, pour un produit P est donc définie comme la **dérivée par rapport au temps de la concentration du produit P** :

$v_{\text{app}}(\text{P})(t) = \frac{d[\text{P}](t)}{dt}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- [P] : concentration du produit P ( mol.L<sup>-1</sup> ou g.L<sup>-1</sup> )</li> <li>- t : temps (s)</li> <li>- v<sub>app</sub>(P) : vitesse d'apparition du produit P ( mol.L<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup> ou g.L<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup> )</li> </ul>
---	---

## 2-Vitesse volumique de disparition pour un réactif :

La vitesse volumique de disparition, à volume constant, pour un réactif R à la date t<sub>i</sub> peut être **assimilée à l'opposé** du rapport de la variation de la concentration du réactif Δ[R] sur la durée Δt entre **deux instants, t<sub>i</sub> et t<sub>i+1</sub>, très proches**. On peut donc écrire :



$$v_{\text{disp}}(\text{R})(t_i) = -\frac{\Delta[\text{R}]}{\Delta t} = -\frac{[\text{R}](t_{i+1}) - [\text{R}](t_i)}{t_{i+1} - t_i} = -\frac{[\text{R}](t_{i+1}) - [\text{R}](t_i)}{\Delta t} \quad \text{or } t_{i+1} = t_i + \Delta t$$

On a donc 
$$v_{\text{disp}}(\text{R})(t_i) = -\frac{[\text{R}](t_i + \Delta t) - [\text{R}](t_i)}{\Delta t}$$



Une vitesse étant positive, le signe « - » vient du fait que la variation de la concentration du réactif est négative !

Or lorsque Δt tend vers 0, 
$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( -\frac{[\text{R}](t_i + \Delta t) - [\text{R}](t_i)}{\Delta t} \right) = -\frac{d[\text{R}](t_i)}{dt}$$
 (définition de la dérivée à la date t<sub>i</sub>)

La vitesse volumique de disparition, à volume constant, pour un réactif R est donc définie comme **l'opposée de la dérivée par rapport au temps de la concentration du réactif R** :

$v_{\text{disp}}(\text{R})(t) = -\frac{d[\text{R}](t)}{dt}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- [R] : concentration du réactif ( mol.L<sup>-1</sup> ou g.L<sup>-1</sup> )</li> <li>- t : temps (s)</li> <li>- v<sub>disp</sub>(P) : vitesse de disparition du réactif R ( mol.L<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup> ou g.L<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup> )</li> </ul>
---	--

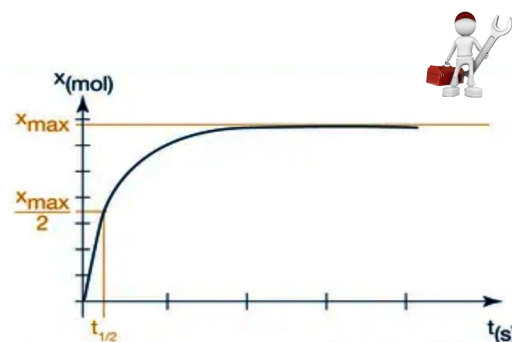
## 3-Détermination graphique d'une vitesse volumique :

Vitesse volumique de disparition d'un réactif	Vitesse volumique d'apparition d'un produit
<p>La valeur de la vitesse volumique de disparition d'un réactif à une date t<sub>i</sub> est <b>égale à l'opposé du coefficient directeur de la tangente à cette date</b>.</p>	<p>La valeur de la vitesse volumique d'apparition d'un produit à une date t<sub>i</sub> est <b>égale au coefficient directeur de la tangente à cette date</b>.</p>

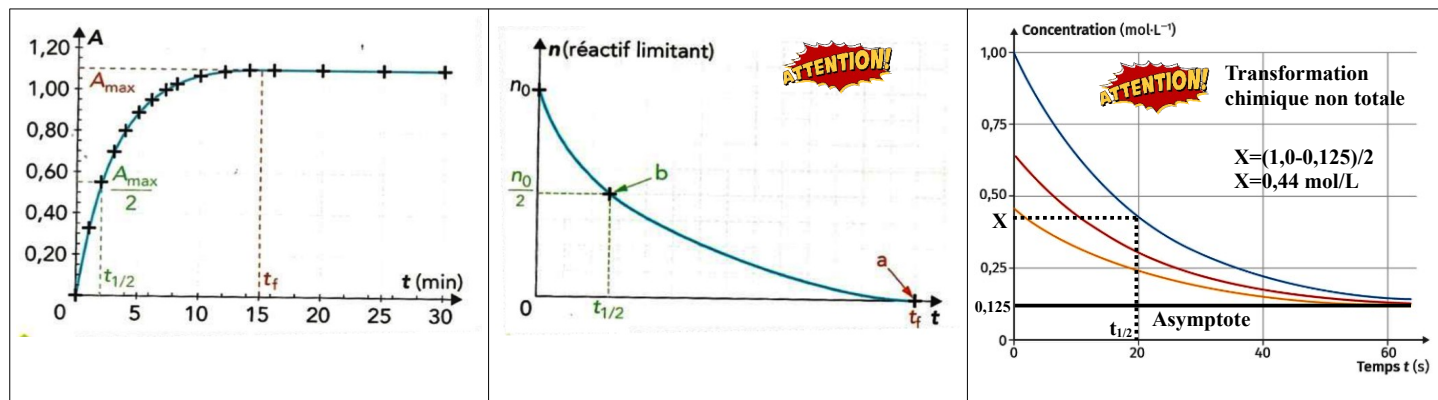
## III-Temps de demi-réaction

Pour une transformation chimique totale, le **temps de demi-réaction** t<sub>1/2</sub> correspond à la **durée au bout de laquelle la valeur de l'avancement x arrive à la moitié de sa valeur maximale** x<sub>max</sub>.

On peut considérer que la transformation chimique est terminée au **bout de quelques t<sub>1/2</sub>**. On peut alors déterminer la **durée de la transformation** t<sub>f</sub>.



Le temps de demi-réaction peut être également déterminé à partir de n'importe quelle autre grandeur physique ou chimique (quantité de matière, concentration, absorbance ...).



#### IV-Cinétique et équilibre chimique

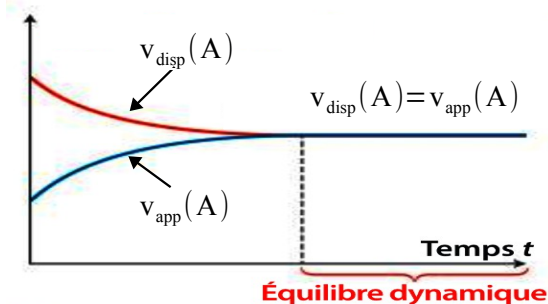
Soit l'équation de la réaction modélisant une transformation non totale :  $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$

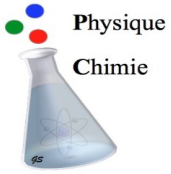
Dans le **sens direct**, la transformation conduit à la disparition de A et B. La vitesse volumique de disparition de A s'exprime par :  $v_{\text{disp}}(A)(t) = -\frac{d[A](t)}{dt}$ .

Dans le **sens indirect (ou inverse)**, la transformation conduit à l'apparition de A et B. La vitesse volumique d'apparition de A s'exprime par :  $v_{\text{app}}(A)(t) = \frac{d[A](t)}{dt}$ .

Lorsque le système chimique est à l'**état d'équilibre chimique** :

$v_{\text{disp}}(A)(t) = v_{\text{app}}(A)(t)$  c'est-à-dire que la vitesse volumique de disparition d'une espèce chimique intervenant dans la réaction est égale à sa vitesse volumique d'apparition. La transformation chimique est terminée et le système est à l'**état d'équilibre dynamique**.



	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A9 -</b> <b>Loi de vitesse d'ordre 1</b>	<b>Exercices obligatoires : 11 p 86 – 13 p 86</b> <b>Exercice en plus : 17 p 88</b>

## I-Réactions d'ordre 1

Soit les réactions suivantes :

-Réaction 1 :  $a A \rightarrow c C + d D$  (Réaction avec un seul réactif)

-Réaction 2 :  $a A + b B \rightarrow c C + d D$  (Réactions avec plusieurs réactifs)

Une réaction est dite d'ordre 1 par rapport au réactif A si, lorsque tous les autres réactifs sont en large excès (quantité de matière quasi constante au cours du temps), les vitesses volumiques de disparition du réactif A ou d'apparition des produits sont proportionnelles à la concentration du réactif A  $[A](t)$  au cours du temps.

REACTIF	PRODUITS	
$v_{\text{disp}}(A)(t) = -\frac{d[A](t)}{dt} = k[A](t)$	$v_{\text{app}}(C)(t) = \frac{d[C](t)}{dt} = k_1[A](t)$	$v_{\text{app}}(D)(t) = \frac{d[D](t)}{dt} = k_2[A](t)$

## II-Loi d'évolution

Obtention de l'équation différentielle vérifiée par la concentration du réactif A :



$$-\frac{d[A](t)}{dt} = k[A](t) \iff \boxed{\frac{d[A](t)}{dt} + k[A](t) = 0} \text{ avec } \tau = \frac{1}{k}$$

Obtention de la solution de l'équation différentielle :

-Solution homogène :  $[A]_h(t) = A e^{-\frac{1}{\tau}t} \iff [A]_h(t) = A e^{-k \times t}$

-Solution particulière : La solution particulière est de même nature que le second membre de l'équation différentielle donc  $[A]_p(t) = 0$

-Solution générale :  $[A](t) = [A]_h(t) + [A]_p(t) = A e^{-k \times t}$

-Condition initiale : A  $t=0$ s,  $[A](t=0\text{s}) = [A]_0 \iff [A](t=0) = A e^{-k \times 0} = [A]_0 \iff A = [A]_0$

On a donc  $[A](t) = [A]_0 e^{-k \times t}$

La solution de cette équation différentielle correspondant à la **loi de d'évolution de la concentration du réactif A dans une réaction d'ordre 1 par rapport au réactif A** :

$[A](t) = [A]_0 e^{-k \times t}$ $[A](t) = [A]_0 \exp(-k \times t)$	- $[A]_0$ : Concentration initiale du réactif A - $k$ : Constante de proportionnalité ( $s^{-1}$ si t en s )
--	---

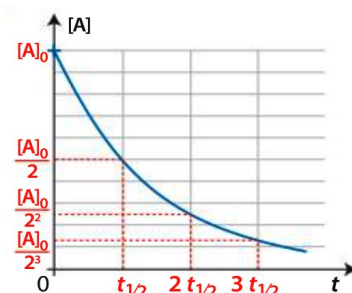


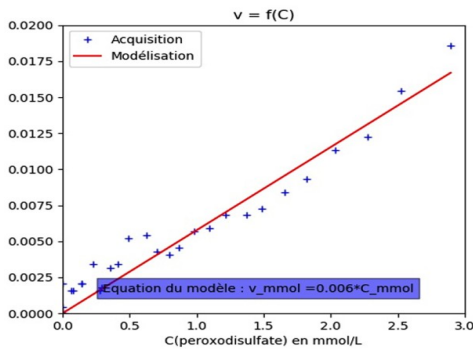
Il est important de savoir **établir** la solution de l'équation différentielle ou de **vérifier** qu'une solution fournie **est ou n'est** pas solution de l'équation différentielle.

## III-Méthodes de vérification de l'ordre 1

-Méthode 1 : Vérifier que l'évolution de la concentration du réactif A  $[A](t)$  suit la loi d'évolution  $[A](t) = [A]_0 \exp(-k \times t)$  :

- **Modélisation exponentielle** à l'ordinateur (Regressi)
- **La concentration initiale du réactif A est divisée par 2<sup>n</sup> pour une durée écoulée égale à  $n \times t_{1/2}$**  (voir graphique ci-contre).





**-Méthode 2 :** Vérifier, graphiquement ou numériquement, que les vitesses de disparition des réactifs ou d'apparition des produits sont liées par une **fonction linéaire (proportionnalité)** à la concentration du réactif A  $[A](t)$  au cours du temps (voir graphique ci-contre).

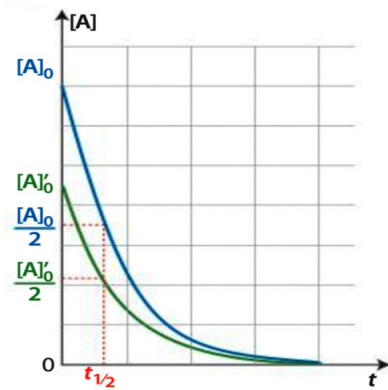
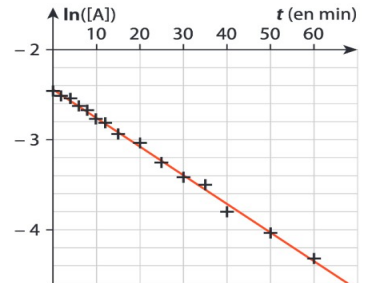
**-Méthode 3 :** Vérifier, graphiquement ou numériquement par régression linéaire à la calculatrice, que  $\ln([A](t))$  est une **fonction affine** du temps (voir graphique ci-contre).



$$\ln([A](t)) = \ln([A]_0 \exp(-k \times t))$$

$$\ln([A](t)) = \ln([A]_0) + \ln(\exp(-k \times t)) \iff \boxed{\ln([A](t)) = \ln([A]_0) - k t}$$

Le coefficient directeur de la droite est égal à  $-k$  et l'ordonnée à l'origine  $\ln([A]_0)$



**-Méthode 4 :** Vérifier que le temps de demi-réaction est indépendant de la concentration initiale du réactif A  $[A]_0$ . Il suffit de comparer les temps de demi-réaction de la réaction pour différentes valeurs de la concentration initiale de A.

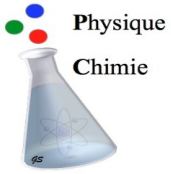


On peut montrer que le temps de demi-réaction d'une réaction d'ordre 1 par rapport au réactif A est indépendant de la concentration initiale de A :

$$[A](t_{1/2}) = \frac{[A]_0}{2} = [A]_0 \exp(-k \times t_{1/2}) \iff \exp(-k \times t_{1/2}) = \frac{1}{2}$$

$$\ln(\exp(-k \times t_{1/2})) = \ln\left(\frac{1}{2}\right) \iff -k \times t_{1/2} = -\ln(2) \iff \boxed{t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k}}$$

Le temps de demi-réaction d'une réaction d'ordre 1 par rapport au réactif A ne dépend que de la constante de proportionnalité  $k$ .

	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A10 -</b> <b>Noyaux et radioactivité</b>	<b>Exercices obligatoires : 6 p 122 – 10 p 122 – 23 p 125</b> <b>Exercice en plus : 24 p 125</b>

## I-La radioactivité

### 1-Stabilité des noyaux :

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

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

Un noyau  ${}^A_ZX$  instable subit une transformation aboutissant à la formation d'un nouveau noyau  ${}^{A'}_{Z'}Y$ , c'est le phénomène de **radioactivité**.



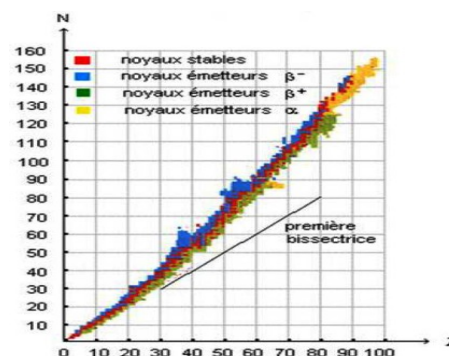
### 2-Diagramme de Segré :

Chaque élément chimique possède des **isotopes** qui ont le **même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent**.

Certains isotopes sont stables tandis que d'autres sont radioactifs.



Le diagramme de Segré ou **diagramme (N,Z)** indique les isotopes stables ou radioactifs et fournit le type d'émission radioactive (QR code ci-contre).



### 3-Types de radioactivité :

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

### 4-Lois de conservation :

Au cours d'une transformation nucléaire, il y a **conservation du nombre de masse et du nombre de charge**. Ce sont les lois de conservation, dites **lois de Soddy** :



$A = A_1 + A_2$  : conservation du nombre de masses, nucléons  
 $Z = Z_1 + Z_2$  : conservation du nombre de charges, protons



Au cours d'une transformation nucléaire, les éléments chimiques et la masse ne sont pas conservés.

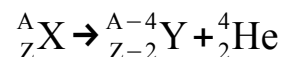
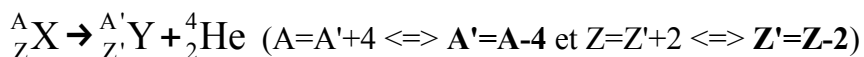
Au cours d'une transformation nucléaire, il y a également **conservation de l'énergie**.

## II-La radioactivité spontanée

La radioactivité spontanée se traduit par la désintégration d'un noyau instable appelé **noyau père** qui émet une ou plusieurs **particule(s)** en donnant un **noyau fils**. Cette désintégration peut s'accompagner de l'**émission d'un rayonnement γ (photon(s) γ)**.

### 1-La radioactivité α :

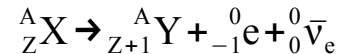
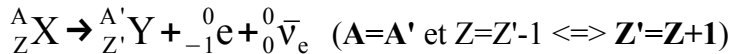
Elle concerne les noyaux lourds, instables à cause d'un excès de nucléons (neutrons et protons). Lors d'une désintégration α, il y a émission d'une **particule α** :  ${}^4_2\text{He}$ .



## 2-La radioactivité $\beta^-$ :

- La radioactivité  $\beta^-$

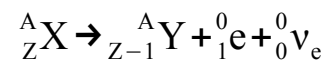
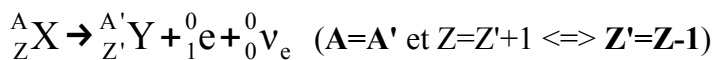
Elle concerne les noyaux instables à cause d'un **excès de neutrons**. Lors d'une désintégration  $\beta^-$ , il y a émission d'un **électron**  ${}_{-1}^0\text{e}$  et d'un **antineutrino électronique**  ${}^0_0\bar{\nu}_e$  qui assure la conservation de l'énergie.



Au cours de cette désintégration, le noyau transforme un neutron excédentaire en un proton, un électron et un antineutrino électronique suivant le bilan :  ${}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}_{-1}^0\text{e} + {}^0_0\bar{\nu}_e$ .

- La radioactivité  $\beta^+$

Elle concerne les noyaux instables à cause d'un **excès de protons**. Lors d'une désintégration  $\beta^+$ , il y a émission d'un **positron (ou positon)**  ${}^0_1\text{e}$  et d'un **neutrino électronique**  ${}^0_0\nu_e$  qui assure la conservation de l'énergie.

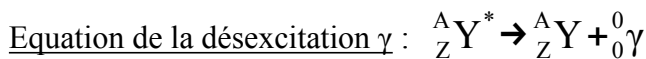


Au cours de cette désintégration, le noyau transforme un proton excédentaire en un neutron, un positron et un neutrino électronique suivant le bilan :  ${}^1_1\text{p} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^0_1\text{e} + {}^0_0\nu_e$ .

Cette radioactivité ne concerne que des noyaux artificiels, obtenus par des réactions nucléaires, qui possèdent trop de protons.

## 3-La radioactivité $\gamma$ (ou désexcitation $\gamma$ ) :

Le noyau obtenu à l'issue d'une désintégration ( $\alpha$  ou  $\beta$ ) est souvent dans un état excité : il possède trop d'énergie et il perd cet excès d'énergie en émettant un **rayonnement  $\gamma$**  c'est-à-dire **un ou plusieurs photons  $\gamma$**  très énergétiques.

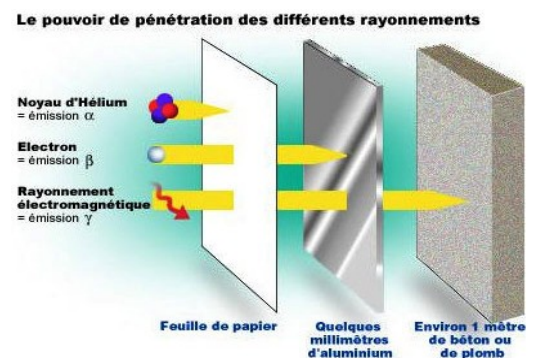


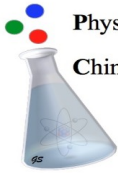
## 4-Dangers et applications :

Les particules  $\alpha$ ,  $\beta$  et les rayonnements  $\gamma$  sont ionisants, ils transforment les atomes en ions lorsqu'ils traversent la matière.

Il est possible de s'en protéger par des matériaux adaptés.

Les rayonnements  $\gamma$  sont utilisés dans le domaine médical pour :  
-réaliser des diagnostics par imagerie médicale (scintigraphie) ;  
-détruire des cellules cancéreuses (curiethérapie).



 Physique Chimie	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A11 -</b> <b>Décroissance radioactive</b>	<b>Exercices obligatoires : 14 p 123 – 25 p 125</b> <b>Exercices en plus : 32 p 128 – 33 p 129</b>

## I-Evolution d'une population de noyaux radioactifs

### 1-Désintégration d'un noyau radioactif :

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

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

### 2-Evolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs :

Obtention de l'équation différentielle vérifiée par le nombre de noyaux radioactifs :



A la date  $t$ , un échantillon de noyaux radioactifs contient  $N(t)$  noyaux non désintégrés.

A la date  $t+\Delta t$ , la population de noyaux a diminué, l'échantillon contient  $N(t+\Delta t)$  noyaux non désintégrés.

La variation du nombre de noyaux  $\Delta N(t)$  pendant la durée  $\Delta t$  vaut :  $\Delta N(t) = N(t+\Delta t) - N(t) < 0$

Le **nombre de désintégrations** produites pendant cette durée est donc  $-\Delta N(t)$ , il est proportionnel au nombre de noyaux de l'échantillon  $N(t)$  et à la durée de comptage  $\Delta t$  :  $-\Delta N(t) = \lambda \times N(t) \times \Delta t$  avec  $\lambda$  la **constante radioactive** (en  $s^{-1}$ ,  $min^{-1}$  ...) qui **dépend du noyau radioactif étudié**.

Cette constante radioactive correspond à la **probabilité de désintégration d'un noyau donné par unité de temps**.

On peut donc écrire :  $\frac{\Delta N(t)}{\Delta t} + \lambda \times N(t) = 0$ .

Or lorsque  $\Delta t$  tend vers 0,  $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta N(t)}{\Delta t} \right) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{N(t+\Delta t) - N(t)}{\Delta t} \right) = \frac{dN(t)}{dt}$  (définition de la dérivée)

On obtient alors l'équation différentielle suivante :  $\frac{dN(t)}{dt} + \lambda \times N(t) = 0$  avec  $\tau = \frac{1}{\lambda}$

Obtention de la solution de l'équation différentielle :

-Solution homogène :  $N_h(t) = A e^{-\frac{1}{\tau} \times t} \Leftrightarrow N_h(t) = A e^{-\lambda \times t}$

-Solution particulière : La solution particulière est de même nature que le second membre de l'équation différentielle donc  $N_p(t) = 0$

-Solution générale :  $N(t) = N_h(t) + N_p(t) = A e^{-\lambda \times t}$

-Condition initiale : A  $t=0s$ ,  $N(t=0s) = N_0 \Leftrightarrow N(t=0) = A e^{-\lambda \times 0} = N_0 \Leftrightarrow A = N_0$

On a donc  $N(t) = N_0 e^{-\lambda \times t}$

La solution de cette équation différentielle correspondant à la **loi de décroissance radioactive** :

$N(t) = N_0 e^{-\lambda \times t}$ $N(t) = N_0 \exp(-\lambda \times t)$	- $N_0$ : Nombre de noyaux initialement présents dans l'échantillon. - $\lambda$ : Constante radioactive (en $s^{-1}$ si $t$ en s).
---	--



Il est important de savoir **établir** la solution de l'équation différentielle ou de **vérifier** qu'une solution fournie **est ou n'est pas** solution de l'équation différentielle.

### 3-Demi-vie d'un noyau radioactif :

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

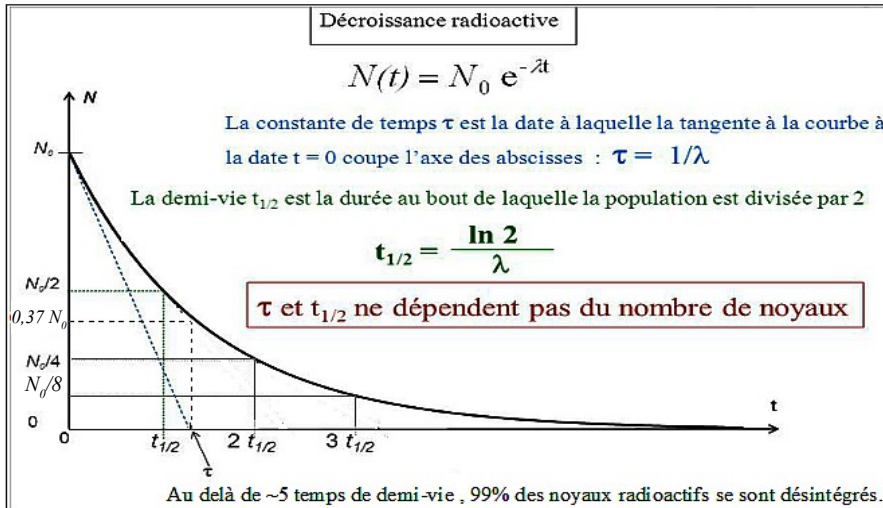


$$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2} = N_0 \exp(-\lambda \times t_{1/2}) \iff \frac{1}{2} = \exp(-\lambda \times t_{1/2})$$

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\ln(2) = \ln(\exp(-\lambda \times t_{1/2})) = -\lambda \times t_{1/2} \iff \boxed{t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}} \text{ ou } t_{1/2} = \tau \ln(2)$$

nucléides	temps de demi-vie
Uranium 238	$4,5 \cdot 10^9$ ans
Potassium 40	$1,3 \cdot 10^9$ ans
Thorium 230	$8,0 \cdot 10^4$ ans
Carbone 14	$5,7 \cdot 10^3$ ans
Radium 226	$1,6 \cdot 10^3$ ans
Plomb 210	22 ans

### 4-Exploitation de la courbe N(t) :



Détermination de la constante de temps de la désintégration radioactive :

=> Méthode 1 : Tangente à la courbe à  $t=0$ s

La tangente à la courbe à  $t=0$ s coupe l'asymptote horizontale de  $N(t)$  pour  $t=\tau$ .

=> Méthode 2 : Résoudre  $N(t=\tau)$

$$N(\tau) = N_0 \exp\left(-\frac{1}{\tau} \times \tau\right)$$

$$N(\tau) = N_0 \exp(-1) = 0,37 N_0$$

On peut considérer que la désintégration de la population de noyaux radioactifs est **terminée au bout de  $5\tau$  ou  $7t_{1/2}$**  car il reste moins de 1% de noyaux non désintégrés.

$$N(5\tau) = N_0 \exp\left(-\frac{1}{\tau} \times 5\tau\right) \iff N(5\tau) = N_0 \exp(-5)$$

D'où  $N(5\tau) = 0,0067 N_0$  (0,67% de  $N_0$ )



Animation :  
Décroissance radioactive

### 5-Activité :

L'**activité** d'un échantillon radioactif est le **nombre de désintégrations par seconde**. Elle se mesure avec un compteur Geiger et s'exprime en **Becquerel (Bq)**.

Quelques valeurs :

-Lait : 50 à 80 Bq/L

-Corps humain : 100 à 120 Bq/kg

-Terre : 1000 Bq/kg

L'**activité** s'exprime donc par :  $A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t) \text{ or } N(t) = N_0 \exp(-\lambda \times t) \text{ d'où } A(t) = \lambda N_0 \exp(-\lambda \times t)$$

Lorsque  $t=0$ s  $A(t=0s) = A_0 = \lambda N_0$ , l'activité suit la loi de décroissance radioactive :



Animation :  
Le Becquerel

$A(t) = A_0 e^{-\lambda \times t}$ $A(t) = A_0 \exp(-\lambda \times t)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>A_0</math> : Activité initiale (à <math>t=0</math>s) de l'échantillon</li> <li>- <math>\lambda</math> : Constante radioactive (en <math>s^{-1}</math> si <math>t</math> en s).</li> </ul>
---	--

## II-Applications

### 1-Datation :

On peut **déterminer l'âge** d'un échantillon contenant des noyaux radioactifs en mesurant son activité, ses proportions en différents noyaux, connaissant la période radioactive de l'élément.

Les techniques de datation se fondent sur l'existence d'isotopes de demi-vie différentes ou sur la comparaison avec des proportions connues entre des isotopes ou entre des noyaux pères et fils.

Exemple : Datation au carbone 14 (principe voir QR code ci-contre)

Elle est basée sur l'évolution du rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  après la mort d'un organisme vivant. Le carbone 14 est un isotope radioactif dont le temps de demi-vie est de 5 730 ans ; il permet de dater des objets jusqu'à 50 000 ans.



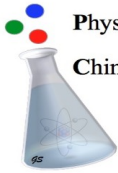
### 2-Médecine nucléaire :

Un **traceur radioactif** est un isotope radioactif dont la désintégration provoque l'émission de rayonnements qu'il suffit de détecter pour suivre sa trace. Le radio-traceur est choisi en fonction de son temps de demi-vie, qui doit être suffisamment court pour être rapidement éliminé par le corps et de sa masse qui doit être très faible tout en ayant une activité détectable.

Les radio-traceurs sont utilisés en imagerie médicale (scintigraphie, tomographie...) ou en traitement (radiothérapie).

Exemple : Tomographie par émission de positons (TEP) (principe voir QR code ci-contre)



 Physique Chimie	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A12 -</b> <b>Equilibre chimique</b>	<b>Exercices obligatoires : 8 p 145 – 20 p 147 – 4 p 164 – 10 p 165</b> <b>Exercices en plus : 6 p 145 – 10 p 145 – 21 p 147</b>

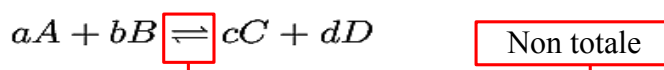
## I-Les transformations chimiques

Au cours d'une transformation chimique, des espèces chimiques disparaissent, les réactifs alors que d'autres se forment, les produits. A l'état final :

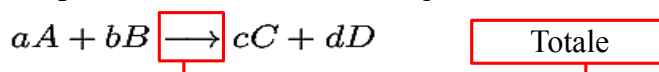
- Un des réactifs au moins a été totalement consommé dans le cas d'une transformation totale. Ce réactif est appelé réactif limitant.
- Tous les réactifs sont encore présents dans le cas d'une transformation non totale.

Lorsque tous les réactifs et produits sont présents à l'état final, le système chimique est à l'**état d'équilibre chimique**.

Une transformation non totale est modélisée par deux réactions qui s'opposent. L'équation de la réaction s'écrit :



Une transformation totale est modélisée par une seule réaction. L'équation de la réaction s'écrit :



## II-Evolution d'un système chimique

### 1-Notion d'activité :

L'activité d'une espèce chimique est une **grandeur sans unité** qui caractérise le comportement de l'espèce au sein d'un système chimique. **L'expression de l'activité d'une espèce chimique dépend de sa nature :**

-Si l'espèce est à l'état **solide** :  $a(X_{\text{solide}})=1$

-Si l'espèce est le **solvant** :  $a(X_{\text{solvant}})=1$

-Si l'espèce est **dissoute en solution** :  $a(X)=\frac{[X]}{C^\circ}$  avec  $C^\circ=1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$



Ne pas tenir compte des chiffres significatifs de  $C^\circ$  dans un calcul !

### 2-Quotient de réaction :

Le quotient de réaction  $Q_r$  est une **grandeur sans unité** qui caractérise le système chimique dans un état donné. Pour une transformation chimique modélisée par l'équation  $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$  l'expression du quotient de réaction est :

$Q_r = \frac{a(C)^c \times a(D)^d}{a(A)^a \times a(B)^b}$	$Q_r$ : Quotient de réaction aussi appelé quotient réactionnel (sans unité) $a(X)$ : activité des réactifs et des produits (sans unité) $a, b, c$ et $d$ : coefficients stoechiométriques associés au réactifs et produits
---	--

Exemple :  $\text{Zn}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{HO}^{-}_{(\text{aq})} \rightleftharpoons \text{Zn}(\text{OH})_{2(\text{s})}$   $Q_r = \frac{a(\text{Zn}(\text{OH})_2)}{a(\text{Zn}^{2+}) \times a(\text{HO}^-)^2} = \frac{1}{\frac{[\text{Zn}^{2+}]}{C^\circ} \times \left(\frac{[\text{HO}^-]}{C^\circ}\right)^2} = \frac{(C^\circ)^3}{[\text{Zn}^{2+}] \times [\text{HO}^-]^2}$

### 3-Constante d'équilibre :

Lorsqu'un système chimique, siège d'une transformation non totale, atteint l'**équilibre chimique (état final)**, le quotient de réaction atteint une valeur appelée **constante d'équilibre K**.

$Q_{r,f} = Q_{r,eq} = K$	$K$ : Constante d'équilibre. C'est une <b>grandeur sans unité</b> .
--------------------------	---

### Remarques :

-Si  $K > 10^4$  la transformation est considérée comme totale.

-La constante d'équilibre  $K$  dépend de la température  $T$  et ne dépend pas de la composition du système.

### 4-Taux d'avancement final :

Le taux d'avancement final d'une transformation chimique est une grandeur, sans unité, définie par :

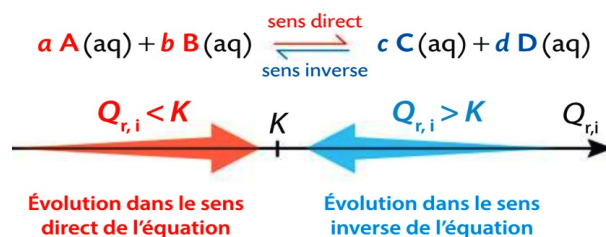
$\tau_f = \frac{x_f}{x_{\max}}$	$x_f$ : Avancement final (mol) $x_{\max}$ : Avancement maximal si la réaction est totale (mol) $\tau_f$ : Taux d'avancement final compris entre 0 et 1 et souvent exprimé en %
---------------------------------	--

**ATTENTION!** Si  $\tau_f < 1$  ( $x_f < x_{\max}$ ) la transformation n'est pas totale, elle atteint un état d'équilibre chimique.  
Si  $\tau_f = 1$  ( $x_f = x_{\max}$ ) la transformation est totale.

### 5-Evolution spontanée d'un système

Dans un système chimique hors équilibre, le système évolue dans le sens spontané tel que le quotient de réaction  $Q_r$  tend vers la constante d'équilibre  $K(T)$ .

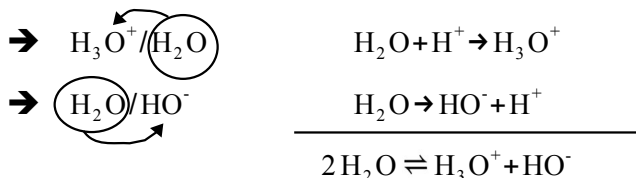
Tout système chimique évolue spontanément vers un état d'équilibre.



## III-Exemples de constantes d'équilibre

### 1-Produit ionique de l'eau $K_e$ :

L'autoprotolyse de l'eau est la transformation chimique modélisée par la réaction acido-basique entre deux molécules d'eau. Elle a lieu dans toutes les solutions aqueuses.



Quotient de réaction : 
$$Q_r = \frac{a(H_3O^+) \times a(HO^-)}{a(H_2O)^2} = \frac{\frac{[H_3O^+]}{C^\circ} \times \frac{[HO^-]}{C^\circ}}{(1)^2} = \frac{[H_3O^+] \times [HO^-]}{(C^\circ)^2}$$

On associe à cette transformation chimique une constante d'équilibre  $K_e$  appelée **produit ionique de l'eau** qui est égale au quotient de réaction à l'équilibre de cette transformation. Son expression est :

$K_e = \frac{[H_3O^+]_{eq} \times [HO^-]_{eq}}{(C^\circ)^2}$ <p>avec <math>K_e = 1,0 \times 10^{-14}</math> à <math>25^\circ C</math></p>	<ul style="list-style-type: none"><li>- <math>K_e</math> : produit ionique de l'eau (sans unité)</li><li>- <math>[H_3O^+]_{eq}</math> : concentration des ions oxonium à l'équilibre (<math>mol \cdot L^{-1}</math>)</li><li>- <math>[HO^-]_{eq}</math> : concentration des ions hydroxyde à l'équilibre (<math>mol \cdot L^{-1}</math>)</li><li>- <math>C^\circ</math> : Concentration standard <math>C^\circ = 1 mol \cdot L^{-1}</math></li></ul>
---	--

Comme toute constante d'équilibre, le produit ionique de l'eau  $K_e$  dépend de la température.

À une température donnée, lorsque l'une des concentrations en ions  $H_3O^+$  ou  $HO^-$  augmente, l'autre diminue puisque leur produit reste constant. **L'expression du produit ionique de l'eau permet de passer de la concentration en ions oxonium à celle des ions hydroxyde.**

**ATTENTION!** On utilise très souvent le  $pK_e$  :  $pK_e = -\log(K_e)$  avec  $pK_e = 14$  à  $25^\circ C$

## 2-Constante d'acidité $K_A$ :

La constante d'acidité  $K_A$  est égale au quotient de réaction à l'équilibre associée à la transformation chimique d'un acide (couple  $AH/A^-$ ) avec l'eau :  $AH(aq) + H_2O(l) \rightleftharpoons A^-(aq) + H_3O^+(aq)$  .

$$K_A = Q_{r,eq} = \frac{a(H_3O^+)_{eq} \times a(A^-)_{eq}}{a(H_2O)_{eq} \times a(AH)_{eq}} = \frac{\frac{[H_3O^+]_{eq}}{C^\circ} \times \frac{[A^-]_{eq}}{C^\circ}}{1 \times \frac{[AH]_{eq}}{C^\circ}} = \frac{[A^-]_{eq} \times [H_3O^+]_{eq}}{[AH]_{eq} \times C^\circ}$$

$K_A = \frac{[A^-]_{eq} \times [H_3O^+]_{eq}}{[AH]_{eq} \times C^\circ}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>K_A</math> : constante d'acidité associée au couple <math>AH/A^-</math> (sans unité)</li> <li>- <math>[H_3O^+]_{eq}</math>, <math>[A^-]_{eq}</math> et <math>[AH]_{eq}</math> : concentration à l'équilibre ( <math>mol \cdot L^{-1}</math> )</li> <li>- <math>C^\circ</math> : Concentration standard <math>C^\circ = 1 mol \cdot L^{-1}</math></li> </ul>
--	--

Comme toute constante d'équilibre, la constante d'acidité  $K_A$  dépend que de la température.



Il est commode de définir la constante  $pK_A$  par :  $pK_A = -\log(K_A)$  (et  $K_A = 10^{-pK_A}$  )

Exemple : Transformation acido-basique entre les ions ammonium  $NH_4^+$  et l'eau

Soit l'équation de la réaction :  $NH_4^+(aq) + H_2O(l) \rightleftharpoons H_3O^+(aq) + NH_3(aq)$

$$K_A = Q_{r,eq} = \frac{a(H_3O^+)_{eq} \times a(NH_3)_{eq}}{a(H_2O)_{eq} \times a(NH_4^+)_{eq}} = \frac{\frac{[H_3O^+]_{eq}}{C^\circ} \times \frac{[NH_3]_{eq}}{C^\circ}}{1 \times \frac{[NH_4^+]_{eq}}{C^\circ}} \Leftrightarrow K_A = \frac{[NH_3]_{eq} \times [H_3O^+]_{eq}}{[NH_4^+]_{eq} \times C^\circ}$$

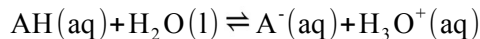


Il est possible d'aboutir, à partir de l'expression du  $K_A$ , à une équation du second degré en fonction de  $[H_3O^+]_{eq}$  ou  $x_f$ .



### Comment déterminer la valeur d'une constante d'acidité à partir d'une mesure de pH ?

On considère la transformation chimique modélisée par la réaction entre un acide faible  $AH$  et l'eau :



Constante d'acidité :  $K_A = \frac{[A^-]_{eq} \times [H_3O^+]_{eq}}{[HA]_{eq} \times C^\circ}$

Etat	Avancement (mol)	$AH(aq)$	+	$H_2O(l)$	$\rightleftharpoons$	$A^-(aq)$	+	$H_3O^+(aq)$
Etat initial	$x=0$	$n_i(AH)=CV$		Excès		0		0
Etat intermédiaire	$x$	$n_i(AH)-x$		Excès		$x$		$x$
Etat final (A l'équilibre)	$x=x_f$	$n_i(AH)-x_f$		Excès		$x_f$		$x_f$

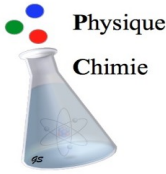
-La mesure du pH d'une solution aqueuse d'acide faible permet de calculer la concentration en quantité de matière des ions oxonium à l'équilibre  $[H_3O^+]_{eq}$  :  $[H_3O^+]_{eq} = C^\circ \times 10^{-pH}$  .

-A l'équilibre (c'est-à-dire à l'état final)  $n(A^-)_{eq} = n(H_3O^+)_{eq} = x_f$  donc  $[A^-]_{eq} = [H_3O^+]_{eq}$

-A l'équilibre  $n(AH)_{eq} = n_i(AH) - x_f = n_i(AH) - n(H_3O^+)_{eq} = CV - [H_3O^+]_{eq} V = (C - [H_3O^+]_{eq}) \times V$

donc  $[AH]_{eq} = \frac{n(AH)_{eq}}{V} = C - [H_3O^+]_{eq} \Leftrightarrow [AH]_{eq} = C - C^\circ \times 10^{-pH}$

-On peut donc déduire l'expression du  $K_A$  en fonction de  $C$  et du pH :  $K_A = \frac{(10^{-pH})^2 \times C^\circ}{(C - C^\circ \times 10^{-pH})}$

	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A13 - Pile électrochimique</b>	<b>Exercices obligatoires : 14 p 146 – 15 p 146 – 16 p 146 Exercice en plus : 19 p 147</b>

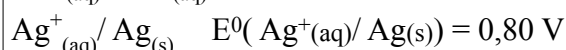
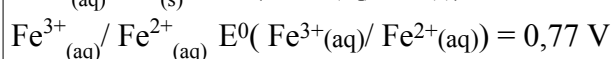
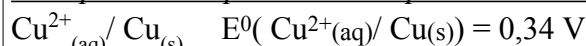
## I-Transformation d'oxydoréduction spontanée

### 1-Pouvoir oxydant et réducteur :

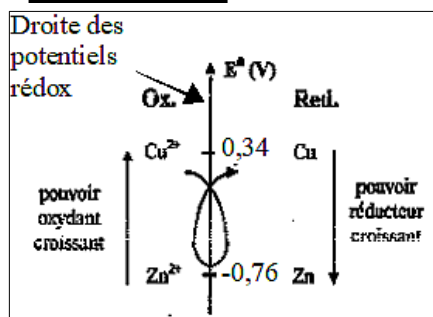
On peut parler de pouvoir oxydant et réducteur dans le cas de couple rédox. Dans un couple rédox constitué d'un oxydant et d'un réducteur, plus l'oxydant de ce couple est fort, plus son réducteur associé est faible.

A chaque couple oxydant-réducteur est associé un **potentiel d'oxydoréduction** noté  $E^0(\text{Ox}/\text{Red})$  (en Volt).

*Exemples de couple Ox/Red et potentiel associé :*



### 2-Loi du gamma :



Lorsque deux couples rédox sont mis en présence, une seule et unique transformation chimique **spontanée** entre ces deux couples peut se produire, celle déterminée par la **loi du « gamma »** :

**L'oxydant du couple de plus haut potentiel (l'oxydant le plus fort) réagit avec le réducteur du couple de plus bas potentiel (le réducteur le plus fort).**

### 3-Transfert spontané d'électrons :

Le transfert spontané d'électrons entre l'oxydant d'un couple et le réducteur d'un autre couple peut s'effectuer :

- par **contact direct entre les réactifs** ;
- par **transfert indirect entre les réactifs**. Il s'effectue par l'intermédiaire d'un **circuit extérieur**, ce qui permet le passage de courant électrique dans ce circuit.

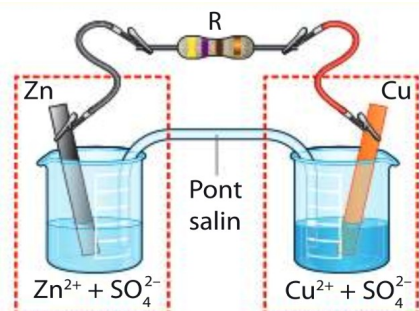
## II-Pile électrochimique

Une pile électrochimique est un générateur qui transforme de l'énergie chimique d'une transformation d'oxydoréduction spontanée en énergie électrique par **transfert indirect d'électrons**.



Vidéo CEA :  
Batterie  
lithium-ion

### 1-Constitution d'une pile :



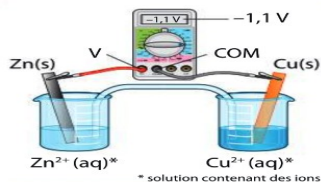
Une pile est constituée de :

- **Deux demi-piles** : une demi-pile est constituée d'une électrode trempant dans une solution ionique (électrolyte). A chaque demi-pile est associée un couple Ox/Red, en général de type  $M^{n+}/M$  avec M : métal constituant l'électrode.
- **Pont salin** ou membrane : solution ionique permettant de fermer le circuit et d'assurer l'électroneutralité des solutions.



Si, dans la constitution d'une demi-pile, le réducteur n'est pas métallique alors on utilise pour le contact et la circulation des électrons une électrode inerte comme du graphite ou du platine.

## 2-Fonctionnement d'une pile



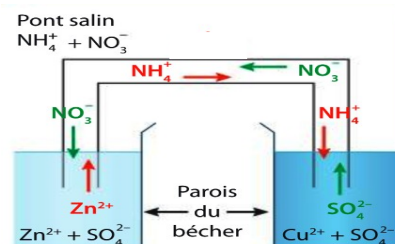
Tension affichée sur le voltmètre	Électrode reliée à la borne V du voltmètre
positive	positive
négative	négative

**Tension à vide** : Tension mesurée aux bornes de la pile, à l'aide d'un voltmètre branché en dérivation, lorsqu'elle ne débite pas de courant électrique dans un circuit extérieur. Elle permet de connaître, expérimentalement, la polarité de la pile. Si la tension affichée est positive, l'électrode liée à la borne V du voltmètre est positive.

**Déplacement des porteurs de charge** : Dans le circuit extérieur, le passage du courant électrique est assuré par le déplacement des électrons de la borne négative vers la borne positive. Dans les solutions ioniques, le passage du courant est assuré par le déplacement des ions.

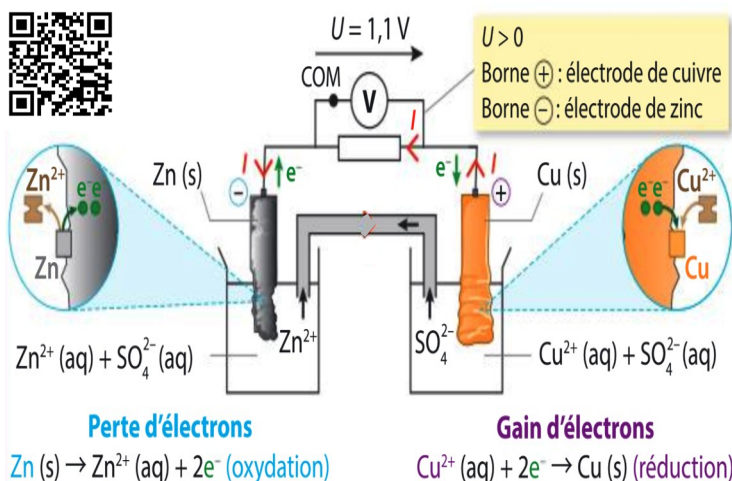
**Réactions aux électrodes** :

- A la **cathode** se produit une **réduction**, les électrons qui arrivent à la cathode sont captés par l'oxydant. La cathode correspond au pôle positif de la pile.
- A l'**anode** se produit une **oxydation**, les électrons qui partent à l'anode sont libérés par le réducteur. L'anode correspond au pôle négatif de la pile.

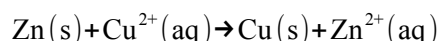


**La transformation chimique de fonctionnement d'une pile est une transformation d'oxydoréduction.**

Exemple : La pile Daniell



L'équation de réaction modélisant la transformation chimique de fonctionnement de la pile est :



Quotient réactionnel :

$$Q_r = \frac{a(\text{Cu}) \times a(\text{Zn}^{2+})}{a(\text{Zn}) \times a(\text{Cu}^{2+})} = \frac{[\text{Zn}^{2+}]}{[\text{Cu}^{2+}]}$$

La constante d'équilibre de cette transformation, à 25°C, est  $K = 10^{37}$  donc la transformation est totale.

Une pile qui **débite est un système hors état d'équilibre** :  $Q_r < K$  alors qu'une pile usée est considérée comme un système à l'équilibre :  $Q_r = K$ .

## 3-Capacité électrique d'une pile :

Si une pile débite, à intensité  $I$  constante, pendant une durée  $\Delta t$ , elle délivre une charge électrique qui vaut :

$Q = I \times \Delta t$	<p><math>Q</math> : Charge électrique qui circule (Coulomb C)</p> <p><math>I</math> : Intensité (Ampère A)</p> <p><math>\Delta t</math> : Durée de fonctionnement (s)</p>
-------------------------	---

La **capacité électrique d'une pile**  $Q_{\max}$  correspond à la **charge électrique maximale qui peut circuler durant la durée de vie de la pile**  $\Delta t_{\max}$ . On peut donc écrire :  $Q_{\max} = I \times \Delta t_{\max}$ .



Exemple : Pile Varta AAA (photo ci-contre)

Capacité électrique de la pile : 1000 mAh



Dans le commerce, l'unité de la capacité est le mAh ( $I$  en mA et  $\Delta t$  en h)

La capacité électrique d'une pile **dépend des quantités initiales des réactifs**. En effet, la charge électrique  $Q$  qui circule dans le circuit est égale à la valeur absolue de la charge des électrons échangés pendant la réaction d'oxydoréduction.

$Q = n(e^-) \times N_A \times e$ $Q = n(e^-) \times \mathcal{F}$	$n(e^-)$ : Quantité de matière d'électrons échangés pendant la durée $\Delta t$ $N_A$ : Constante d'Avogadro avec $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ $e$ : Charge élémentaire avec $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ $\mathcal{F}$ : Constante de Faraday avec $\mathcal{F} = N_A \times e = 96500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$
--	--

La capacité électrique d'une pile  $Q_{\max}$  est donc égale à :  $Q_{\max} = n(e^-)_{\max} \times \mathcal{F}$ .

### Comment déterminer la quantité de matière d'électrons échangés $n(e^-)$ ?



Il faut utiliser la **stoechiométrie des demi-équations** à la base de l'équation de la réaction de fonctionnement de la pile :

Pour un couple rédox Ox/Red on a la demi-équation  $a \text{Ox} + b e^- \rightarrow c \text{Red}$  (dans le sens de la réduction)

On peut donc écrire :

$$\frac{n(\text{Ox})_{\text{conso}}}{a} = \frac{n(e^-)_{\text{échangé}}}{b} = \frac{n(\text{Red})_{\text{formé}}}{c}$$

$\Rightarrow$  Pour déterminer  $n(e^-)_{\max}$  il faut **utiliser la demi-équation faisant intervenir le réactif limitant**. La quantité de matière maximale d'électrons échangés est **proportionnelle à la quantité de matière initiale du réactif limitant**.

#### Exemple : Capacité d'une pile cuivre-aluminium

Une pile est composée de deux demi-piles reliées par un pont salin (papier filtre imbibé d'une solution de chlorure de potassium). La première demi-pile est constituée d'une lame d'aluminium de masse  $m_1 = 1,0 \text{ g}$  qui plonge dans  $V = 50 \text{ mL}$  de solution de sulfate d'aluminium ( $2 \text{Al}^{3+}(\text{aq}) + 3 \text{SO}_4^{2-}(\text{aq})$ ) de concentration en ion aluminium  $[\text{Al}^{3+}] = 5,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ . La seconde est constituée d'une lame de cuivre de masse  $m_2 = 8,9 \text{ g}$  qui plonge dans  $V = 50 \text{ mL}$  de solution de sulfate de cuivre ( $\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + \text{SO}_4^{2-}(\text{aq})$ ) de concentration  $[\text{Cu}^{2+}] = 5,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ . L'équation de réaction modélisant la transformation chimique de fonctionnement de la pile est :  $3 \text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{Al}(\text{s}) \rightarrow 3 \text{Cu}(\text{s}) + 2 \text{Al}^{3+}(\text{aq})$ .

Déterminer la capacité électrique de cette pile.

#### -Détermination du réactif limitant :

$$\frac{n_i(\text{Cu}^{2+})}{3} = \frac{[\text{Cu}^{2+}] \times V}{3} \text{ AN} : \frac{n_i(\text{Cu}^{2+})}{3} = \frac{5,0 \times 10^{-1} \times 50,0 \times 10^{-3}}{3} = 8,3 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$\frac{n_i(\text{Al})}{2} = \frac{m_1}{2 \times M(\text{Al})} \text{ AN} : \frac{n_i(\text{Al})}{2} = \frac{1,0}{2 \times 27,0} = 1,9 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

On a donc  $\frac{n_i(\text{Al})}{2} > \frac{n_i(\text{Cu}^{2+})}{3} \Leftrightarrow \text{Cu}^{2+}$  est le réactif limitant

#### -Détermination de $n(e^-)_{\max}$ :

Demi-équation associée au réactif limitant :  $\text{Cu}^{2+} + 2 e^- \rightarrow \text{Cu}$

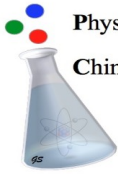
$$\text{Stoechiométrie} : \frac{n(\text{Cu}^{2+})_{\text{conso}}}{1} = \frac{n(e^-)_{\text{échangé}}}{2} \Leftrightarrow \frac{n(\text{Cu}^{2+})_i}{1} = \frac{n(e^-)_{\max}}{2} \Leftrightarrow n(e^-)_{\max} = 2 \times n(\text{Cu}^{2+})_i$$

#### -Détermination de la capacité $Q_{\max}$ :

$$Q_{\max} = n(e^-)_{\max} \times \mathcal{F} \Leftrightarrow Q_{\max} = 2 \times n_i(\text{Cu}^{2+}) \times \mathcal{F} \Leftrightarrow Q_{\max} = 2 \times [\text{Cu}^{2+}] \times V \times \mathcal{F}$$

$$\text{AN} : Q_{\max} = 2 \times 5,0 \times 10^{-1} \times 50,0 \times 10^{-3} \times 96500 = 4,8 \times 10^3 \text{ C (ou } Q_{\max} = 4,8 \times 10^3 \text{ A} \cdot \text{s)}$$

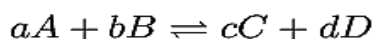
$$\text{Soit } Q_{\max} = \frac{4,8 \times 10^3}{3600} = 1,3 \text{ A} \cdot \text{h} = 1,3 \times 10^3 \text{ mA} \cdot \text{h}$$

 Physique Chimie	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A14 -</b> <b>Transformation chimique forcée et électrolyse</b>	<b>Exercices obligatoires : 8 p 183 – 14 p 185 – 15 p 185</b> <b>Exercices en plus : 10 p 183 – 11 p 184 – 18 p 187</b>

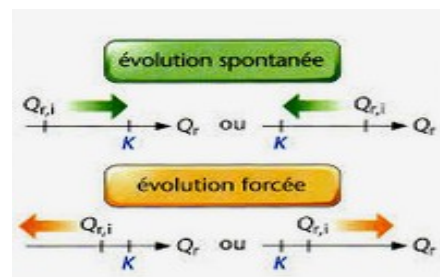
## I-Transformation chimique forcée

### 1-Evolution d'un système :

On considère la transformation chimique équilibrée modélisée par deux réactions opposées :



- Si  $Q_{r,i} < K$  ou  $Q_{r,i} > K$  la réaction s'effectue dans le sens spontané, la valeur de  $Q$  s'approche de celle de  $K$ .
- Lorsqu'un générateur fournit de l'énergie électrique à un système chimique, il peut le **forcer à évoluer** : la valeur de  $Q_r$  s'éloigne de celle de  $K$  : On réalise une électrolyse.



### 2-Electrolyse :

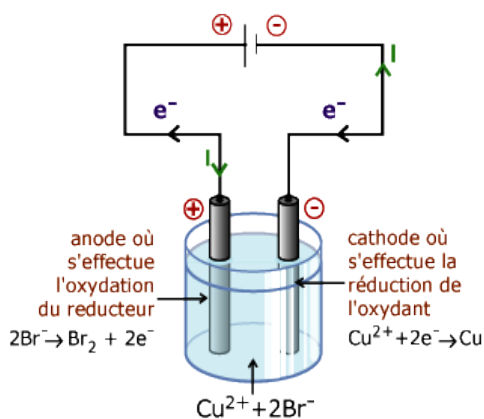


L'électrolyse est un **phénomène électrochimique** au cours duquel une **transformation d'oxydo-réduction est forcée par un générateur**.

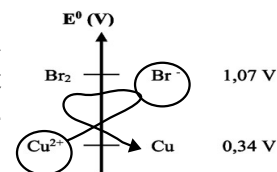
Elle s'effectue dans un **électrolyseur** (voir ci-contre), récepteur constitué d'une cuve remplie d'une solution ionique (électrolyte) dans laquelle trempent deux électrodes reliées aux bornes du générateur.

**Le sens de branchement du générateur impose le sens du courant I et donc le sens du transfert d'électrons.**

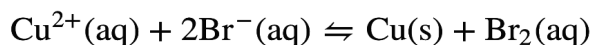
Exemple : Electrolyse d'une solution de bromure de cuivre (II) (  $\text{Cu}^{2+}(\text{aq}), 2\text{Br}^{-}(\text{aq})$  )



La réaction se fait dans le sens opposé de la réaction spontanée entre l'oxydant le plus fort  $\text{Br}_2$  et le réducteur le plus fort  $\text{Cu}$  (loi de l'anti-gamma).



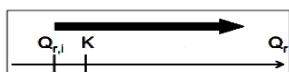
Donc l'équation chimique de l'électrolyse qui a lieu est :



Constante d'équilibre à  $25^\circ\text{C}$  :  $K = Q_{r,\text{eq}} = 8,3 \times 10^{-2}$  .

A l'état initial, il n'y a pas de produits donc  $Q_{r,i} = \frac{[\text{Br}_2]_i \times C_0^2}{[\text{Br}^{-}]_i^2 \times [\text{Cu}^{2+}]_i} = 0$  .

Dans le sens spontané (ici le sens direct), cette transformation chimique est très limitée, il se forme très peu de produits. En effet,  $K$  étant très faible, la transformation atteint rapidement son équilibre (  $Q_{r,i} \approx K$  ). Afin de former davantage de produits, il est nécessaire de forcer la transformation chimique et donc de réaliser une électrolyse.



Lorsque l'électrolyse commence, la valeur du quotient de réaction  $Q_r$  dépasse  $K$  et augmente en s'éloignant de la constante d'équilibre  $K$ , ce qui force la transformation chimique à se produire dans le sens direct.

**La transformation chimique d'électrolyse cesse lorsque l'apport d'énergie électrique cesse ou lorsque le réactif limitant a disparu.**

### 3-Charge électrique :

Lors d'une électrolyse, lorsque le générateur de tension continue débite un courant d'intensité constante  $I$  pendant une durée  $\Delta t$ , la charge électrique  $Q$  circulant est donnée par :

$Q = I \times \Delta t$ $Q = n(e^-) \times \mathcal{F}$	$Q$ : Charge électrique qui circule durant l'électrolyse (C) $I$ : Intensité du courant (A) $\Delta t$ : Durée de l'électrolyse (s) $n(e^-)$ : Quantité de matière d'électrons échangés pendant la durée $\Delta t$ (mol) $\mathcal{F}$ : Constante de Faraday $F = 96500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ et $\mathcal{F} = e \times N_A$
---	--

Il est alors possible de connaître l'évolution des quantités de matière des réactifs et produits au cours de l'électrolyse grâce à la **stoechiométrie des demi-équations d'oxydoréduction**.

Exemple : Calculons la masse de cuivre formé lors de l'électrolyse d'une solution de bromure de cuivre, sachant qu'un courant de  $I = 70 \text{ mA}$  traverse la cuve pendant 10 min.

D'après l'équation de réduction :  $\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2e^- \rightarrow \text{Cu}(\text{s})$

$$n(\text{Cu})_{\text{formé}} = \frac{n(e^-)_{\text{échangé}}}{2} \quad \text{or} \quad n(e^-)_{\text{échangé}} = \frac{Q}{\mathcal{F}} = \frac{I \times \Delta t}{\mathcal{F}} \quad \text{donc} \quad n(\text{Cu})_{\text{formé}} = \frac{I \times \Delta t}{2 \times \mathcal{F}}$$

$$m(\text{Cu}) = n(\text{Cu}) \times M(\text{Cu}) = \frac{I \times \Delta t}{2 \times \mathcal{F}} \times M(\text{Cu}) \quad \underline{\text{AN}} : m(\text{Cu}) = \frac{70 \times 10^{-3} \times 10 \times 60}{2 \times 96500} \times 63,5 = 1,4 \times 10^{-2} \text{ g}$$

## II-Stockage et conversion d'énergie

### 1-Convertisseur d'énergie :

Les activités biologiques d'un organisme vivant ou un processus industriel ne peuvent pas se faire sans énergie. La difficulté est d'avoir une « réserve » d'énergie à disposition au moment où l'on en a besoin, la notion de **stockage d'énergie** est donc très importante. L'**énergie chimique** constitue un stock d'énergie important, pouvant être conservé longtemps.

Un **convertisseur d'énergie** assure la transformation d'une forme d'énergie en une ou plusieurs autres.

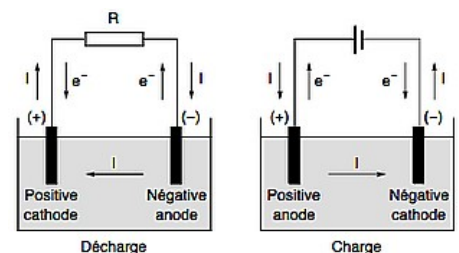
### 2-Exemples de convertisseurs

- **Accumulateurs**

Un accumulateur est un système électrochimique qui convertit l'énergie suivant deux modes :

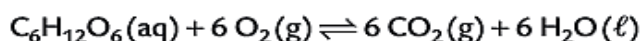
=> En mode générateur, il convertit l'énergie chimique en énergie électrique comme une pile : phénomène de décharge.

=> En mode récepteur, il convertit l'énergie électrique en énergie chimique comme un électrolyseur : phénomène de charge.

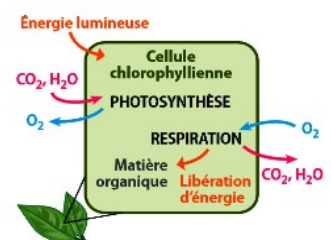


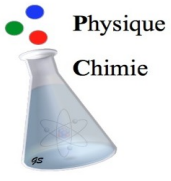
- **Processus biochimique**

Les **organismes chlorophylliens** sont capables de réaliser la photosynthèse en absorbant une partie du rayonnement solaire (sens indirect). Ils peuvent aussi réaliser la respiration, réaction inverse (sens direct).



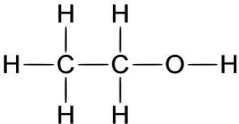
La **photosynthèse** permet la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique (stock de glucose  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ), présente dans les molécules organiques produites lors de la photosynthèse.



	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A15 -</b> <b>Structure des molécules organiques</b>	<b>Exercices obligatoires : 5 p 202 – 7 p 202 – 9 p 203 – 11 p 203 – 20 p 206</b> <b>Exercice en plus : 26 p 206</b>

## I-Représentations des molécules

### 1-Formule brute, développée et semi-développée :

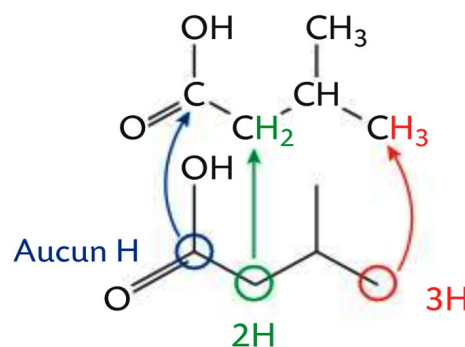
	Formule brute	Formule développée	Formule semi-développée
	Elle représente la nature et le nombre d'atomes de chaque élément. Les atomes sont rangés par ordre alphabétique en commençant par les atomes dont les symboles ne comportent qu'une seule lettre.	Elle correspond au schéma de Lewis d'une entité chimique sans faire figurer les doublets non liants.	C'est une représentation simplifiée de la formule développée. Les liaisons atome X-hydrogène ne sont pas représentées, mais condensées sous la forme $XH_n$ , où n représente le nombre d'atomes d'hydrogène liés à l'atome X.
Éthanol	$C_2H_6O$		$CH_3-CH_2-OH$

### 2-Formule topologique :

La formule topologique est une manière simplifiée de représenter dans un plan la structure d'une molécule organique : **on ne représente plus les atomes de carbone ni les atomes d'hydrogène portés par ces derniers**. Les liaisons carbone-carbone sont représentées par un **trait oblique**.

Dans une formule topologique, les **atomes de carbone sont situés à l'intersection de deux segments**. On opère la distinction entre liaisons multiples et liaisons simples : une liaison simple sera représentée par un trait, une liaison double par deux segments parallèles etc.

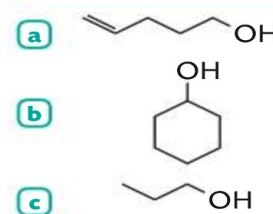
Les **atomes d'hydrogène reliés aux atomes autre que le carbone sont représentés**.



### 3-Squelette carboné :









Le squelette carboné représente l'enchaînement des atomes de carbone constituant une molécule organique.

Si une liaison multiple (double ou triple) est présente, le squelette est dit **insaturé** (a). Si un cycle est présent, le squelette est dit **cyclique** et **insaturé** (b). Dans les autres cas, il est dit **saturé** (c).



## II-Familles fonctionnelles et nomenclature

### 1-Groupes caractéristiques et familles fonctionnelles :

Famille fonctionnelle	Alcool	Aldéhyde	Cétone	Acide carboxylique	Halogéno-alcane	Ester	Amine	Amide
Groupe caractéristique								
	Hydroxyle	Carbonyle	Carbonyle	Carboxyle	Halogène	Ester	Amine	Amide

## 2-Nomenclature des molécules monofonctionnelles :



Tout les noms des molécules organiques monofonctionnelles sont basés sur :

### Ramification(s) - Chaîne principale - Terminaison

- La **chaîne principale** est la **chaîne carbonée la plus longue contenant le carbone fonctionnel** c'est-à-dire le carbone porteur du groupe caractéristique. Le nom de cette chaîne carbonée dépend du nombre d'atome de carbone qui la compose : **nom du radical** et se termine par « **an** ». (Ex : propan => 3C).

Nombre de carbones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nom du radical	méth	éth	prop	but	pent	hex	hept	oct	non	dec

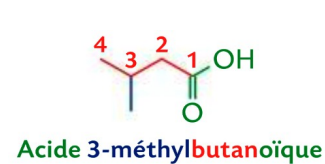
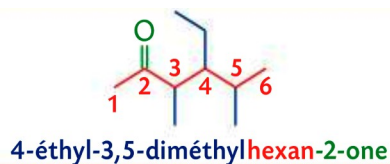
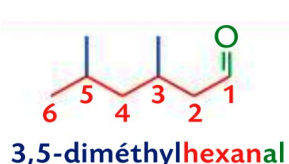
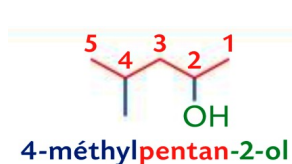
- Pour les ramifications, si il y en a, leur nom dépend du nombre d'atome de carbone qui les constitue : **nom du radical** et se termine par « **yl** » (Ex : méthyl => ramification à 1C).  
La chaîne principale est numérotée afin que les carbones porteurs d'une ramification aient les **numéros de position les plus petits possibles**. Les ramifications sont rangées par **ordre alphabétique**, précédées par leur numéro de position et séparées par un **tiret**.
- La **terminaison** dépend de la famille fonctionnelle de la molécule. La terminaison peut faire intervenir le **numéro de position du carbone fonctionnel**, il faut que ce numéro soit le **plus petit possible**. La numérotation des familles est prioritaire devant celle des ramifications.



### 2-a) Alcanes, alcools, aldéhydes, cétones et acide carboxylique :

Famille	Alcane $C_n H_{2n+2}$	Alcool $C_n H_{2n+2} O$	Aldéhyde $C_n H_{2n} O$	Cétone $C_n H_{2n} O$	Acide carboxylique $C_n H_{2n} O_2$
Terminaison	<b>e</b>	n°position- <b>ol</b>	<b>al</b>	n°position- <b>one</b>	<b>Acide ... oïque</b>

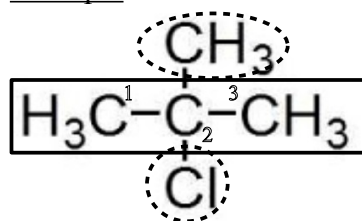
Exemples :



### 2-b) Halogénoalcanes :

Les **halogénoalcanes** sont des molécules organiques de formule brute  $C_n H_{2n+1} X$  (avec  $X=F, Cl, Br, I$ ) et qui possèdent un **groupe caractéristique halogène**. La terminaison pour la nomenclature des halogénoalcanes est identique à celle des alcanes. Le groupe halogène est **nommé comme une ramification** et se **termine par « o »** (**fluoro, chloro, bromo, iodo**). Le carbone fonctionnel doit **appartenir à la chaîne principale** et avoir le **numéro de position le plus petit possible**.

Exemple :



Chaîne principale : 3 atomes carbone => propane

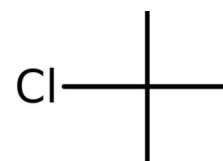
Ramification(s) :

-1 groupe méthyl en position 2 => 2-méthyl

Groupe caractéristique :

-groupe halogène (chlore) en position 2 => 2-chloro

Nom de la molécule : **2-chloro-2-méthylpropane**



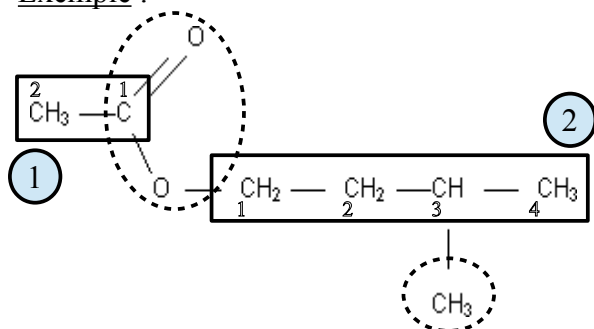
## 2-c) Esters :

Les esters sont des molécules organiques de formule brute  $C_nH_{2n}O_2$  et qui possèdent un **groupe caractéristique ester**. Le nom d'un ester est constitué de **deux termes séparé par de ou d'** :

-le premier terme correspond au **nom de la chaîne carbonée lié au carbone fonctionnel du groupe caractéristique ester** (carbone porteur de deux atomes d'oxygène) en utilisant la terminaison « oate ». On attribue toujours le **numéro 1 au carbone fonctionnel du groupe ester**.

-le deuxième terme correspond au **nom du radical de la chaîne carbonée la plus longue liée à l'atome d'oxygène** du groupe caractéristique ester suivi de la terminaison « yle ». On attribue le **numéro 1 à l'atome de carbone lié à l'atome d'oxygène du groupement ester** car cette chaîne peut être elle aussi ramifiée.

Exemple :



**Terme 1 :**

2 atomes de carbone => éthan-

Aucune ramification

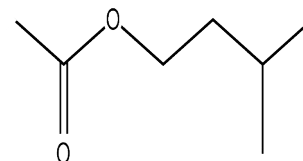
Nom du terme 1 : **éthanoate**

**Terme 2 :**

4 atomes de carbone => but-

1 groupe méthyl en position 3 => 3-méthyl

Nom du terme 2 : **3-méthylbutyle**



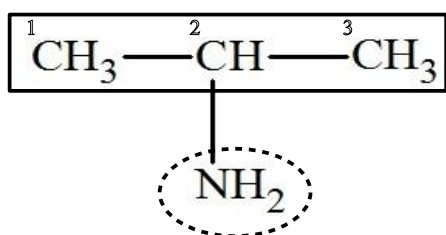
Nom de la molécule : **éthanoate de 3-méthylbutyle**

## 2-d) Amines :

Les **amines** sont des molécules organiques de formule brute  $C_nH_{2n+3}N$  et qui possèdent un **groupe caractéristique amine**. La terminaison pour la nomenclature des amines est « amine » **précédé du numéro** (le plus petit possible) **de l'atome de carbone fonctionnel appartenant à la chaîne principale**.

L'atome d'azote du groupe amine **peut être lié à plusieurs chaînes carbonées**, il faut alors **identifier et nommer la chaîne principale** (la plus longue) et **nommer les chaînes secondaires** (les moins longues), si il y en a, **comme des ramifications précédées de la lettre N** car ce sont des ramifications de l'atome d'azote.

Exemples :



Chaîne principale : 3 atomes de carbone => propan-

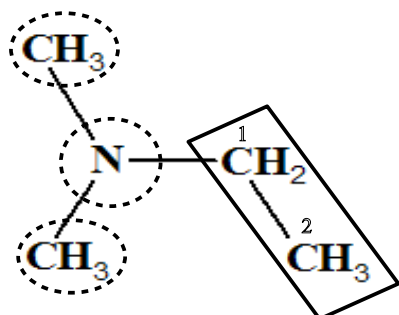
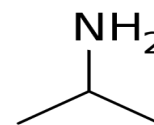
Ramification(s) :

-Aucune

Groupe caractéristique :

-groupe amine en position 2 => -2-amine

Nom de la molécule : **propan-2-amine**



Chaîne principale :

2 atomes de carbone => éthan-

Aucune ramification

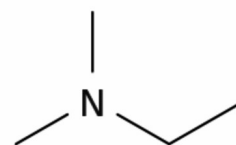
Groupe caractéristique :

-groupe amine en position 1 => -1-amine

=> éthan-1-amine

Chaîne(s) secondaire(s) :

-2 groupes méthyl en position N,N => N,N-diméthyl

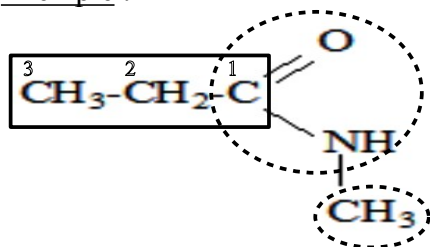


Nom de la molécule : **N,N-diméthyléthan-1-amine**

## 2-e) Amides :

Les **amides** sont des molécules organiques de formule brute  $C_nH_{2n+1}NO$  et qui possèdent un **groupe caractéristique amide**. La terminaison pour la nomenclature des amides est « **amide** ». On attribue toujours le **numéro 1 au carbone fonctionnel du groupe amide**. L'atome d'azote du groupe amide **peut être lié à plusieurs chaînes carbonées**, il faut, si il y en a, les **nommer comme des ramifications précédées de la lettre N** car ce sont des ramifications de l'atome d'azote.

Exemple :



Chaîne principale : 3 atomes de carbone => propan-

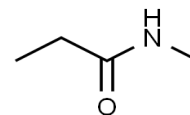
Ramification(s) :

-1 groupe méthyl en position N => N-méthyl

Groupe caractéristique :

groupe amide => amide

Nom de la molécule : **N-méthylpropanamide**



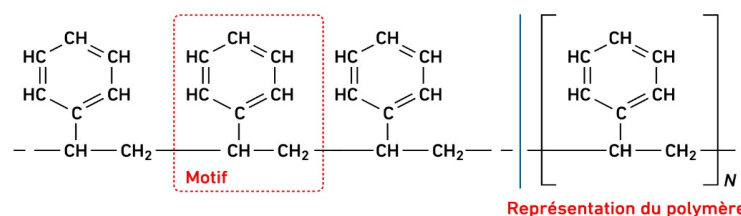
## III-Isomérisation de constitution

On appelle **isomères de constitution** des molécules qui partagent la **même formule brute**, mais dont la **formule développée (ou semi-développée) est différente**. Les isomères de constitution peuvent être subdivisés en trois catégories :

- Les **isomères de chaîne ou de squelette** : la chaîne carbonée est modifiée pour un même nombre de carbone.
- Les **isomères de position** : même groupe caractéristique mais pas placé au même endroit.
- Les **isomères de fonction** : groupes caractéristique différents.

Isomères de chaîne		Isomères de position		Isomères de fonction	
$CH_3-CH_2-CH_2-CH_3$	$CH_3-\underset{\substack{  \\ CH_3}}{CH}-CH_3$	$CH_3-\underset{\substack{  \\ OH}}{CH}-CH_3$	$CH_3-CH_2-\underset{\substack{  \\ OH}}{CH_2}$	$CH_3-CH_2-\underset{\substack{   \\ O}}{CH}$	$CH_3-\underset{\substack{   \\ O}}{C}-CH_3$
butane	2-méthylpropane	propan-2-ol	propan-1-ol	propanal	propan-2-one

## IV-Des macromolécules : les polymères

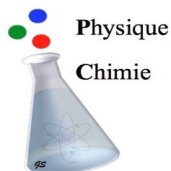


Un polymère est un **ensemble de macromolécules** formées de l'**assemblage d'un grand nombre de motifs chimiques identiques liés en chaîne**.

On représente un polymère en écrivant le motif entre deux crochets et en notant en indice le nombre N de répétitions du motif.

Exemples :

- PVC (polychlorure de vinyle) => polymère synthétique => sol et canalisation
- Cellulose => polymère naturel (paroi des cellules végétales) => mouchoir en papier
- Polystyrène => polymère synthétique => protection et emballage



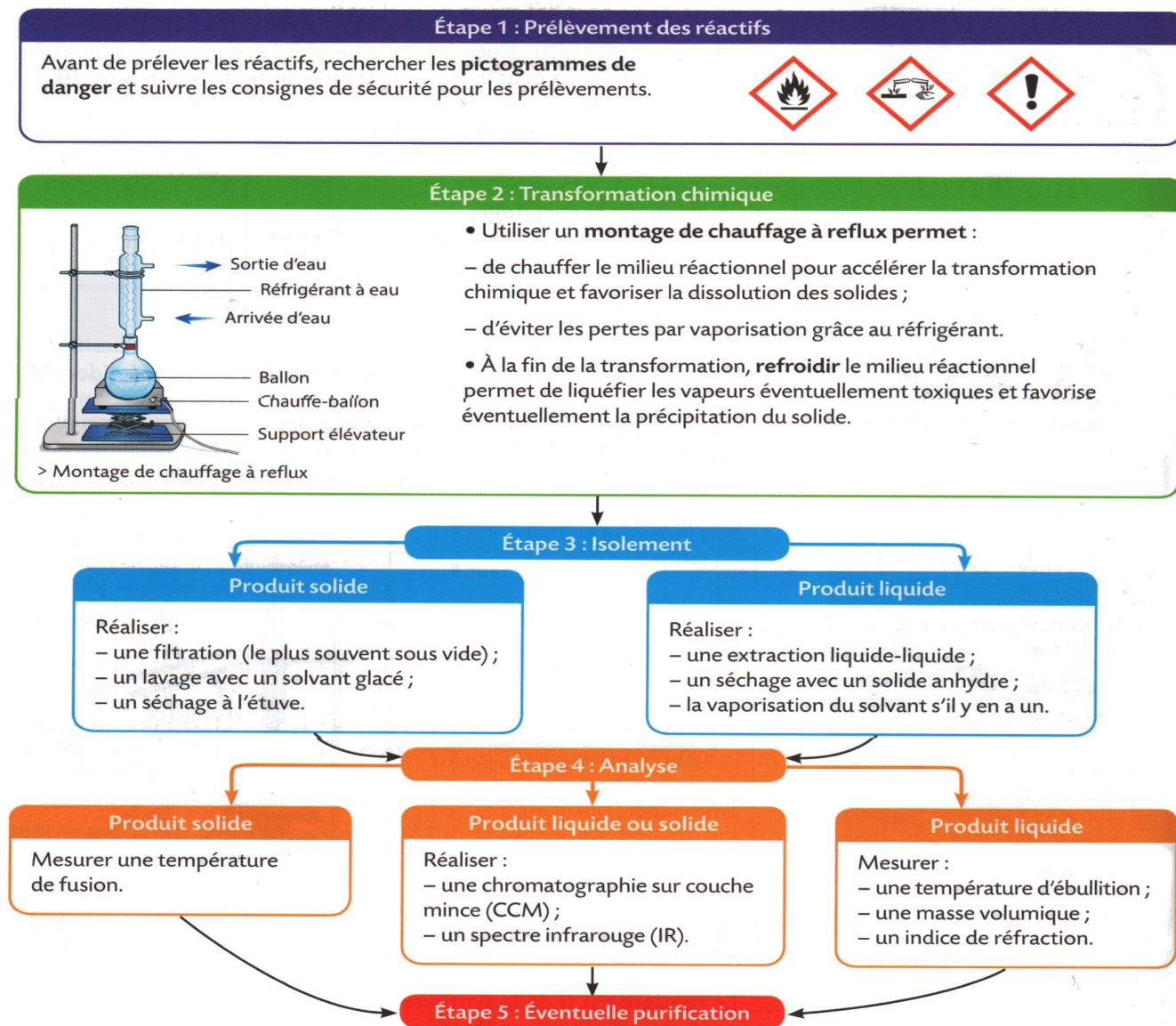
# Constitution et transformation de la matière

## - Fiche A16 - Synthèses chimiques

Exercices obligatoires : 23 p 205 –  
27 p 207

### I-Généralités

#### 1-Étapes d'une synthèse chimique :



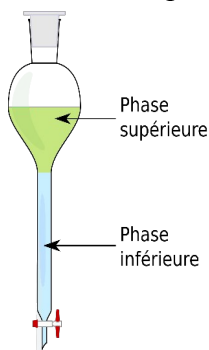
- **Extraction liquide-liquide** : L'extraction liquide-liquide permet de faire passer, par solubilisation, une espèce chimique du solvant initial vers le solvant choisi pour l'extraction : le solvant extracteur.

Il faut que :

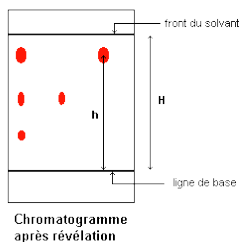
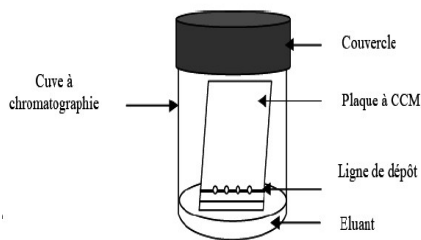
- Les solvants initial et d'extraction soient non miscibles ;
- L'espèce à extraire soit plus soluble dans le solvant extracteur que le solvant initial ;
- Le solvant extracteur soit le moins dangereux (santé et environnement) possible.

#### Position relative des phases et composition :

- Position relative des phases (organique et aqueuse)  $\Leftrightarrow$  comparer la densité des solvants de ces deux phases.
- Composition chimique des phases  $\Leftrightarrow$  solubilité des espèces chimiques présentes dans les solvants initial et d'extraction.



• Chromatographie sur couche mince (CCM) :



Rapport frontal :

$$R_f = \frac{h}{H} \text{ avec } 0 \leq R_f \leq 1$$

Deux espèces qui ont le même rapport frontal sont les mêmes.

**2-Rendement d'une synthèse :**

Le **rendement r** ( $0 \leq r \leq 1$ ) traduit l'efficacité d'une synthèse chimique. Le chimiste peut optimiser le rendement en jouant sur les conditions opératoires.

$r = \frac{n(X)_{\text{obtenue}}}{n(X)_{\text{max}}}$	$n(X)_{\text{obtenue}}$ : quantité de matière du produit X réellement obtenue (mol) $n(X)_{\text{max}}$ : quantité de matière du produit X obtenue si la transformation est totale (mol) r : rendement (sans unité), très souvent exprimé en %
---	--



Le rendement peut aussi se calculer à partir du **rapport des masses** au lieu du rapport des quantités de matière.

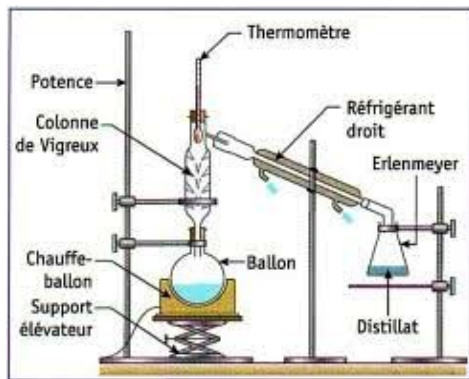
**II-Optimisation d'une synthèse**

**1-Optimisation de la vitesse de formation du produit d'intérêt :**

Lors d'une synthèse, on peut augmenter la vitesse de formation du produit d'intérêt **en agissant sur les facteurs cinétiques** :

- augmenter la température en chauffant le milieu réactionnel avec un montage de chauffage à reflux ;
- augmenter la concentration des réactifs en solution ;
- utiliser un catalyseur adapté.

**2-Optimisation du rendement :**



Dans le cas d'une transformation chimique de synthèse modélisée par deux réactions opposées, le rendement de la synthèse peut être limité. On peut améliorer le rendement de la synthèse :

- en **introduisant l'un des réactifs en excès** (de préférence le moins coûteux) : le taux d'avancement final de la transformation augmente et donc le rendement également.
- en **éliminant du milieu réactionnel un des produits de la réaction** (montage de distillation fractionnée ou Dean Stark) : on atteint ainsi un rendement proche de 100%.

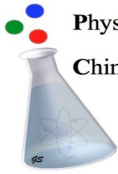
**Justifications :**

Transformation chimique de synthèse modélisée par deux réactions opposées :

Quotient de réaction : 
$$Q_r = \frac{a(C)^c \times a(D)^d}{a(A)^a \times a(B)^b}$$

- si excès du réactif A,  $a(A)$  augmente et  $Q_r$  diminue
- si élimination du produit C au cours de la réaction,  $a(C)$  redevient nul à chaque fois et donc  $Q_r$  également.

Dans les deux cas,  $Q_r < K$  le système évolue dans le sens direct de l'équation de la réaction ce qui permet une augmentation du rendement de la synthèse.

 Physique Chimie	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A17 -</b> <b>Stratégie de synthèse</b>	<b>Exercices obligatoires : 15 p 203 – 17 p 204 – 28 p 207</b> <b>Exercice en plus : 22 p 205</b>

## I-Séquence réactionnelle

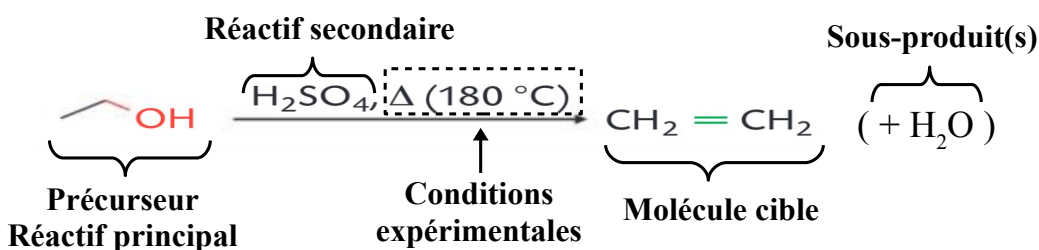
Une séquence réactionnelle est une **suite de réactions chimiques** permettant la **synthèse d'une molécule cible** à partir de réactifs appelés **précurseurs** de la molécule cible : on parle de **synthèse multi-étapes**.

La comparaison de la structure des réactifs et de la molécule cible permet d'élaborer une séquence réactionnelle à partir d'une **banque de réactions** (voir fiche 9 p 460 du livre).

La banque de réactions regroupe des **informations sur la réactivité des espèces organiques** de différentes familles fonctionnelles en spécifiant les **conditions expérimentales (température, solvant, catalyseur, durée de la réaction ...)** pour que la réactions puisse se faire.

Les équations des réactions en chimie organique sont souvent écrites de manière simplifiées (les sous produits ne sont pas toujours indiqués) mais toujours ajustées.

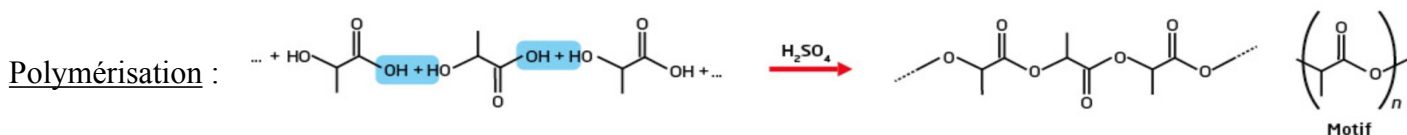
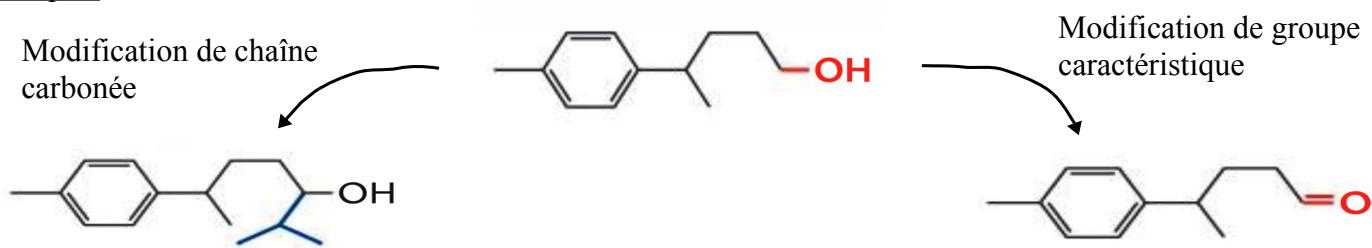
Exemple :



On distingue trois types de réactions chimiques :

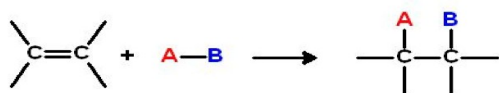
- Les réactions de modification de la chaîne carbonée : il y a création ou rupture de liaison carbone-carbone.
- Les réactions de modification des groupes caractéristiques.
- Les réactions de polymérisation : obtention de macromolécules à partir d'un grand nombre de monomères.

Exemples :



## II-Catégories de réactions

### 1-Réaction d'addition :

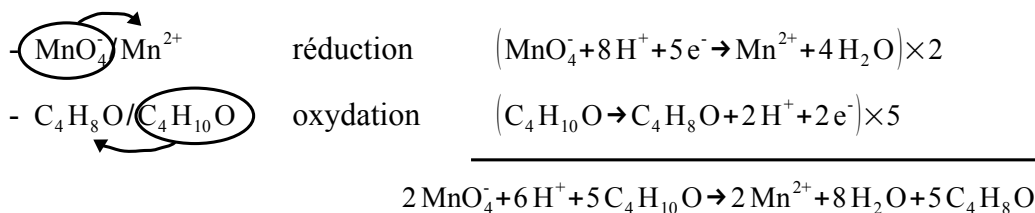


Une réaction d'addition est une réaction qui consiste à **lier des atomes ou groupes d'atomes à une liaison multiple (double ou triple)**.

Une réaction d'addition met en jeu « n » réactifs pour former « n-1 » produit.



Exemple : oxydation d'un alcool secondaire (précurseur) => formation d'une cétone (cible)

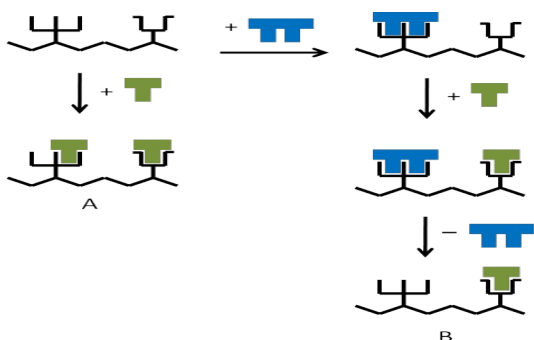


### III-Protection/déprotection

Au cours d'une synthèse organique, la séquence réactionnelle peut faire intervenir des **composés polyfonctionnels**. Un composé polyfonctionnel est un composé organique possédant **plusieurs groupes caractéristiques identiques ou non**.

Pour contrôler la façon dont ces composés vont réagir, on réalise une **protection de fonctions**.

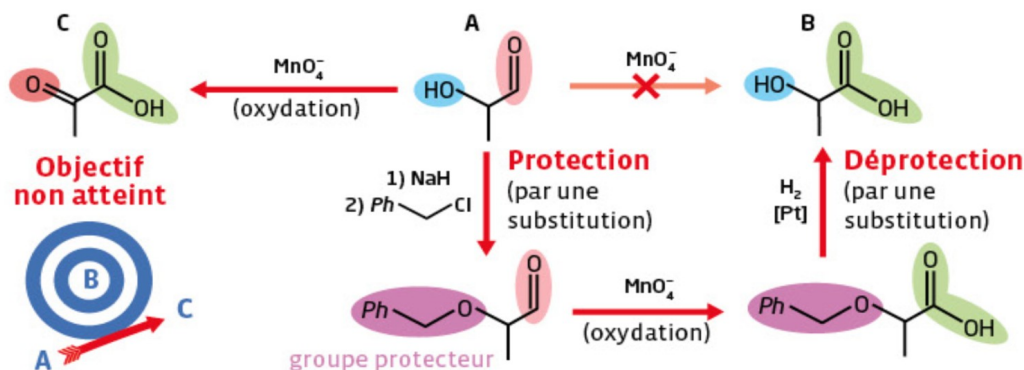
La protection de fonctions consiste à **protéger les groupes caractéristiques qui ne doivent pas réagir au cours de la réaction envisagée**. Elle se déroule en trois étapes :



- **Protection des fonctions** : on fait réagir le composé polyfonctionnel de façon à ce que les groupes caractéristiques à protéger soient rendus inactifs chimiquement.
- **Réalisation de la réaction** : seuls les groupes caractéristiques non protégés réagissent.
- **Déprotection des fonctions** : on réalise une dernière réaction pour rendre les groupes protégés de nouveau actifs.

Un **groupe protecteur** est un groupe caractéristique, volontairement créé dans la molécule d'un composé polyfonctionnel, afin de bloquer temporairement la réactivité de l'une de ses groupes caractéristiques. Ce groupe caractéristique est temporairement transformé en une autre groupe caractéristique qui ne va pas réagir au cours de la transformation.

Exemple :

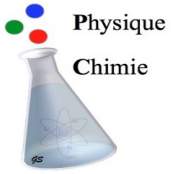


### IV-Synthèses écoresponsables :



Une synthèse écoresponsable d'un produit permet de réduire au maximum l'empreinte environnementale en se proposant d'agir sur trois domaines :

- les matières premières : en limitant les quantités, en préférant des espèces peu dangereuses, renouvelables ... ;
- les solvants : non toxiques, non polluants, en faible quantité voire sans solvant ;
- l'énergie : en limitant les dépenses, en utilisant des conditions douces (catalyseur, faibles températures ...).

	<b>Constitution et transformation de la matière</b>	
	<b>- Fiche A18 -</b> <b>Modélisation microscopique d'une transformation chimique</b>	<b>Exercices obligatoires : 6 p 104 – 10 p 105 – 12 p 105 – 15 p 106 – 21 p 108</b> <b>Exercice en plus : 8 p 105</b>

## I-De l'aspect macroscopique à l'aspect microscopique d'une transformation

### 1-Equation de la réaction :

L'**équation de la réaction** modélisant la transformation chimique donne une **description macroscopique** : elle indique les produits obtenus à partir des réactifs, dans des conditions expérimentales données. En outre, elle traduit le principe de la conservation des éléments chimiques. Mais l'équation de la réaction modélisant une transformation chimique ne représente pas son déroulement à l'échelle moléculaire.

### 2-Acte élémentaire et mécanisme réactionnel :

A l'échelle moléculaire, les transformations chimiques résultent souvent de plusieurs processus. On appelle **acte élémentaire**, une réaction se déroulant au niveau moléculaire en **une seule étape**.

Établir le **mécanisme réactionnel** d'une transformation chimique consiste à déterminer les principaux processus élémentaires responsables de la transformation macroscopique.

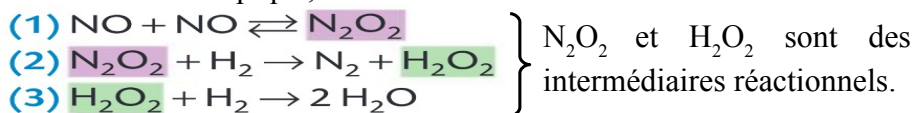
L'établissement d'un mécanisme réactionnel repose sur une démarche expérimentale (analyse du mélange réactionnel en cours de réaction) suivie par une phase théorique de modélisation.

Les **intermédiaires réactionnels** sont des espèces qui ne figurent pas parmi les réactifs et les produits d'une réaction, mais **sont présents dans le milieu réactionnel pendant le déroulement de la réaction**. Ils sont formés au cours d'un acte élémentaire et disparaissent au cours d'un autre.

Exemple : Le monoxyde d'azote et le dihydrogène réagissent suivant l'équation-bilan :

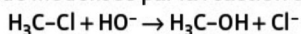


A l'échelle microscopique, cette réaction s'effectue en trois actes élémentaires :



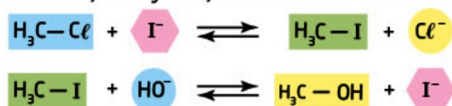
### 3-Effet d'un catalyseur :

La transformation chimique modélisée par la réaction d'équation :



se déroule en un seul acte élémentaire.

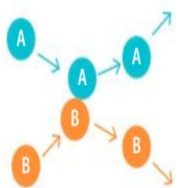
En présence d'ion iodure  $\text{I}^-$ , catalyseur, le mécanisme est modifié :



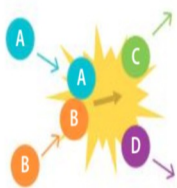
Un catalyseur accélère une transformation chimique en **modifiant son mécanisme réactionnel**, sans être consommé.

Il est consommé au cours du mécanisme réactionnel puis régénéré. Il n'apparaît donc pas dans l'équation-bilan de la transformation chimique.

### 4-Facteurs cinétiques :



> Choc élastique entre les entités A et B.



> Choc efficace et obtention des entités C et D.

Pour qu'une réaction chimique ait lieu, les entités constituant les réactifs doivent entrer en collision et les chocs doivent être efficaces pour créer des produits.

**La température et la concentration des réactifs** sont des facteurs cinétiques car, à l'échelle microscopique :

- Plus la température d'un système chimique est élevée, plus l'**agitation thermique** des entités est grande. La fréquences des chocs efficaces est donc plus grande.

- Plus la concentration des réactifs est élevée, plus la fréquences des chocs efficaces est grande.

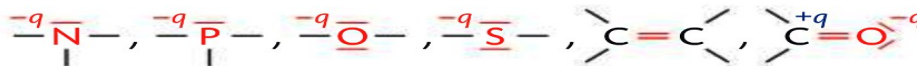
## II-Etude d'un mécanisme réactionnel

Au cours d'une transformation chimique, les atomes des entités chimiques se réorganisent. Cette modification résulte d'une redistribution de certains doublet d'électrons de valence.

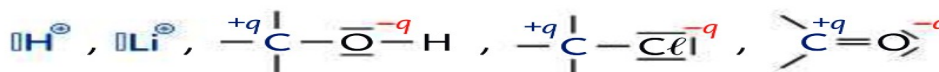
### 1-Sites donneurs et accepteurs de doublet d'électrons :

Les entités chimiques interagissent par des forces électrostatiques car elles possèdent des sites donneurs et accepteurs de doublet d'électrons.

Un **site donneur de doublet d'électrons** est un **site riche en électrons** : un doublet non liant porté par un atome, une liaison multiple, un atome portant une charge négative partielle ou entière.



Un **site accepteur de doublet d'électrons** est un **site pauvre en électrons** : un atome portant une charge positive partielle ou entière.



### 2-Modélisation des interactions entre entités chimiques :

Lors d'un acte élémentaire, la formation ou rupture des liaisons s'expliquent par des interactions électrostatiques **entre site donneurs et accepteurs de doublets d'électrons**. Pour représenter ces interactions, on utilise le **modèle de la flèche courbe**.

La modélisation, par la flèche courbe, des déplacements de doublet d'électrons lors d'un acte élémentaire d'un mécanisme réactionnel doit respecter les règles suivantes :

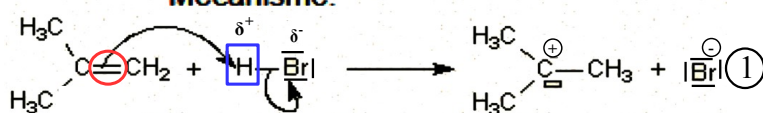
-La flèche courbe représente toujours le **déplacement orienté du doublet d'électron d'un site donneur vers un site accepteurs de doublets d'électrons**.

-Chaque flèche représente le mouvement d'un seul doublet d'électrons.


-Au cours d'un même acte élémentaire, il est possible que **plusieurs doublets d'électrons se déplacent afin de respecter la règle de stabilité**. Il faut alors représenter le mouvement de tous les doublets d'électrons.

Exemple : Soit la transformation modélisée par l'équation-bilan :  $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2 + \text{HBr} \rightarrow \text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2\text{Br}$

**Mécanisme:**

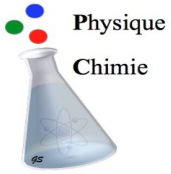


 Site donneur de doublets d'électrons

 Site accepteur de doublets d'électrons



Animation : Ostralo – Mécanismes réactionnels (exemples)

	<b>Mouvements et interactions</b>	
	<b>- Fiche B1 -</b> <b>Cinématique dans le repère cartésien</b>	<b>Exercices obligatoires : 3 p 228 – 5 p 228 – 18 p 231 + fiche exercices</b>

## I-Repérage d'un point matériel M dans l'espace et dans le temps

Pour décrire plus simplement les mouvements d'un corps, on assimile souvent ce dernier à un point qu'on nomme **point matériel** : point unique qui contiendrait toute la masse du corps.

Pour connaître la position d'un point dans l'espace, il est nécessaire de disposer d'une référence : c'est le choix du **référentiel d'étude**, auquel on va associer une **horloge** et un **repère d'espace**.

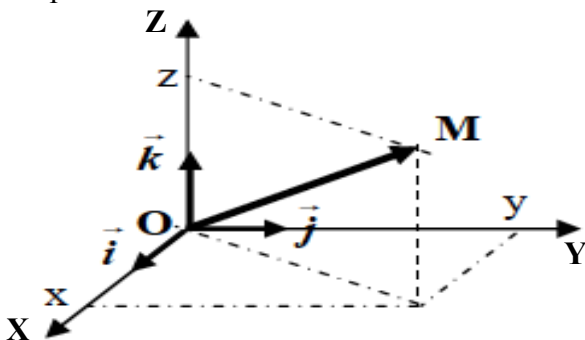
Notons qu'un point matériel est un point géométrique dont la position peut être parfaitement définie par trois coordonnées d'espace seulement et une coordonnée temporelle.

### 1-Repérage d'un point dans le temps :

La coordonnée temporelle d'un événement est appelée **date**, obtenue grâce à l'horloge associée au référentiel d'étude. L'origine des dates peut être choisie arbitrairement. La **durée** est l'intervalle de temps séparant deux dates.

### 2-Repérage d'un point dans l'espace :

On repère, ensuite, la **position des points** dans ce référentiel à l'aide d'un **repère d'espace**. On étudiera par la suite le repère cartésien.



On considère un repère constitué de trois axes X, Y, Z rattachés à un point origine O appartenant au référentiel d'étude. On associe à chaque axe un vecteur unitaire. Les vecteurs  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  sont alors les vecteurs unitaires des axes OX, OY et OZ. On le note  $R(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ .

A une date  $t$  donnée, on note la position du point M par le vecteur  $\vec{OM}(t)$  appelé **vecteur position**.

Ce vecteur  $\vec{OM}(t)$  a pour expression :  $\vec{OM}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k}$

$x(t)$ ,  $y(t)$  et  $z(t)$  sont les **coordonnée fonctions du temps** et sont appelées **équations horaires** du mouvement.

### Equation de la trajectoire :

L'équation de la trajectoire est une **relation indépendante de la variable temps** liant les coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$ .

Exemples :  $x=f(y)$ ,  $y=f(z)$  ...



**Ne pas confondre équations horaires (fonctions du temps) et équation de trajectoire (indépendante du temps) !**

### Comment déterminer l'équation de la trajectoire ?



Etape 1 : Isoler la variable  $t$  dans l'équation horaire la plus simple (très souvent une équation du premier degré).

Etape 2 : Remplacer la variable  $t$  par l'expression trouvée précédemment dans la seconde équation horaire puis simplifier l'équation.

## II-La vitesse du point matériel M

### 1-Vitesse moyenne :

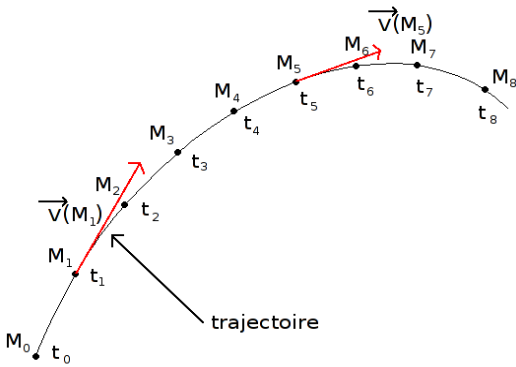
Un même déplacement peut se faire pendant des durées différentes. Le rapport de la distance  $d$  parcourue sur la durée  $\Delta t$  mise pour la parcourir est alors appelé **vitesse moyenne** notée  $v_{\text{moy}}$ .

$v_{\text{moy}} = \frac{d}{\Delta t}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>v_{\text{moy}}</math> : vitesse moyenne ( <math>\text{m} \cdot \text{s}^{-1}</math> )</li> <li>- <math>d</math> : distance parcourue (m)</li> <li>- <math>\Delta t</math> : durée du parcours (s)</li> </ul>
---------------------------------------	---

Le **vecteur vitesse moyenne**  $\vec{v}_{\text{moy}}$  correspond au rapport du **vecteur déplacement**  $\overrightarrow{M_i M_{i+1}}$  par la durée entre les dates  $t_{i+1}$  et  $t_i$  :  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ .

$\vec{v}_{\text{moy}} = \frac{\overrightarrow{M_i M_{i+1}}}{\Delta t}$	
--	--

### 2-Vitesse instantanée :



La **vitesse instantanée en un point** est assimilable (c'est une approximation) à la vitesse moyenne lorsque les positions successives de ce point sont très proches l'une de l'autre et que l'intervalle de temps  $\Delta t$  devient très petit.

Expression de la vitesse instantanée :  $v_i = v(t_i) = \frac{M_i M_{i+1}}{t_{i+1} - t_i} = \frac{M_i M_{i+1}}{\Delta t}$

Le vecteur vitesse instantanée à la date  $t_i$ ,  $\vec{v}(t_i)$  est défini comme étant la limite quand  $\Delta t$  tend vers 0 du vecteur vitesse moyenne.



$$\vec{v}(t_i) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \vec{v}_{\text{moy}} \Leftrightarrow \vec{v}(t_i) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\overrightarrow{M_i M_{i+1}}}{\Delta t} \right)$$

or  $\overrightarrow{M_i M_{i+1}} = \overrightarrow{M_i O} + \overrightarrow{O M_{i+1}} = \overrightarrow{O M_{i+1}} - \overrightarrow{O M_i} = \overrightarrow{O M}(t_{i+1}) - \overrightarrow{O M}(t_i)$  et  $\Delta t = t_{i+1} - t_i \Leftrightarrow t_{i+1} = t_i + \Delta t$

d'où  $\vec{v}(t_i) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\overrightarrow{O M}(t_{i+1}) - \overrightarrow{O M}(t_i)}{\Delta t} \right) \Leftrightarrow \vec{v}(t_i) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\overrightarrow{O M}(t_i + \Delta t) - \overrightarrow{O M}(t_i)}{\Delta t} \right)$

Cette limite est la dérivée par rapport au temps, à la date  $t_i$ , du vecteur position  $\overrightarrow{O M}$  :  $\vec{v}(t_i) = \frac{d\overrightarrow{O M}(t_i)}{dt}$ .

**Dans un référentiel donné, le vecteur vitesse instantanée du point M à la date t est égal à la dérivée par rapport au temps du vecteur position  $\overrightarrow{O M}(t)$  à cette date.**

$\vec{v}(t) = \frac{d\overrightarrow{O M}(t)}{dt}$	<p><b>Caractéristiques du vecteur vitesse instantanée :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Point d'application</u> : le point M à la date t</li> <li>• <u>Direction</u> : la tangente à la trajectoire au point M</li> <li>• <u>Sens</u> : Celui du mouvement</li> <li>• <u>Valeur/norme</u> : <math>\ \vec{v}(t)\ </math> (en <math>\text{m} \cdot \text{s}^{-1}</math> )</li> </ul>	
--	--	--

### Coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse instantanée :

Les coordonnées cartésiennes  $v_x(t)$ ,  $v_y(t)$  et  $v_z(t)$  du vecteur vitesse instantanée sont les dérivées par rapport au temps des coordonnées du vecteur position  $\overrightarrow{O M}(t)$ .

$$\vec{v}(t) = \frac{d\overrightarrow{O M}(t)}{dt} = \frac{d[x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k}]}{dt} = \frac{dx(t)}{dt}\vec{i} + \frac{dy(t)}{dt}\vec{j} + \frac{dz(t)}{dt}\vec{k} = v_x(t)\vec{i} + v_y(t)\vec{j} + v_z(t)\vec{k}$$

Coordonnée selon x	Coordonnée selon y	Coordonnée selon z
$v_x(t) = \frac{dx(t)}{dt}$	$v_y(t) = \frac{dy(t)}{dt}$	$v_z(t) = \frac{dz(t)}{dt}$
Valeur de la vitesse instantanée : $\ \vec{v}(t)\  = v(t) = \sqrt{(v_x(t))^2 + (v_y(t))^2 + (v_z(t))^2}$ (en $m \cdot s^{-1}$ )		



Les coordonnées cartésiennes  $v_x(t)$ ,  $v_y(t)$  et  $v_z(t)$  du vecteur vitesse instantanée peuvent être négatives mais la valeur de la vitesse instantanée est toujours positive !

### III-L'accélération du point matériel M

En physique, le sens du mot « accélération » n'est pas le même que dans la vie de tous les jours. On parle d'**accélération** d'un point lorsqu'au moins une des caractéristiques du vecteur vitesse instantanée de ce point (direction, sens, valeur) change.

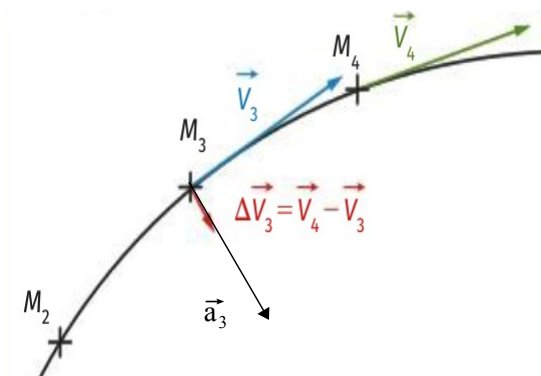
#### 1-Accélération moyenne :

À la date  $t_i$ , le vecteur vitesse instantanée de M est noté  $\vec{v}(t_i)$ , à la date  $t_{i+1}$  (postérieur à la date  $t_i$ ), ce vecteur est noté  $\vec{v}(t_{i+1})$ .

On définit alors la **variation du vecteur vitesse** à la date  $t_i$  :  $\Delta \vec{v}_i = \vec{v}(t_{i+1}) - \vec{v}(t_i) = \Delta \vec{v}(t_i)$ .

Le **vecteur accélération moyenne**  $\vec{a}_{\text{moy}}$  correspond au rapport de la variation vecteur vitesse  $\Delta \vec{v}_i$  par la durée entre les dates  $t_{i+1}$  et  $t_i$  :  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  :  $\vec{a}_{\text{moy}} = \frac{\vec{v}_{i+1} - \vec{v}_i}{\Delta t}$ .

#### 2-Accélération instantanée :



L'**accélération instantanée en un point** est assimilable (c'est une approximation) à l'accélération moyenne lorsque les positions successives de ce point sont très proches l'une de l'autre et que l'intervalle de temps  $\Delta t$  entre ces points devient très petit.

Expression de l'accélération instantanée :

$$a_i = a(t_i) = \frac{\|\vec{v}_{i+1} - \vec{v}_i\|}{t_{i+1} - t_i} = \frac{\|\Delta \vec{v}_i\|}{\Delta t}$$

Le **vecteur accélération instantanée à même direction et même sens** que le vecteur variation de vitesse  $\Delta \vec{v}_i$ .

Le vecteur accélération instantanée  $\vec{a}(t_i)$  est défini comme étant la limite quand  $\Delta t$  tend vers 0 du vecteur accélération moyenne.



$$\vec{a}(t_i) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \vec{a}_{\text{moy}} \Leftrightarrow \vec{a}(t_i) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\vec{v}(t_{i+1}) - \vec{v}(t_i)}{\Delta t} \right) \Leftrightarrow \vec{a}(t_i) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\vec{v}(t_i + \Delta t) - \vec{v}(t_i)}{\Delta t} \right)$$

Cette limite est la dérivée par rapport au temps, à la date  $t_i$ , du vecteur  $\vec{v}$  :  $\vec{a}(t_i) = \frac{d\vec{v}(t_i)}{dt}$ .

**Dans un référentiel donné, le vecteur accélération instantanée du point M à la date t est égal à la dérivée par rapport au temps du vecteur vitesse  $\vec{v}(t)$  à cette date :  $\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt}$**

#### Coordonnées cartésiennes du vecteur accélération instantanée :

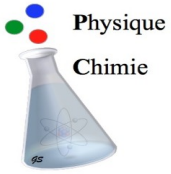
Les coordonnées cartésiennes  $a_x(t)$ ,  $a_y(t)$  et  $a_z(t)$  du vecteur accélération instantanée sont les dérivées par rapport au temps des coordonnées du vecteur vitesse  $\vec{v}(t)$ .

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \frac{d[v_x(t)\vec{i} + v_y(t)\vec{j} + v_z(t)\vec{k}]}{dt} = \frac{dv_x(t)}{dt}\vec{i} + \frac{dv_y(t)}{dt}\vec{j} + \frac{dv_z(t)}{dt}\vec{k} = a_x(t)\vec{i} + a_y(t)\vec{j} + a_z(t)\vec{k}$$

Coordonnée selon x	Coordonnée selon y	Coordonnée selon z
$a_x(t) = \frac{dv_x(t)}{dt}$	$a_y(t) = \frac{dv_y(t)}{dt}$	$a_z(t) = \frac{dv_z(t)}{dt}$
Valeur de l'accélération instantanée : $\ \vec{a}(t)\  = a(t) = \sqrt{(a_x(t))^2 + (a_y(t))^2 + (a_z(t))^2}$ (en $m \cdot s^{-2}$ )		



**Les coordonnées cartésiennes  $a_x(t)$ ,  $a_y(t)$  et  $a_z(t)$  du vecteur accélération instantanée peuvent être négatives mais la valeur de l'accélération instantanée est toujours positive !**

	<b>Mouvements et interactions</b>	
	<b>- Fiche B2 - Mouvements rectilignes</b>	<b>Exercices obligatoires : 15 p 252 + fiche exercices</b>

## I-Coordonnées des vecteurs position, vitesse et accélération

Si l'on connaît les coordonnées du vecteur position, on obtient celles du vecteur vitesse et du vecteur accélération par **dérivation**.

A l'inverse si l'on connaît les coordonnées du vecteur accélération, on peut remonter à celles du vecteur vitesse puis à celle du vecteur position par **intégration successives** (opération contraire de la dérivation).

Les coordonnées du vecteur vitesse sont des primitives des coordonnées du vecteur accélération et les coordonnées du vecteur position sont les primitives des coordonnées du vecteur vitesse.

Soit  $A, B, C$  et  $D \in \mathbb{R}$

Fonction	Primitive
$A$	$A t + B$
$A t$	$\frac{1}{2} A t^2 + C$
$A t + B$	$\frac{1}{2} A t^2 + B t + D$

Les constantes ( $B, C$  et  $D$ ) qui apparaissent avec les primitives sont parfaitement déterminées par les conditions imposées au mouvement au départ à  $t=0s$ . Ces conditions sont appelées **conditions initiales**.

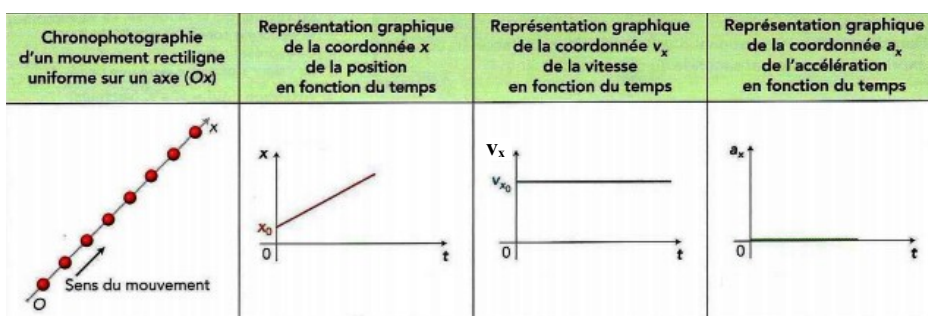
## II-Mouvement rectiligne uniforme

**Dans un référentiel donné, un système a un mouvement rectiligne uniforme si son vecteur vitesse a toujours même direction, même sens et même valeur : il est constant  $\vec{v}(t)=\vec{cste}$ . Son vecteur accélération est alors égal, à chaque instant, au vecteur nul  $\vec{a}(t)=\vec{0}$ .**

On se place dans un repère  $R(O, \vec{i})$ , la trajectoire du système modélisé par un point est une portion de droite.

- Coordonnée du vecteur  $\vec{a}(t)$  :  $\mathbf{a_x(t)=0}$
- Coordonnée du vecteur vitesse  $\vec{v}(t)$  : Par intégration de la coordonnée du vecteur accélération, on obtient la coordonnée du vecteur vitesse :  $v_x(t)=0 \times t + C_1$  or  $v_x(t=0)=v_{x0} \Leftrightarrow C_1=v_{x0}$   
Soit  $v_x(t)=v_{x0}$  (fonction constante)
- Coordonnée du vecteur position  $\vec{OM}(t)$  : Par intégration de la coordonnée du vecteur vitesse on obtient la coordonnée du vecteur position :  $x(t)=v_{x0}t + C_2$  or  $x(t=0)=x_0 \Leftrightarrow C_2=x_0$   
Soit  $x(t)=v_{x0}t + x_0$  (fonction affine)

### Représentations graphiques :



La détermination du coefficient directeur de la droite représentant la fonction  $x(t)$  permet de remonter à  $v_{x0}$ , coordonnée du vecteur vitesse selon  $x$ , du système en mouvement rectiligne uniforme.

### III- Mouvement rectiligne uniformément varié

Dans un référentiel donné, un système a un mouvement rectiligne uniformément varié si son vecteur accélération a toujours même direction, même sens et même valeur : il est constant  $\vec{a}(t) = \overrightarrow{cste}$ .

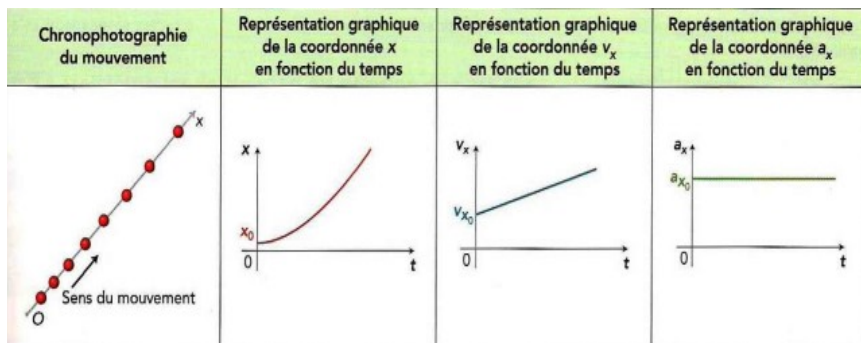
-Si  $\vec{a}(t)$  et  $\vec{v}(t)$  sont colinéaires et de même sens ( $\vec{a}(t) \cdot \vec{v}(t) > 0$ ) : le mouvement est accéléré.

-Si  $\vec{a}(t)$  et  $\vec{v}(t)$  sont colinéaires et de sens opposé ( $\vec{a}(t) \cdot \vec{v}(t) < 0$ ) : le mouvement est décéléré ou ralenti.

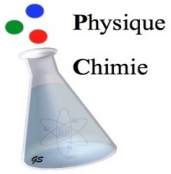
On se place dans un repère  $R(O, \vec{i})$ , la trajectoire du système modélisé par un point est une portion de droite.

- Coordonnée du vecteur  $\vec{a}(t)$  :  $a_x(t) = a_{x0}$
- Coordonnée du vecteur vitesse  $\vec{v}(t)$  : Par intégration de la coordonnée du vecteur accélération, on obtient la coordonnée du vecteur vitesse :  $v_x(t) = a_{x0}t + C_1$  or  $v_x(t=0) = v_{x0} \Leftrightarrow C_1 = v_{x0}$   
Soit  $v_x(t) = a_{x0}t + v_{x0}$  (fonction affine)
- Coordonnée du vecteur position  $\overrightarrow{OM}(t)$  : Par intégration de la coordonnée du vecteur vitesse on obtient la coordonnée du vecteur position :  $x(t) = \frac{1}{2}a_{x0}t^2 + v_{x0}t + C_2$  or  $x(t=0) = x_0 \Leftrightarrow C_2 = x_0$   
Soit  $x(t) = \frac{1}{2}a_{x0}t^2 + v_{x0}t + x_0$  (fonction polynôme du second degré)

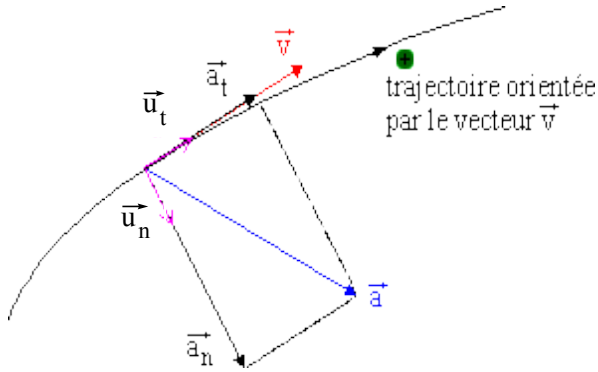
#### Représentation graphique :



La détermination du coefficient directeur de la droite représentant la fonction  $v_x(t)$  permet de remonter à  $a_{x0}$ , coordonnée du vecteur accélération selon  $x$ , du système en mouvement. Le coefficient directeur de la tangente à la courbe représentant la fonction  $x(t)$  à une date  $t$  correspond à la valeur de la coordonnée du vecteur vitesse à cette date.

	<b>Mouvements et interactions</b>	
	<b>- Fiche B3 -</b> <b>Cinématique dans le repère de Frenet</b>	<b>Exercices obligatoires : 7 p 229 – 9 p 229</b>

## I-Repère de Frenet



Le **repère de Frenet** est un repère orthonormé lié au mobile donc se déplaçant avec ce dernier. On le note  $R(M, \vec{u}_t, \vec{u}_n)$ .

-  $\vec{u}_t$  est un vecteur unitaire tangent (**vecteur tangentiel**) à la trajectoire au point M, le sens de  $\vec{u}_t$  est pris dans le sens du mouvement.

-  $\vec{u}_n$  est un vecteur unitaire normal (perpendiculaire) à  $\vec{u}_t$  (**vecteur normal**) dirigé vers le centre de courbure de la trajectoire.

### Vecteur vitesse :

Le vecteur vitesse est toujours tangent à la trajectoire, son expression dans le repère de Frenet est :  
 $\vec{v}(t) = \|\vec{v}(t)\| \vec{u}_t$ .

### Vecteur accélération :

$$\vec{a}(t) = \frac{dv(t)}{dt} \vec{u}_t + \frac{v(t)^2}{r} \vec{u}_n \quad \text{or} \quad \vec{a}(t) = \vec{a}_t(t) + \vec{a}_n(t) :$$

-  $a_t(t) = \frac{dv(t)}{dt}$  est appelée accélération tangentielle



**Expression à connaître par cœur !**

-  $a_n(t) = \frac{v(t)^2}{r}$  est appelée vecteur accélération normale (r correspond au rayon de courbure de la trajectoire)

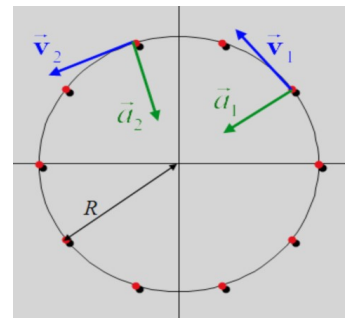
## II-Mouvement circulaire uniforme

- Trajectoire : cercle de rayon R
- Evolution de la vitesse : constante ( $v_0$ )

Vecteur vitesse :  $\vec{v}(t) = v_0 \vec{u}_t$



**La norme de la vitesse est constante mais le vecteur vitesse n'est pas un vecteur constant**, il change de direction et de sens à chaque instant (voir figure ci-contre).



Vecteur accélération :  $\vec{a}(t) = \frac{dv(t)}{dt} \vec{u}_t + \frac{v(t)^2}{R} \vec{u}_n$  or  $v(t) = v_0 = \text{cste} \Leftrightarrow \frac{dv(t)}{dt} = 0$

$$\vec{a}_t(t) = \frac{dv(t)}{dt} \vec{u}_t = \vec{0} \quad \text{d'où} \quad \vec{a}(t) = \frac{v_0^2}{R} \vec{u}_n$$



**La norme de l'accélération est constante mais le vecteur accélération n'est pas un vecteur constant**, il change de direction et de sens à chaque instant (voir figure ci-dessus).

-Le vecteur accélération est toujours selon  $\vec{u}_n$  : il est toujours **centripète** (c'est-à-dire orienté vers le centre) !

-La norme du vecteur accélération est **constante** et égale à  $a_0 = \frac{v_0^2}{R}$ .

### III- Mouvement circulaire varié

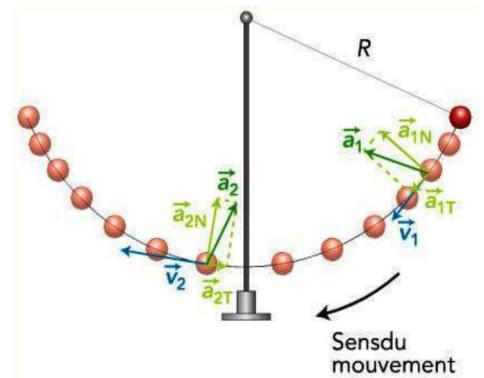
- Trajectoire : cercle de rayon R
- Evolution de la vitesse : varie

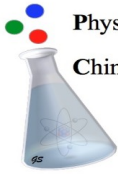
Vecteur vitesse :  $\vec{v}(t) = \|\vec{v}(t)\| \vec{u}_t$  : la vitesse  $\|\vec{v}(t)\| = v(t)$  varie

Vecteur accélération :  $\vec{a}(t) = \frac{dv(t)}{dt} \vec{u}_t + \frac{v(t)^2}{R} \vec{u}_n$

-Si  $\vec{a}(t) \cdot \vec{v}(t) > 0 \Rightarrow$  Mouvement circulaire accéléré et  $a_t(t) = \frac{dv(t)}{dt} > 0$

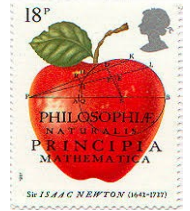
-Si  $\vec{a}(t) \cdot \vec{v}(t) < 0 \Rightarrow$  Mouvement circulaire décéléré (ou ralenti) et  $a_t(t) = \frac{dv(t)}{dt} < 0$



 Physique Chimie	<b>Mouvements et interactions</b>	
	<b>- Fiche B4 -</b> <b>Forces et lois de Newton</b>	<b>Exercices obligatoires : 13 p 229 – 17 p 230 – 20 p 231</b> <b>Exercices en plus : 27 p 233 – 29 p 234</b>



L'ensemble des principes de la mécanique a été formalisé en 1686 par Isaac Newton (1642-1727), dans son ouvrage intitulé *Philosophiæ naturalis principia mathematica* qui est devenu l'un des ouvrages fondamentaux de la physique et a été à l'origine de la mécanique classique dite newtonienne.



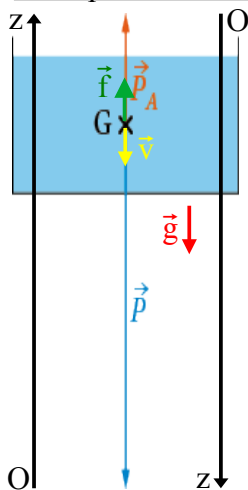
## I-Forces

Une **force** a pour but de **modéliser l'action de l'extérieur sur le système**. Elle est représentée par un vecteur  $\vec{F}_{\text{acteur/système}}$  et possède **quatre caractéristiques** : un point d'application, une direction, un sens et une valeur ou norme exprimée en **Newton (N)**.

Il est très important de :

- savoir **projeter un vecteur (vitesse, force, champ) pour obtenir ses coordonnées dans le repère cartésien**.
- savoir **donner l'expression vectorielle d'une force dans le repère cartésien** ;

Exemples de forces :



**-Poids :  $\vec{P} = m \vec{g}$**  (vertical vers le bas)

Par projection sur l'axe (Oz) orienté vers le haut :  $P_z = mg_z$  or  $g_z = -g \Leftrightarrow P_z = -mg$ .

Expression vectorielle :  $\vec{P} = P_z \vec{k} = -m g \vec{k}$ .

Par projection sur l'axe (Oz) orienté vers le bas :  $P_z = mg$  or  $g_z = g \Leftrightarrow P_z = mg$ .

Expression vectorielle :  $\vec{P} = P_z \vec{k} = m g \vec{k}$ .

**-Poussée d'Archimède :  $\vec{P}_A = -\rho(\text{fluide}) \times V_{\text{immergé}} \times \vec{g}$**  (verticale vers le haut)

Par projection sur l'axe (Oz) orienté vers le haut :  $P_{Az} = -\rho(\text{fluide}) V_{\text{immergé}} g_z$  or  $g_z = -g$

$\Leftrightarrow P_{Az} = \rho(\text{fluide}) V_{\text{immergé}} g$  . Expression vectorielle :  $\vec{P}_A = P_{Az} \vec{k} = \rho(\text{fluide}) V_{\text{immergé}} g \vec{k}$  .

Par projection sur l'axe (Oz) orienté vers le bas :  $P_{Az} = -\rho(\text{fluide}) V_{\text{immergé}} g_z$  or  $g_z = g$

$\Leftrightarrow P_{Az} = -\rho(\text{fluide}) V_{\text{immergé}} g$  . Expression vectorielle :  $\vec{P}_A = P_{Az} \vec{k} = -\rho(\text{fluide}) V_{\text{immergé}} g \vec{k}$

**-Frottements fluides :  $\vec{f} = -\alpha \vec{v}$**  (colinéaire et de sens contraire au vecteur vitesse)

Par projection sur l'axe (Oz) orienté vers le haut :  $f_z = -\alpha v_z$  or  $v_z = -v \Leftrightarrow f_z = \alpha v$ .

Expression vectorielle :  $\vec{f} = f_z \vec{k} = \alpha v \vec{k}$

Par projection sur l'axe (Oz) orienté vers le bas :  $f_z = -\alpha v_z$  or  $v_z = v \Leftrightarrow f_z = -\alpha v$

Expression vectorielle :  $\vec{f} = f_z \vec{k} = -\alpha v \vec{k}$

## II-Première loi de Newton ou principe d'inertie

**Si les forces qui s'exercent sur un système**, modélisé par un point matériel, **se compensent**, alors :

- le système est **immobile** s'il n'a pas de vitesse initiale ;
- le système a un **mouvement rectiligne uniforme** s'il possède une vitesse initiale.

Réciproquement, si un système, modélisé par un point matériel, est immobile ou en mouvement rectiligne uniforme, alors les forces qui s'exercent sur lui se compensent.

Immobilité ou mouvement rectiligne uniforme

$$\Delta \vec{v} = \vec{0}$$



Forces qui se compensent

$$\sum \vec{F} = \vec{0}$$

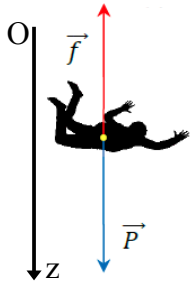
- **Centre de masse :**

Le centre de masse G d'un système est l'**unique point de ce système où peut toujours s'appliquer le principe d'inertie.**

- **Référentiel galiléen :**

Un référentiel galiléen est un référentiel dans lequel le principe d'inertie s'applique.

En physique, le meilleur référentiel galiléen que l'on peut définir est le référentiel de Copernic (référentiel du centre de masse du soleil). **D'autres référentiels usuels liés à la Terre (géocentrique, terrestre) sont en général supposés galiléens** (sur une durée plus ou moins longue ...).



Exemple : Chute d'un parachutiste en mouvement rectiligne uniforme

D'après le principe d'inertie :  $\sum \vec{F} = \vec{P} + \vec{f} = \vec{0} \Leftrightarrow m \vec{g} - \alpha \vec{v} = \vec{0}$

Par projection selon l'axe (Oz) :  $P_z + f_z = 0 \Leftrightarrow mg_z - \alpha v_z = 0$

or  $g_z = g$  et  $v_z = v$

On a donc :  $mg - \alpha v = 0 \Leftrightarrow mg = \alpha v$

### III-Deuxième loi de Newton ou principe fondamental de la dynamique



Il est possible de retrouver la deuxième loi de Newton à partir de la relation approchée vue en

première  $\sum \vec{F} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ . Si  $\Delta t$  tend vers 0 alors  $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \right) = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a}$  alors  $\sum \vec{F} = m \vec{a}$

**Dans un référentiel galiléen, la somme des forces  $\sum \vec{F}$  qui s'exercent sur un système, modélisé par un point, de masse m constante est égale au produit de sa masse par l'accélération  $\vec{a}$  de son centre de masse :**

$\sum \vec{F} = m \vec{a}(t)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\ \sum \vec{F}\ </math> : norme du vecteur <math>\sum \vec{F}</math> (N)</li> <li>- m : masse du système (kg)</li> <li>- <math>\ \vec{a}(t)\ </math> : norme du vecteur accélération ( <math>m \cdot s^{-2}</math> )</li> </ul>
-------------------------------	--

Le vecteur  $\sum \vec{F}$  est colinéaire et de même sens au vecteur accélération  $\vec{a}$  .



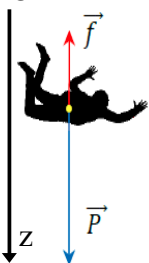
**La norme du vecteur  $\sum \vec{F}$  n'est pas égale à la somme des normes des forces :**

$\|\sum \vec{F}\| \neq \sum F$  .

Remarque : Le principe d'inertie (ou première loi de Newton) est un cas particulier de la deuxième loi de Newton car si  $\vec{a}(t) = \vec{0}$  (  $\vec{v}(t) = \vec{0}$  ou  $\vec{v}(t) = \text{cste}$  ) alors  $\sum \vec{F} = \vec{0}$  .

O

Exemple : Chute d'un parachutiste en mouvement rectiligne accéléré (sans vitesse initiale)



D'après la deuxième loi de Newton :  $\sum \vec{F} = \vec{P} + \vec{f} = m \vec{a} \Leftrightarrow m \vec{g} - \alpha \vec{v} = m \vec{a}$

Par projection selon l'axe (Oz) :  $P_z + f_z = m a_z \Leftrightarrow m g_z - \alpha v_z = m a_z$

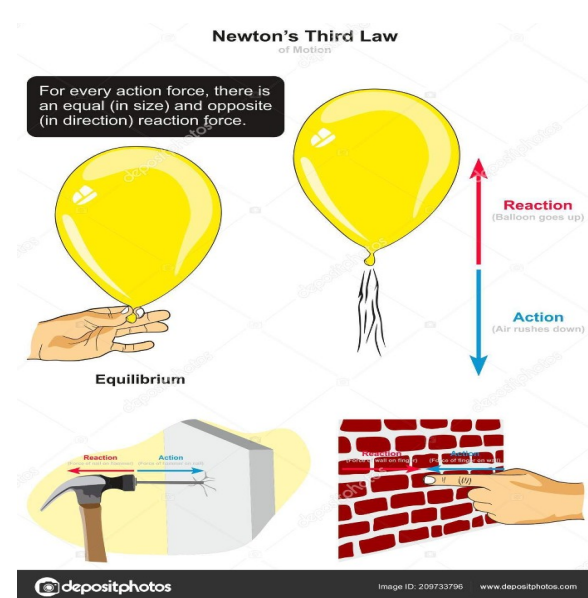
or  $g_z = g$ ,  $v_z = v$  et  $a_z = \frac{dv_z}{dt} = a = \frac{dv}{dt}$

On a donc :  $mg - \alpha v = ma \Leftrightarrow a = g - \frac{\alpha}{m} v$

$mg - \alpha v = m \frac{dv}{dt} \Leftrightarrow m \frac{dv}{dt} + \alpha v = mg \Leftrightarrow \frac{dv}{dt} + \frac{\alpha}{m} v = g$  : Il s'agit d'une équation différentielle vérifiée par la vitesse v. La résolution des équations différentielles sera traitée plus tard dans l'année.

Solution de cette équation différentielle :  $v = \frac{mg}{\alpha} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$  avec  $\tau = \frac{m}{\alpha}$

## IV-Troisième loi de Newton ou principe des actions réciproques



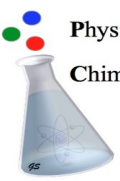
Dans son ouvrage fondamental *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Newton a établi une troisième loi dite de l'action et de la réaction (ou principe des actions réciproques). Elle s'énonce comme suit :

Quand deux corps interagissent, la force  $\vec{F}_{A/B}$  exercée par le corps A sur le corps B est égale en norme et opposée en sens à la force  $\vec{F}_{B/A}$  exercée par le corps B sur le corps A.

On peut donc écrire :  $\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$  et  $F_{A/B} = F_{B/A}$

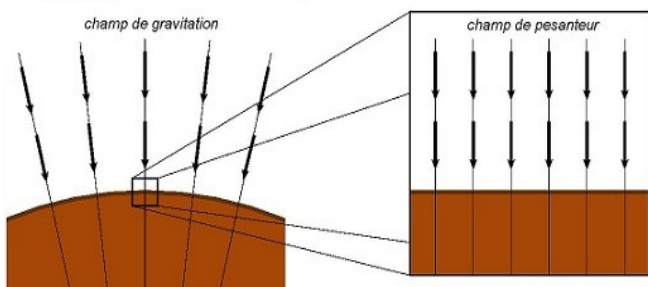
Exemples :

- Ballon de baudruche et l'air
- Forces gravitationnelles et électrostatiques
- Marteau et clou

 Physique Chimie	<b>Mouvements et interactions</b>	
	<b>- Fiche B5 -</b> <b>Mouvement dans le champ de pesanteur uniforme</b>	<b>Exercices obligatoires : 21 p 253 – 26 p 254 – 36 p 258</b> <b>Exercices en plus : 28 p 255</b>

## I- Généralités

### 1- Notion de champ de pesanteur :



Au voisinage de la Terre, règne un champ de pesanteur caractérisé par le vecteur  $\vec{g}$  dont les caractéristiques sont :

- Direction : rayon de la Terre (verticale)
- Sens : centripète (vers le centre de la Terre)
- Norme :  $\|\vec{g}\| = g = \frac{G \times M_T}{(R_T + h)^2}$

La norme du vecteur  $\vec{g}$  varie avec l'altitude  $h$ . Plus  $h$  augmente plus  $\|\vec{g}\|$  diminue.

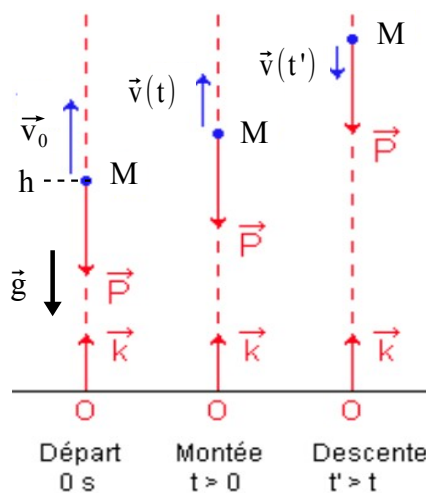
Tout corps de masse  $m$  est soumis à un ensemble de force répartie, équivalentes à une force unique appelée poids du corps ( $\vec{P} = m \times \vec{g}$ ), appliquée au centre de masse du système.

On supposera, dans la suite, que le corps étudié reste dans une région de l'espace suffisamment réduite pour que le vecteur champ de pesanteur  $\vec{g}$  puisse être considéré comme constant. Dans cette région : on parle de **champ uniforme** (voir schéma ci-dessus).

### 2- Notion de chute libre :

On dit qu'un système est en **chute libre**, lorsque **la seule force qui s'exerce sur lui est son poids**. Cela signifie que l'on néglige les autres forces pouvant s'exercer sur le système comme la poussée d'Archimède ou la résistance de l'air (la norme du poids est au moins 10 fois plus grande que les normes des autres forces).

## II- Chute verticale libre



### 1- Etude dynamique :

Système d'étude : le point  $M$  de masse  $m$

Référentiel d'étude : Terrestre supposé Galiléen

Bilan des forces appliquées au système :

- Poids  $\vec{P} = m \vec{g}$
- Poussée d'Archimède due à l'air négligeable
- Frottement de l'air négligeable

=> Cas de la **CHUTE LIBRE**

Appliquons la seconde loi de Newton :

$$\sum \vec{F} = m \vec{a}(t) \Leftrightarrow \vec{P} = m \vec{a}(t) \Leftrightarrow m \vec{g} = m \vec{a}(t)$$

d'où  $\boxed{\vec{a}(t) = \vec{g}}$   $\Leftrightarrow$  le vecteur accélération est un vecteur constant.

Caractéristiques du vecteur accélération :

- Point d'application : le point  $M$  à la date  $t$
- Direction : Verticale
- Sens : Vers le bas
- Valeur/norme :  $\|\vec{a}\| = g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

## 2- Etude cinématique :

On se place dans le repère  $(O, \vec{k})$  soit selon l'axe  $(Oz)$ . Le mouvement comporte **deux phases** :

-Phase 1 (Montée) :  $\vec{a} \cdot \vec{v} < 0$  ( $\vec{a}$  et  $\vec{v}$  colinéaires et de sens contraire)

=> **mouvement rectiligne uniformément décéléré**

-Phase 2 (Descente) :  $\vec{a} \cdot \vec{v} > 0$  ( $\vec{a}$  et  $\vec{v}$  colinéaires et de même sens)

=> **mouvement rectiligne uniformément accéléré**

Etude des conditions initiales ( $t=0s$ ) :

-Vecteur vitesse  $\vec{v}_0$  : Par projection sur l'axe  $(Oz)$   $v_z(t=0)=v_0$

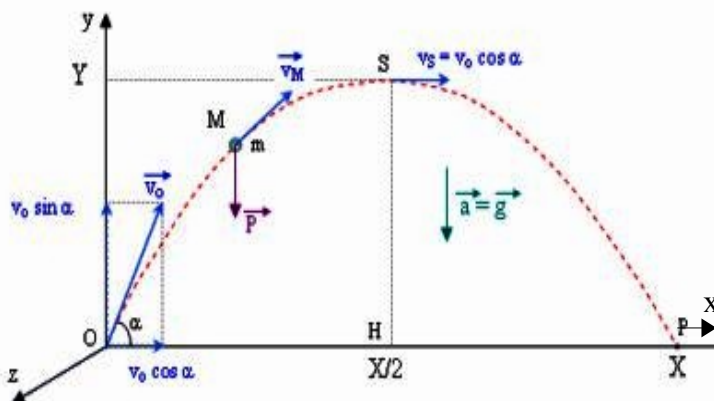
-Vecteur position  $\vec{OM}_0$  : Par projection sur l'axe  $(Oz)$   $z(t=0)=h$



**Il est important de faire attention à l'orientation des axes et des vecteurs (apparition d'un signe -)**

Vecteur accélération $\vec{a}(t)$	Vecteur vitesse $\vec{v}(t)$	Vecteur position $\vec{OM}(t)$
$\vec{a}(t) = \vec{g}$ Par projection sur l'axe $(Oz)$ : $\boxed{a_z(t) = g_z = -g}$ Signe - car $\vec{g}$ vertical vers le bas et $(Oz)$ vertical vers le haut. 	Par intégration de la coordonnée du vecteur accélération on obtient la coordonnée du vecteur vitesse : $v_z(t) = -gt + C_1$ or $v_z(t=0) = v_0 \Leftrightarrow C_1 = v_0$ d'où $\boxed{v_z(t) = -gt + v_0}$	Par intégration de la coordonnée du vecteur vitesse on obtient la coordonnée du vecteur position : $z(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t + C_2$ or $z(t=0) = h \Leftrightarrow C_2 = h$ d'où $\boxed{z(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t + h}$
<p>Modèle : Fonction constante</p>	<p>Modèle : Fonction affine</p>	<p>Modèle : Fonction parabolique</p>

## III- Chute parabolique libre



### 1- Etude dynamique :

Système d'étude : le point M de masse m

Référentiel d'étude : Terrestre supposé Galiléen

Bilan des forces appliquées au système :

- Poids  $\vec{P} = m\vec{g}$
- Poussée d'Archimède due à l'air négligeable
- Frottement de l'air négligeable

=> Cas de la **CHUTE LIBRE**

Appliquons la seconde loi de Newton :

$\sum \vec{F} = m\vec{a}(t) \Leftrightarrow \vec{P} = m\vec{a}(t) \Leftrightarrow m\vec{g} = m\vec{a}(t)$  d'où  $\boxed{\vec{a}(t) = \vec{g}}$  => le vecteur accélération est un vecteur constant.

On a,  $\vec{a}$  et  $\vec{v}_0$  non colinéaires : le **mouvement est plan**. Le plan de la trajectoire est le plan  $(\vec{v}_0, \vec{g})$ , on peut donc restreindre le repère d'espace à  $(O, \vec{i}, \vec{j})$ .

## 2-Etude cinématique :

On se place dans le repère d'espace à  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  soit une étude selon deux axes : (Ox) et (Oy).

Etude des conditions initiales ( t=0s ) :

**-Vecteur vitesse  $\vec{v}_0$  :**

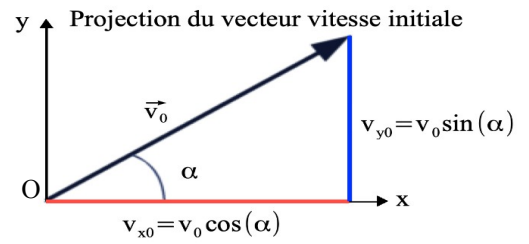
Par projection sur l'axe (Ox) :  $v_x(t=0) = v_{x0} = v_0 \cos(\alpha)$

Par projection sur l'axe (Oy) :  $v_y(t=0) = v_{y0} = v_0 \sin(\alpha)$

**-Vecteur position  $\vec{OM}_0$  :**

Par projection sur l'axe (Ox) :  $x(t=0) = 0$

Par projection sur l'axe (Oy) :  $y(t=0) = 0$



Vecteur accélération $\vec{a}(t)$	Vecteur vitesse $\vec{v}(t)$	Vecteur position $\vec{OM}(t)$
$\vec{a}(t) = \vec{g}$ $\vec{a}(t) \begin{pmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \end{pmatrix} = \vec{g} \begin{pmatrix} g_x = 0 \\ g_y = -g \end{pmatrix}$ Par projection sur l'axe (Ox) : $\boxed{a_x(t) = g_x = 0}$ Par projection sur l'axe (Oy) : $\boxed{a_y(t) = g_y = -g}$ Orientation des vecteurs et des axes ...	Par intégration des coordonnées du vecteur accélération on obtient les coordonnées du vecteur vitesse : Selon (Ox) : $v_x(t) = 0 \times t + C_1 = C_1$ $v_x(t=0) = v_0 \cos(\alpha) \Leftrightarrow C_1 = v_0 \cos(\alpha)$ $\Rightarrow \boxed{v_x(t) = v_0 \cos(\alpha)}$ Selon (Oy) : $v_y(t) = -gt + C_2$ $v_y(t=0) = v_0 \sin(\alpha) \Leftrightarrow C_2 = v_0 \sin(\alpha)$ $\Rightarrow \boxed{v_y(t) = -gt + v_0 \sin(\alpha)}$	Par intégration des coordonnées du vecteur vitesse on obtient les coordonnées du vecteur position : Selon (Ox) : $x(t) = v_0 \cos(\alpha)t + C_3$ $x(t=0) = 0 \Leftrightarrow C_3 = 0$ $\Rightarrow \boxed{x(t) = v_0 \cos(\alpha)t}$ Selon (Oy) : $y(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 \sin(\alpha)t + C_4$ $y(t=0) = 0 \Leftrightarrow C_4 = 0$ $\Rightarrow \boxed{y(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 \sin(\alpha)t}$
	<u>Modèle de <math>v_x(t)</math></u> : fonction constante <u>Modèle de <math>v_y(t)</math></u> : fonction affine	<u>Modèle de <math>x(t)</math></u> : fonction linéaire <u>Modèle de <math>y(t)</math></u> : fonction polynôme du seconde degré

## 3-Equation de la trajectoire et points particuliers :

- Equation de la trajectoire :

On cherche à obtenir l'équation de la trajectoire  $y=f(x)$  :

A partir de l'équation horaire  $x(t)$ , exprimons t en fonction de x :  $x(t) = v_0 \cos(\alpha)t \Leftrightarrow \boxed{t(x) = \frac{x}{v_0 \cos(\alpha)}}$





On injecte l'expression précédente dans l'équation horaire  $y(t)$  afin d'obtenir l'équation de y en fonction de x :

$$y(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 \sin(\alpha)t \Leftrightarrow y(x) = -\frac{1}{2}g \left( \frac{x}{v_0 \cos(\alpha)} \right)^2 + v_0 \sin(\alpha) \left( \frac{x}{v_0 \cos(\alpha)} \right) \text{ or } \tan(\alpha) = \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)}$$

Après simplification :  $\boxed{y(x) = -\frac{1}{2}g \frac{x^2}{(v_0 \cos(\alpha))^2} + \tan(\alpha)x}$

La trajectoire est **un arc de parabole** qui dépend des conditions initiales du mouvement (vitesse initiale et position initiale).

- La portée et flèche :

La portée	La flèche
La portée correspond à la <b>distance entre le point de lancement et le point d'impact P</b> du système étudiée <b>sur l'horizontale</b> . On détermine la portée $d = x_P - x_O = x_P = X$ grâce à l'ordonnée du point d'impact $z_C = 0$ .	<b>La flèche est la hauteur maximale atteinte par le système d'étude.</b> Soit S le sommet de la parabole et $y_S$ la flèche. En S, $v_y(t_S) = 0$ (le vecteur vitesse est horizontal au point S et sa coordonnée selon y est nulle, voir schéma).
 $d = \frac{v_0^2 \sin(2\alpha)}{g}$ (voir QR code) 	 $y_S = \frac{v_0^2 \sin^2(\alpha)}{2g}$ (voir QR code) 
Portée maximale pour $\sin(2\alpha) = 1 \Leftrightarrow \alpha = 45^\circ$	

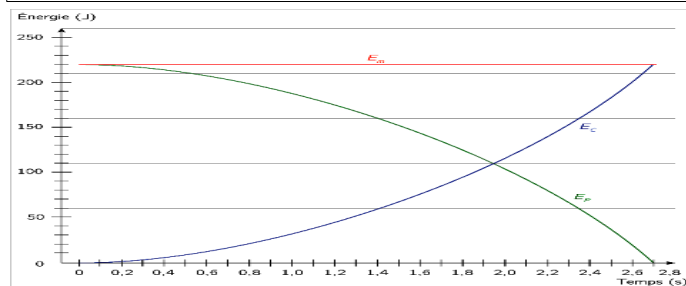
#### IV-Etude énergétique

Energie cinétique	Energie potentielle de pesanteur	Energie mécanique
$E_c = \frac{1}{2} m v^2$	$E_{pp} = m g y$	$E_m = E_c + E_{pp}$



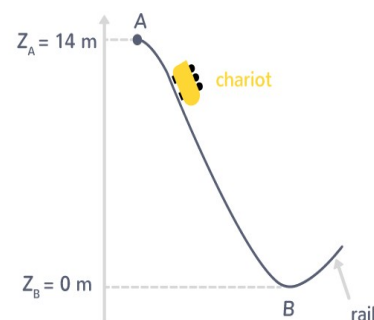
Pour un mouvement plan :  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$

Théorème de l'énergie cinétique	Théorème de l'énergie mécanique
$\Delta E_{cA \rightarrow B} = E_{cB} - E_{cA} = \sum W_{A \rightarrow B}(\vec{F})$	$\Delta E_{mA \rightarrow B} = E_{mB} - E_{mA} = \sum W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_{NC})$



En l'absence de forces non conservatives, ou lorsque les forces non conservatives ne travaillent pas, **l'énergie mécanique se conserve** :  $\Delta E_{mA \rightarrow B} = E_{mB} - E_{mA} = 0$  ou  $E_{mB} = E_{mA}$   
Toute l'énergie potentielle de pesanteur est convertie en énergie cinétique (et inversement).

Exemple : Montagne russe



Théorème de l'énergie mécanique :  $\Delta E_{mA \rightarrow B} = E_{mB} - E_{mA} = \sum W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_{NC})$

Forces exercées sur le chariot :

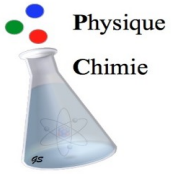
- Poids (force conservative)  $\vec{P}$
- Réaction des rail (force non conservative)  $\vec{R}$
- Frottements (force non conservative)  $\vec{f}$ , ici négligeables.

$\Delta E_{mA \rightarrow B} = E_{mB} - E_{mA} = W_{A \rightarrow B}(\vec{R})$  or  $\vec{R}$  est **toujours orthogonal au déplacement** donc  $W_{A \rightarrow B}(\vec{R}) = 0$

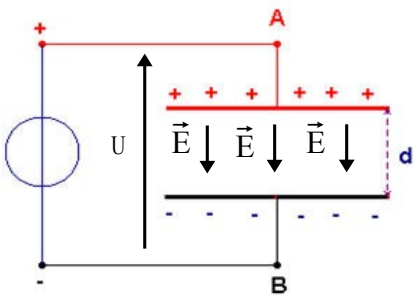
On a donc  $\Delta E_{mA \rightarrow B} = E_{mB} - E_{mA} = 0 \Leftrightarrow E_{mB} = E_{mA}$

Soit  $E_{ppB} + E_{cB} = E_{ppA} + E_{cA} \Leftrightarrow mgz_B + \frac{1}{2} m v_B^2 = mgz_A + \frac{1}{2} m v_A^2$  or  $z_B = 0 \Leftrightarrow \frac{1}{2} m v_B^2 = mgz_A + \frac{1}{2} m v_A^2$

La vitesse du chariot au point B s'obtient par :  $v_B^2 = 2gz_A + v_A^2 \Leftrightarrow v_B = \sqrt{2gz_A + v_A^2}$

	<b>Mouvements et interactions</b>	
	<b>- Fiche B6 -</b> <b>Mouvement dans le champ électrique uniforme</b>	<b>Exercices obligatoires : 11 p 251 – 19 p 253 – 23 p 253 – 25 p 254</b> <b>Exercices en plus : 33 p 256 – 34 p 257</b>

## I-Condensateur plan et champ électrique uniforme



On obtient un champ électrique (ou électrostatique) uniforme en appliquant une tension constante  $U = U_{AB} = -U_{BA}$  entre les deux armatures (plaques) d'un condensateur plan. En tout point situé entre les armatures, le vecteur champ électrique  $\vec{E}$ , est orthogonal aux armatures, **dirigé de la borne + vers la borne - du condensateur plan**, et sa valeur est donnée par la relation :

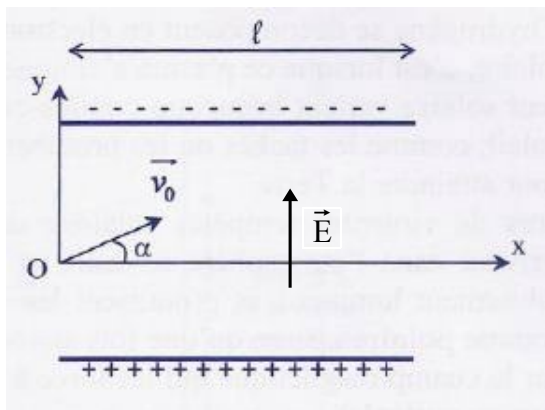
$E = \frac{ U }{d}$	-  U  valeur absolue de la tension aux bornes du condensateur (V) - d distance inter-plaque (m) - E norme du champ électrique ( $V \cdot m^{-1}$ ).
---------------------	---

Ce champ exerce sur une particule de charge q, une force électrostatique  $\vec{F}_e$  telle que :  $\vec{F}_e = q \vec{E}$ . L'orientation de la force dépend du signe de la charge q et de l'orientation du vecteur champ électrique.

La norme de la force électrostatique se calcule par :  $\|\vec{F}_e\| = F_e = |q| \times E$ . La force  $\vec{F}_e$  est **constante si le champ est uniforme**.

## II-Etude dynamique et cinématique

### 1-Etude dynamique :



Système d'étude : particule ponctuelle M de masse m et de charge q  
Référentiel d'étude : Terrestre supposé Galiléen  
Bilan des forces appliquées au système :

- Poids  $\vec{P} = m \vec{g}$
- Force électrostatique  $\vec{F}_e = q \vec{E}$



La masse de la particule m étant très petite, la norme du poids est négligeable devant la norme de la force électrostatique. **Il est important de savoir le montrer !**

La seule force qui s'exerce sur la particule est donc la force électrostatique.

Appliquons la seconde loi de Newton :

$\sum \vec{F} = m \vec{a}(t) \Leftrightarrow \vec{F}_e = m \vec{a}(t) \Leftrightarrow q \vec{E} = m \vec{a}(t)$  d'où  $\vec{a}(t) = \frac{q}{m} \vec{E} \Leftrightarrow$  Le vecteur accélération est un vecteur constant.

Caractéristiques du vecteur accélération :

- Point d'application : le point M à la date t
- Direction : perpendiculaire aux plaques du condensateur plan (même direction que  $\vec{E}$ )
- Sens : Dépend du signe de la charge q
- Valeur/norme :  $\|\vec{a}\| = \frac{|q|}{m} \times E$

On a,  $\vec{a}$  et  $\vec{E}$  colinéaires, le sens du vecteur accélération  $\vec{a}$  dépend du signe de la charge  $q$  de la particule.

On a,  $\vec{a}$  et  $\vec{v}_0$  non colinéaires : le **mouvement est plan**.

Le plan de la trajectoire est le plan  $(\vec{v}_0, \vec{E})$ , on peut donc restreindre le repère d'espace à  $(O, \vec{i}, \vec{j})$ .

## 2-Etude cinématique :

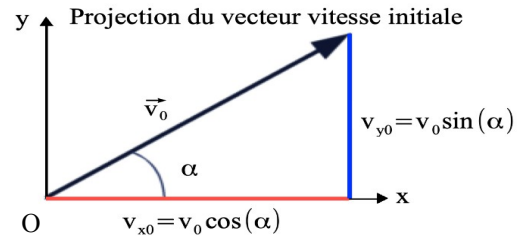
On se place dans le repère d'espace à  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  soit une étude selon deux axes : (Ox) et (Oy).

Etude des conditions initiales (  $t=0s$  ) :

**-Vecteur vitesse  $\vec{v}_0$  :**

Par projection sur l'axe (Ox) :  $v_x(t=0) = v_{x0} = v_0 \cos(\alpha)$

Par projection sur l'axe (Oy) :  $v_y(t=0) = v_{y0} = v_0 \sin(\alpha)$



**-Vecteur position  $\vec{OM}_0$  :**

Par projection sur l'axe (Ox) :  $x(t=0) = 0$

Par projection sur l'axe (Oy) :  $y(t=0) = 0$

Vecteur accélération $\vec{a}(t)$	Vecteur vitesse $\vec{v}(t)$	Vecteur position $\vec{OM}(t)$
$\vec{a}(t) = \frac{q}{m} \vec{E}$ $\vec{a}(t) \begin{pmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \end{pmatrix} = \frac{q}{m} \vec{E} \begin{pmatrix} E_x=0 \\ E_y=E \end{pmatrix}$ <p><b>ATTENTION!</b> Orientation des vecteurs</p> <p>Par projection sur l'axe (Ox) : <math>\vec{a}_x(t) = \frac{q}{m} E_x = 0</math></p> <p>Par projection sur l'axe (Oy) : <math>\vec{a}_y(t) = \frac{q}{m} E_y = \frac{q}{m} E</math></p>	<p>Par intégration des coordonnées du vecteur accélération on obtient les coordonnées du vecteur vitesse :</p> <p>Selon (Ox) : <math>v_x(t) = 0 \times t + C_1 = C_1</math>  <math>v_x(t=0) = v_0 \cos(\alpha) \Leftrightarrow C_1 = v_0 \cos(\alpha)</math>  <math>\Rightarrow \vec{v}_x(t) = v_0 \cos(\alpha)</math></p> <p>Selon (Oy) : <math>v_y(t) = \frac{q}{m} E t + C_2</math>  <math>v_y(t=0) = v_0 \sin(\alpha) \Leftrightarrow C_2 = v_0 \sin(\alpha)</math>  <math>\Rightarrow \vec{v}_y(t) = \frac{q}{m} E t + v_0 \sin(\alpha)</math></p>	<p>Par intégration des coordonnées du vecteur vitesse on obtient les coordonnées du vecteur position :</p> <p>Selon (Ox) : <math>x(t) = v_0 \cos(\alpha) t + C_3</math>  <math>x(t=0) = 0 \Leftrightarrow C_3 = 0</math>  <math>\Rightarrow \vec{x}(t) = v_0 \cos(\alpha) t</math></p> <p>Selon (Oy) :  <math>y(t) = \frac{1}{2} \frac{q}{m} E t^2 + v_0 \sin(\alpha) t + C_4</math>  <math>y(t=0) = 0 \Leftrightarrow C_4 = 0</math>  <math>\Rightarrow \vec{y}(t) = \frac{1}{2} \frac{q}{m} E t^2 + v_0 \sin(\alpha) t</math></p>

## 3-Equation de la trajectoire :

On cherche à obtenir l'équation de la trajectoire  $y=f(x)$  :

A partir de l'équation horaire  $x(t)$ , exprimons  $t$  en fonction de  $x$  :

$$x(t) = v_0 \cos(\alpha) t \Leftrightarrow \boxed{t(x) = \frac{x}{v_0 \cos(\alpha)}}$$

On injecte l'expression précédente dans l'équation horaire  $y(t)$  afin d'obtenir l'équation de  $y$  en fonction de  $x$  :

$$y(t) = \frac{1}{2} \frac{q}{m} E t^2 + v_0 \sin(\alpha) t \Leftrightarrow y(x) = \frac{1}{2} \frac{q}{m} E \left( \frac{x}{v_0 \cos(\alpha)} \right)^2 + v_0 \sin(\alpha) \left( \frac{x}{v_0 \cos(\alpha)} \right) \text{ or } \tan(\alpha) = \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)}$$

Après simplification : 
$$\boxed{y(x) = \frac{1}{2} \frac{q}{m} E \frac{x^2}{(v_0 \cos(\alpha))^2} + \tan(\alpha) x}$$

La trajectoire est **un arc de parabole** dont la concavité dépend de la charge  $q$  de la particule.

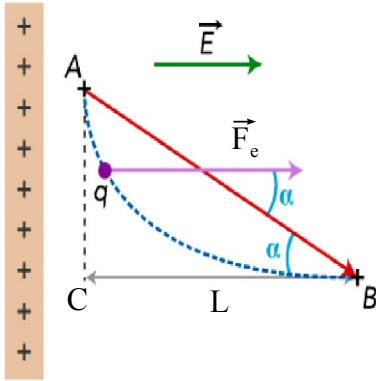
### III-Etude énergétique

#### 1-Travail de la force électrostatique :

L'expression du travail de la force électrostatique est :

$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \vec{AB}$	$- W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) : \text{Travail de la force électrostatique (J)}$
---	---

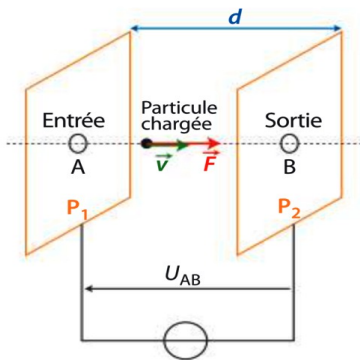
Il est possible d'exprimer le travail de la force électrostatique en fonction de la charge de la particule et de la tension appliquée aux bornes du condensateur.



$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \vec{AB}$  or  $\vec{AB} = \vec{AC} + \vec{CB}$  (relation de Chasles)  
 On sait que  $\vec{F}_e = q \times \vec{E}$   
 $W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) = q \vec{E} \cdot (\vec{AC} + \vec{CB}) = q \vec{E} \cdot \vec{AC} + q \vec{E} \cdot \vec{CB}$  (distributivité du produit scalaire)  
 -  $\vec{E}$  et  $\vec{AC}$  sont orthogonaux,  $\vec{E} \cdot \vec{AC} = 0$   
 -  $\vec{E}$  et  $\vec{CB}$  sont colinéaires et de même sens,  $\vec{E} \cdot \vec{CB} = E \times CB$   
 $W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) = q \times E \times CB$  et  $CB = L$  d'où  $W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) = qEL$

or  $E = \frac{|U|}{L}$  et  $|U| = U_{AB} \Leftrightarrow W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) = q U_{AB}$

#### 2-Principe de fonctionnement d'un accélérateur linéaire de particules :



**Un accélérateur linéaire permet d'accélérer en ligne droite des particules électriquement chargées.**

Une particule de charge électrique  $q$  placée dans un accélérateur linéaire de particules est accélérée par la force électrostatique (due au champ électrique uniforme) convenablement orienté.

Appliquons le théorème de l'énergie cinétique :

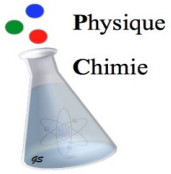
$\Delta E_{cA \rightarrow B} = E_{cB} - E_{cA} = W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e)$  or  $W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) = q U_{AB}$   
 d'où  $E_{cB} - E_{cA} = q U_{AB}$

Pour que la particule soit accélérée entre les points A et B il faut que  $v_B > v_A \Leftrightarrow E_{cB} > E_{cA}$  soit  $E_{cB} - E_{cA} > 0$ .

-Si  $q > 0 \Leftrightarrow$  la plaque  $P_1$  est positive et la plaque  $P_2$  est négative  $\Leftrightarrow U_{AB} > 0$

-Si  $q < 0 \Leftrightarrow$  la plaque  $P_1$  est négative et la plaque  $P_2$  est positive  $\Leftrightarrow U_{AB} < 0$

Expression de la vitesse au point B :  $v_B = \sqrt{v_A^2 + \frac{2q U_{AB}}{m}}$

	<b>Mouvements et interactions</b>	
	<b>- Fiche B7 -</b> <b>Mouvement dans le champ de gravitation</b>	<b>Exercices obligatoires : 5 p 270 – 7 p 271 – 13 p 272 – 16 p 272</b> <b>Exercice en plus : 15 p 272</b>

## I-Les lois de Kepler

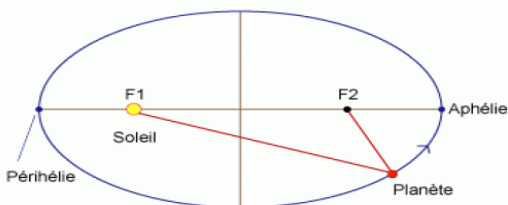


Johannes Kepler (photo ci-contre) (1571 - 1630) fut l'assistant de l'astronome danois Tycho Brahé. En 1600, à Prague, Brahé lui demanda de calculer l'orbite précise de Mars. En effet, il avait remarqué une excentricité de sa trajectoire, ce qui était considéré comme une anomalie à une époque où l'on pensait que les orbites des planètes étaient parfaitement circulaires.



A partir d'observations très précises, il établit de façon empirique trois lois qui décrivent le mouvement des planètes (QR code ci-contre). Ces lois furent publiées dans Astronomia Nova en 1609 et confirmèrent la théorie héliocentrique de Nicolas Copernic.

### 1-Première loi de Kepler ou loi des orbites elliptiques :



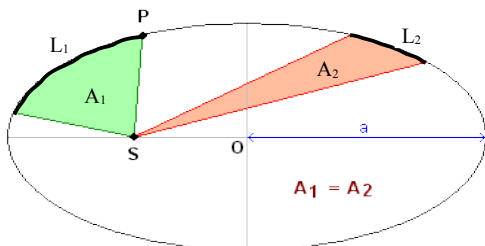
Dans le référentiel héliocentrique, la trajectoire du centre d'inertie d'une planète est une ellipse dont l'un des foyers est le centre du Soleil.

Remarques :

-A l'exception de Mercure, les mouvements des planètes peuvent être considérées comme circulaire.

-On appelle **périhélie**, la position la plus proche du Soleil et **aphélie**, la position la plus éloignée du Soleil.

### 2-Deuxième loi de Kepler ou loi des aires :



Le rayon vecteur SP qui relie le centre S du Soleil et le centre P de la planète balaie des aires égales pendant des durées égales.



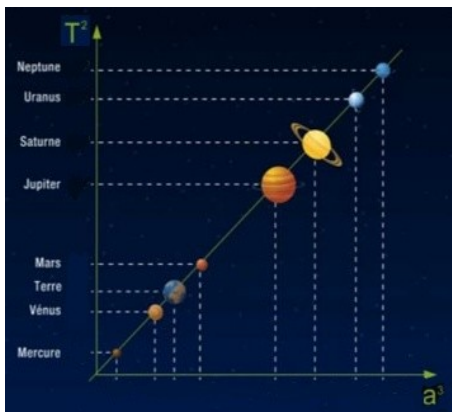
On a  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t$

Or le centre de la planète parcourt des arcs elliptiques de longueur  $L_1$  et  $L_2$  tel que  $L_1 > L_2$ .

On a donc  $\frac{L_1}{\Delta t} > \frac{L_2}{\Delta t}$  soit  $v_1 > v_2$  : **La vitesse du centre la planète n'est pas constante.**

Dans le référentiel héliocentrique, la vitesse de la planète devient donc plus grande lorsqu'elle se rapproche du Soleil. Elle est maximale au périhélie et minimale à l'aphélie.

### 3-Troisième de Kepler ou loi des périodes :



Le carré de la période de révolution « T » d'une planète autour du Soleil est proportionnel au cube du demi-grand axe « a » de l'ellipse.

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{cste}$$



**Expression à connaître par cœur !**

Quelles que soient les planètes choisies, le rapport est le même. Il ne dépend pas de la planète mais uniquement des caractéristiques du Soleil.

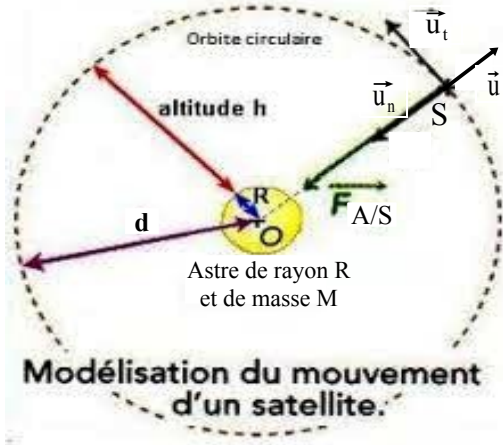
#### 4-Généralisation :

-**Satellites** : Tout corps qui est en révolution autour d'un astre.

-Les lois de Kepler, énoncée pour décrire le mouvement des planètes du système solaire, s'appliquent également à tous les satellites en révolution autour d'un astre (exemples : Terre-Lune ou Terre-Satellite artificiel).

-Dans l'**approximation des trajectoires circulaires**, la trajectoire est un cercle de rayon R, la troisième loi de Kepler devient alors  $\frac{T^2}{R^3} = \text{cste}$ .

## II-Mouvement d'un satellite autour d'un astre



On considère un satellite S de masse  $m$  dont le centre de masse est situé à une distance  $d = R + h$  du centre de l'astre. On admettra, en première approximation, que **l'orbite décrite par le centre de masse du satellite est un cercle et que le centre de cette orbite est le centre de l'astre.**

### Etude dynamique :

Système : Centre de masse du satellite de masse  $m$

Référentiel d'étude : **Référentiel du centre de l'astre**, référentiel supposé galiléen.

### Bilan des forces :

La seule force qui s'exerce sur le satellite est la force d'attraction gravitationnelle exercée par l'astre (A) sur le satellite (S) :  $\vec{F}_{A/S} = -G \times \frac{M \times m}{d^2} \vec{u} = m \vec{G}$  avec  $\vec{G} = -G \times \frac{M}{d^2} \vec{u}$  vecteur champ gravitationnel et  $\vec{u} = -\vec{u}_n$ .

On se place dans le repère de Frenet :  $\vec{F}_{A/S} = G \times \frac{M \times m}{d^2} \vec{u}_n$  et  $\vec{F}_{A/S} = m \vec{G}$  avec  $\vec{G} = G \times \frac{M}{d^2} \vec{u}_n$ .

Appliquons la seconde loi de Newton :

$$\sum \vec{F} = m \vec{a}(t) \Leftrightarrow \vec{F}_{A/S} = m \vec{a}(t) \Leftrightarrow m \vec{G} = m \vec{a}(t) \Leftrightarrow \vec{a}(t) = \vec{G} \text{ soit } \vec{a}(t) = \frac{G \times M}{d^2} \vec{u}_n$$

### Etude cinématique :

On se place dans le repère de Frenet et dans le cas d'un mouvement circulaire de rayon d, l'expression du

vecteur accélération est :  $\vec{a}(t) = \frac{dv(t)}{dt} \vec{u}_t + \frac{v(t)^2}{d} \vec{u}_n \Leftrightarrow \vec{a}(t) \begin{pmatrix} a_t(t) = \frac{dv(t)}{dt} \\ a_n(t) = \frac{v(t)^2}{d} \end{pmatrix}$

Or d'après la seconde loi de Newton :  $\vec{a}(t) = \underbrace{\frac{G \times M}{d^2}}_{a_n(t)} \vec{u}_n \Leftrightarrow \vec{a}(t) \begin{pmatrix} a_t(t) = 0 \\ a_n(t) = \frac{G \times M}{d^2} \end{pmatrix}$

On a donc par identification :

- $\vec{a}_t(t) = \frac{dv(t)}{dt} = 0 \Leftrightarrow v(t) = \text{cste}$  : Le mouvement est donc **uniforme** car la **vitesse est constante**.
- $\vec{a}_n(t) = \frac{v(t)^2}{d} = \frac{G \times M}{d^2} = \text{cste}$

Le vecteur accélération de la planète est, à chaque instant, **normal, centripète et de norme constante** : le **mouvement est donc circulaire uniforme**.

=> **Vitesse du satellite sur son orbite :**

$\frac{v(t)^2}{d} = \frac{G \times M}{d^2} \Leftrightarrow v(t)^2 = \frac{G \times M}{d} \Leftrightarrow v(t) = v_s = \sqrt{\frac{G \times M}{d}}$  : La valeur de la vitesse du satellite ne dépend que de la masse de l'astre et de la distance séparant le centre de l'astre et le centre du satellites.

Le vecteur vitesse est à chaque instant **tangent à la trajectoire** :  $\vec{v}(t) = \sqrt{\frac{G \times M}{d}} \vec{u}_t$ , **orienté dans le sens du mouvement et de norme constante**.

=> **Période de révolution du satellite et troisième de loi Kepler :**

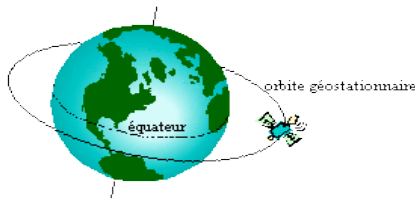
La période de révolution « T » d'un satellite est la durée que met ce satellite pour faire un tour autour son astre.

$$T = \frac{\text{périmètre du cercle}}{v_s} \Leftrightarrow T = \frac{2\pi d}{v_s} \text{ or } v_s = \sqrt{\frac{G \times M}{d}} \Leftrightarrow T = \frac{2\pi d}{\sqrt{\frac{G \times M}{d}}} \Leftrightarrow T = 2\pi d \times \sqrt{\frac{d}{G \times M}}$$

On a donc :  $T = 2\pi \times \sqrt{\frac{d^3}{G \times M}}$

Vérification de la troisième loi de Kepler :

$T^2 = 4\pi^2 \times \frac{d^3}{G \times M} \Leftrightarrow \frac{T^2}{d^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M} = \text{cste}$  : La constante de la troisième loi de Kepler dépend que de la masse de l'astre autour duquel gravite le satellite.



Remarque : Dans le cas du système {Terre-satellite} :

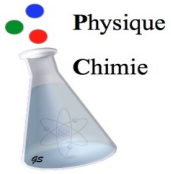
Un **satellite géostationnaire** est toujours positionné au dessus du même point de la surface de la Terre, **sa période de révolution est de 24h**. Les satellites géostationnaires sont en orbites autour de la Terre dans le plan équatorial terrestre à une altitude  $h = 3,58 \times 10^4 \text{ km}$ .



$$T_{\text{sat}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{d^3}{G \times M_{\text{Terre}}}} \Leftrightarrow T_{\text{sat}}^2 = 4\pi^2 \times \frac{d^3}{G \times M_{\text{Terre}}} \Leftrightarrow d^3 = \frac{T_{\text{sat}}^2 \times G \times M_{\text{Terre}}}{4\pi^2} \text{ or } d = R_{\text{Terre}} + h$$

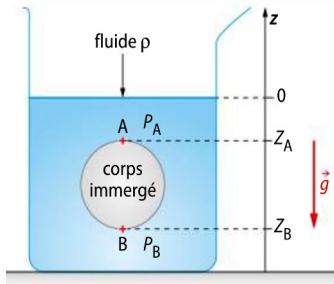
$$(R_{\text{Terre}} + h)^3 = \frac{T_{\text{sat}}^2 \times G \times M_{\text{Terre}}}{4\pi^2} \Leftrightarrow R_{\text{Terre}} + h = \left( \frac{T_{\text{sat}}^2 \times G \times M_{\text{Terre}}}{4\pi^2} \right)^{1/3} \Leftrightarrow h = \left( \frac{T_{\text{sat}}^2 \times G \times M_{\text{Terre}}}{4\pi^2} \right)^{1/3} - R_{\text{Terre}}$$

AN :  $h = \left( \frac{(24 \times 3600)^2 \times 6,67 \times 10^{-11} \times 5,97 \times 10^{24}}{4\pi^2} \right)^{1/3} - 6371 \times 10^3 = 3,58 \times 10^7 \text{ m} = 3,58 \times 10^4 \text{ km}$

	<b>Mouvements et interactions</b>	
	<b>- Fiche B8 -</b> <b>Dynamique des fluides</b>	<b>Exercices obligatoires : 14 p 289 – 20 p 290 – 23 p 292</b> <b>Exercices en plus : 21 p 291 – 26 p 293</b>

## I-La poussée d'Archimède

### 1-Origine de la poussée d'Archimède :



La poussée d'Archimède  $\vec{A}$  est la **somme des forces pressantes** exercées par un fluide au repos sur la partie immergée d'un corps (solide ou fluides). Elle résulte de la **différence de pression entre les parties inférieures et supérieures du corps immergé**.



D'après la loi fondamentale de la statique des fluides :

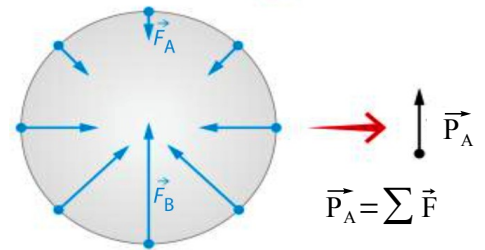
$$P_A - P_B = \rho(\text{fluide}) \times g \times (z_B - z_A)$$

or  $z_A > z_B \iff z_B - z_A < 0$  d'où  $P_A - P_B < 0 \iff P_B > P_A$

On sait que  $F = P \times S$  (force pressante), pour une même surface,  $F_B > F_A$ .

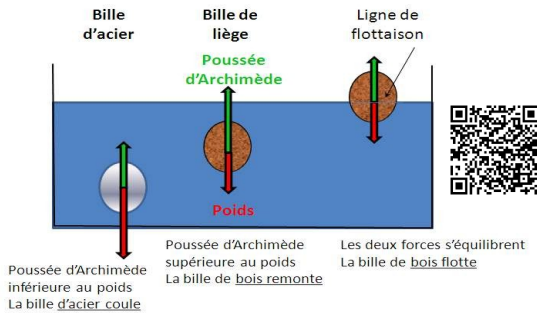
Pour deux points à la même altitude, les forces pressantes se compensent.

On peut donc voir, d'après le schéma ci-contre, que la somme des forces pressantes est verticale et orientée vers le haut : **la poussée d'Archimède  $\vec{P}_A$  est donc verticale et orientée vers le haut.**



### 2-Expression de la poussée d'Archimède :

La poussée d'Archimède exercée par un fluide de masse volumique  $\rho(\text{fluide})$  est une **force opposée au poids du fluide déplacé** :



$\vec{P}_A = -\rho(\text{fluide}) \times V_{\text{immergé}} \times \vec{g}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\ \vec{P}_A\ </math> : norme de la poussée d'Archimède (N)</li> <li>- <math>\rho(\text{fluide})</math> : masse volumique du fluide ( <math>\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}</math> )</li> <li>- <math>V_{\text{immergé}}</math> : volume du solide immergé ou volume du fluide déplacé ( <math>\text{m}^3</math> )</li> <li>- <math>\ \vec{g}\ </math> : norme du champ de pesanteur ( <math>\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}</math> )</li> </ul>

### Condition de flottaison :

Un objet flotte si son volume immergé est inférieur à son volume total. Dans ce cas, la valeur du poids de l'objet est égale à celle de la poussée d'Archimède.

### Exemple : Iceberg



Les icebergs sont constitués de glace d'eau douce, dont la masse volumique est égale à  $\rho_{\text{glace}} = 900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Soit  $V_t$  le volume total d'un iceberg et  $V_i$  son volume immergé dans l'eau. La masse volumique de l'eau salée est égale à  $\rho_{\text{eau}} = 1030 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .  
Calculer le rapport  $V_i/V_t$ .

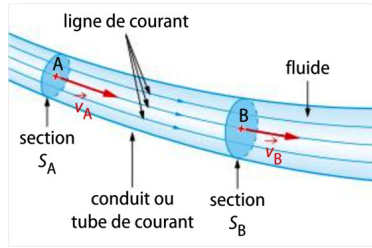
$$P = P_A \iff m_{\text{iceberg}} \times g = \rho_{\text{eau}} \times V_i \times g \iff \rho_{\text{glace}} \times V_t \times g = \rho_{\text{eau}} \times V_i \times g \iff \rho_{\text{glace}} \times V_t = \rho_{\text{eau}} \times V_i$$

d'où  $\frac{V_i}{V_t} = \frac{\rho_{\text{glace}}}{\rho_{\text{eau}}} \text{ AN} : \frac{V_i}{V_t} = \frac{900}{1030} = 0,874$  soit 87,4 %

La partie immergée de l'iceberg représente 87,4 % de la totalité de l'iceberg (seulement 12,6 % est visible).

## II-Écoulement d'un fluide incompressible

### 1-Fluide incompressible en régime permanent :



Un **fluide incompressible** est un fluide dont le volume est considéré comme constant quelle que soit la pression qu'il subit.

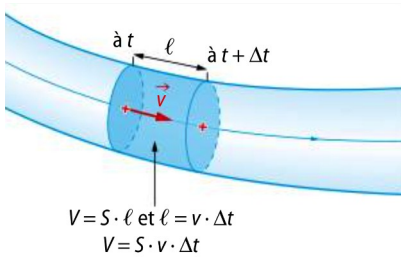
L'écoulement d'un fluide est modélisé par des **lignes de courant orientée** dans le sens de déplacement du fluide. Ces lignes représentent les **trajectoires des particules de fluide en mouvement**.

Un fluide s'écoule en **régime permanent** si la **vitesse du fluide, en tout point, est indépendante du temps**.

### 2-Débit volumique et vitesse d'un fluide incompressible :

Le **débit volumique**  $D_v$  d'un fluide représente le volume de fluide qui traverse une section  $S$  pendant une durée  $\Delta t$  :

$D_v = \frac{V}{\Delta t}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>D_v</math> : Débit volumique d'un fluide ( <math>m^3 \cdot s^{-1}</math> )</li> <li>- <math>V</math> : Volume du fluide traversant la section <math>S</math> ( <math>m^3</math> )</li> <li>- <math>\Delta t</math> : Durée (s)</li> </ul>
----------------------------	--



Si un fluide traverse à la vitesse  $\vec{v}$  la section d'aire  $S$  d'un conduit en une durée  $\Delta t$  alors le volume de fluide ayant traversé  $S$  peut s'écrire :

$$V = S \times \ell \text{ or } \ell = v \times \Delta t$$

$$\text{d'où } V = S \times v \times \Delta t$$

$$\text{or } D_v = \frac{V}{\Delta t} \iff D_v = \frac{S \times v \times \Delta t}{\Delta t} = S \times v$$

$D_v = S \times v$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>D_v</math> : Débit volumique d'un fluide ( <math>m^3 \cdot s^{-1}</math> )</li> <li>- <math>S</math> : Section <math>S</math> parcourue par le fluide ( <math>m^2</math> )</li> <li>- <math>v</math> : Vitesse du fluide ( <math>m \cdot s^{-1}</math> )</li> </ul>
--------------------	--

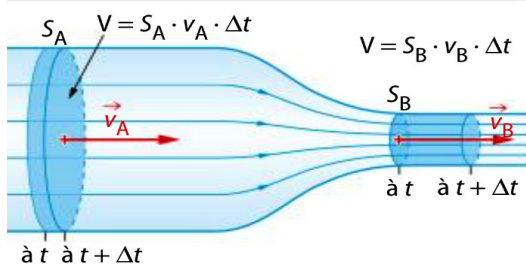
#### Exemple : Circulation du sang dans l'aorte

Située à la sortie du coeur, l'aorte est la principale et la plus grosse artère du corps. Cette artère distribue le sang oxygéné à l'organisme, par l'intermédiaire d'artères plus petites. Dans les conditions de repos, 5,0 L de sang circule par minute chez un adulte. Le sang circule dans l'aorte, de section  $2,5 \text{ cm}^2$ , à une vitesse  $v$ . Déterminer la vitesse  $v$  du sang dans l'aorte.

$$D_v = \frac{V}{\Delta t} \text{ AN} : D_v = \frac{5,0 \times 10^{-3}}{60} = 8,3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v = \frac{D_v}{S} \text{ AN} : v = \frac{8,3 \times 10^{-5}}{2,5 \times 10^{-4}} = 0,33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

### Conservation du débit volumique :



En régime permanent, il y a **conservation du débit volumique** d'un fluide incompressible le long d'un écoulement donc en tout points A et B d'un écoulement on peut écrire :

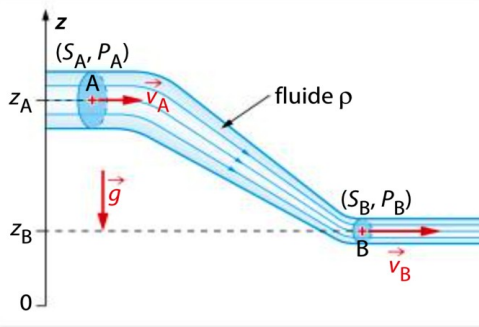
$$D_{vA} = D_{vB} \iff v_A \times S_A = v_B \times S_B$$

**La vitesse du fluide augmente lorsque la section du conduit diminue** : Si  $S_A > S_B$  alors  $v_A < v_B$  .

### III-Relation de Bernoulli et application

#### 1-Enoncé de la relation de Bernoulli :

La relation de Bernoulli traduit la conservation de l'énergie totale d'un fluide le long d'une **ligne de courant**.



$$P + \frac{1}{2} \rho \times v^2 + \rho \times g \times z = \text{constante}$$

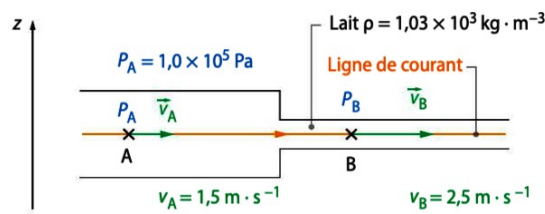
- P : Pression du fluide en un point de la ligne de courant (Pa)
- $\rho$  : Masse volumique du fluide (  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  )
- v : vitesse du fluide en un point de la ligne de courant (  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  )
- g : intensité de la pesanteur (norme du champ de pesanteur) (  $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$  )
- z : altitude du point de la ligne de courant (m)

Pour deux points A et B d'une même ligne de courant, on peut écrire :

$$P_A + \frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + \rho \times g \times z_A = P_B + \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + \rho \times g \times z_B$$

Cette relation permet d'interpréter le comportement des fluides dans de nombreux domaines : les écoulements sanguins en médecine, les mouvements de masses d'air et d'eau en géophysique ...

Exemple : Ecoulement du lait



Déterminer la pression au point B.

Appliquons la relation de Bernoulli sur la ligne de courant passant par A et B :

$$P_A + \frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + \rho \times g \times z_A = P_B + \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + \rho \times g \times z_B$$

Or  $z_A = z_B$

d'où  $P_A + \frac{1}{2} \rho \times v_A^2 = P_B + \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 \iff P_B = P_A + \frac{1}{2} \rho \times v_A^2 - \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 = P_A + \frac{1}{2} \rho \times (v_A^2 - v_B^2)$

AN :  $P_B = 1,0 \times 10^5 + \frac{1}{2} \times 1,03 \times 10^3 \times ((1,5)^2 - (2,5)^2) = 9,8 \times 10^4 \text{ Pa}$

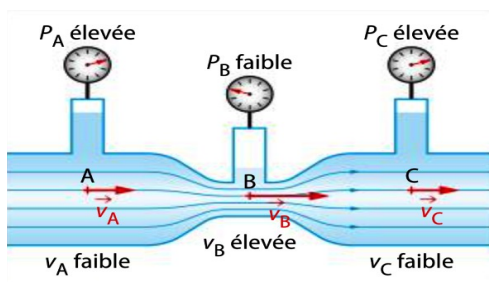
#### Remarque :

Il est possible, à partir de la relation de Bernoulli de la dynamique des fluides, de retrouver la loi fondamentale de la statique des fluides. Dans le cas de la statique, le fluide est au repos donc sa vitesse est nulle en tout point.

$$P_A + \frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + \rho \times g \times z_A = P_B + \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + \rho \times g \times z_B \text{ or } v_A = v_B = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

d'où  $P_A + \rho \times g \times z_A = P_B + \rho \times g \times z_B \iff P_A - P_B = \rho \times g \times (z_B - z_A)$

#### 2-Application : l'effet Venturi :



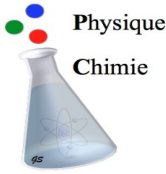
La relation de Bernoulli permet comprendre l'effet Venturi :

$$P_A + \frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + \rho \times g \times z_A = P_B + \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + \rho \times g \times z_B$$

Dans le cas d'un conduit horizontal,  $z_A = z_B$  on peut donc écrire :

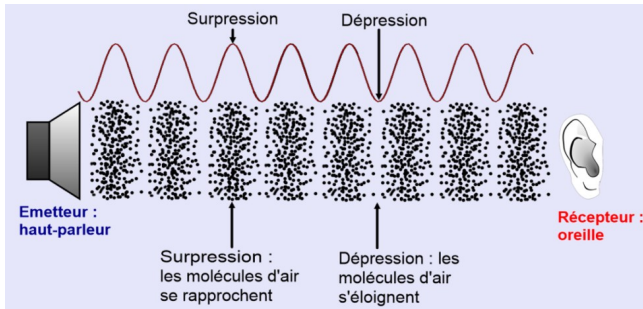
$$P_A + \frac{1}{2} \rho \times v_A^2 = P_B + \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 \iff (P_A - P_B) = \frac{1}{2} \rho \times (v_B^2 - v_A^2)$$

Pour un écoulement en régime permanent, la **pression P d'un fluide incompressible diminue lorsque sa vitesse v augmente** (et inversement) : il s'agit de l'effet Venturi.

	<b>Ondes et signaux</b>	
	<b>- Fiche C1 -</b> <b>Les ondes sonores</b>	<b>Exercices obligatoires : 16 p 360 – 19 p 360 – 21 p 361</b> <b>Exercice en plus : 29 p 365</b>

## I-Définition d'un son

- **Onde sonore :**



Un son ou **onde sonore** est produite par une vibration d'un milieu matériel.

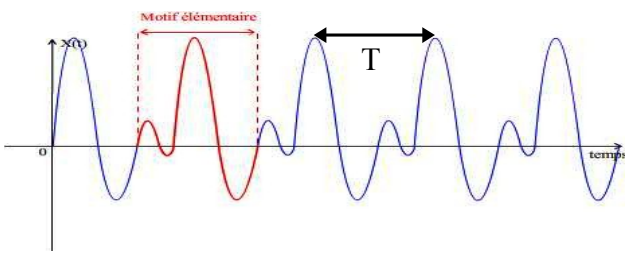
Une onde sonore se propage de proche en proche par compression puis dilatation du **milieu matériel** dans lequel elle se trouve. **Le son a donc besoin de matière pour se propager.**

**Les ondes sonores sont des ondes mécaniques progressives longitudinale à trois dimensions.**

La vitesse de propagation du son dépend du milieu matériel dans lequel l'onde sonore se propage et de la température.

**Exemples :**  $v=340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  dans l'air à 20°C et  $v=1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  dans l'eau à 20°C.

Un son est un **signal périodique sur une certaine durée**, c'est-à-dire qu'il **se reproduit identique à lui-même à intervalles de temps réguliers.**



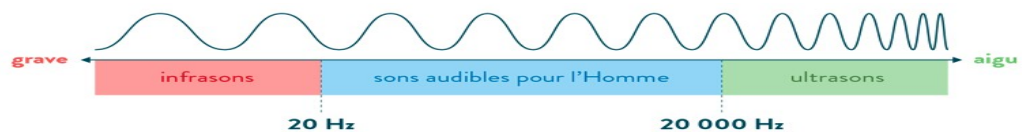
**Motif élémentaire :** C'est le motif qui se reproduit identique à lui-même sur la représentation d'un signal périodique.

**Période :** C'est la plus petite durée après laquelle le signal se reproduit identique à lui-même. Elle correspond à la durée d'un motif élémentaire. Elle se note **T** et s'exprime en **seconde (s)**.

**Fréquence :** Elle correspond au nombre de périodes du signal sonore par seconde. Elle se note **f** et s'exprime en **hertz (Hz)**.

$f = \frac{1}{T}$	-f : fréquence du signal sonore (Hz) -T : période du signal sonore (s)
-------------------	---

- **Sons audibles :**



- **Sons purs et sons complexes :**



Un **son pur** est un son dont le signal est **périodique et sinusoïdal** (cas a).



Un **son complexe** est un son dont le signal est **périodique mais non sinusoïdal** (cas b).

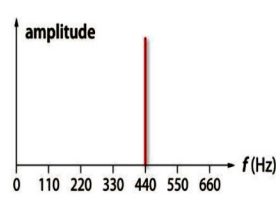
Un son complexe est périodique et peut être décomposé en une somme de sons purs appelés **harmoniques**, de fréquences :  $f_n = n f_1$  avec n un entier naturel ( $n > 0$ ). Le son pur de fréquence  $f_1$  est appelé le **fondamental** et sa fréquence est celle du son perçu.

L'ensemble formé par le **fondamental et ses harmoniques** constitue le **spectre en fréquence du son (ou spectre de Fourier)**.

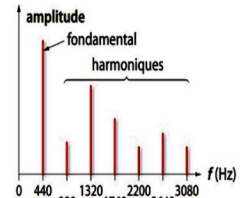
• Analyse spectrale :



L'analyse spectrale d'un son consiste à tracer ce spectre en fréquence : c'est la représentation graphique de l'amplitude relative de chaque harmonique de ce son en fonction de sa fréquence.



Spectre en fréquences d'un La<sub>3</sub> (diapason)



Spectre en fréquences d'un La<sub>3</sub> (guitare)

Exemple : spectres d'un La<sub>3</sub> joué au diapason et à la guitare.

II-Caractéristiques d'un son

1-La hauteur d'un son :

La hauteur d'un son correspond à la fréquence de ce son : plus la fréquence est élevée, plus le son est aigu ; à l'inverse, plus la fréquence est basse, plus le son est grave.

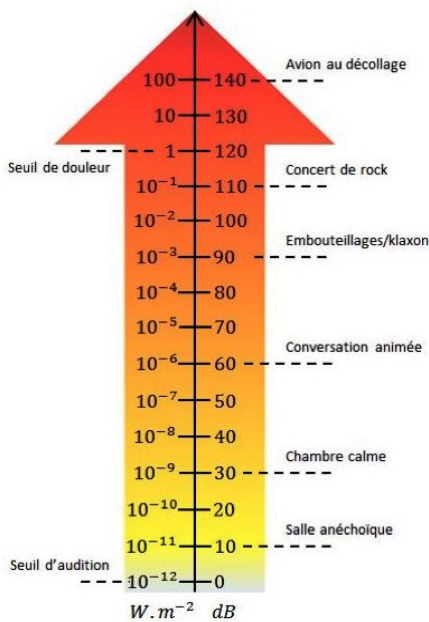
La hauteur d'un son correspond à la fréquence du fondamental du son.

2-Intensité sonore I et niveau d'intensité sonore L (ou level) :

La propagation du son s'accompagne d'une propagation d'énergie mécanique, mais pas de matière. L'énergie transmise par unité de surface et par unité de temps s'appelle l'intensité de l'onde sonore. Cette énergie se répartit uniformément sur des fronts d'ondes qui sont les surfaces dont les points sont tous dans le même état vibratoire.

L'intensité d'un son caractérise le son en lui-même, indépendamment de la sensibilité auditive et s'exprime par :

$I = \frac{P}{S}$	P : Puissance (W) S : Surface d'ondes ( m <sup>2</sup> ) I : Intensité sonore ( W . m <sup>-2</sup> )
-------------------	---



La sensation auditive dépend de l'intensité sonore I : le domaine d'intensité sonore perceptible par l'oreille humaine s'étend de I<sub>0</sub> = 1,0 × 10<sup>-12</sup> W . m<sup>-2</sup> (seuil d'audibilité) à 25 W . m<sup>-2</sup> (seuil de douleur au delà de 1 W . m<sup>-2</sup> ).

Le niveau d'intensité sonore s'exprime par :

$L = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right)$	I : Intensité sonore ( W . m <sup>-2</sup> ) L : Niveau sonore en décibel (dB) I <sub>0</sub> = 1,0 × 10 <sup>-12</sup> W . m <sup>-2</sup> Intensité sonore de référence
--	---

La mesure du niveau sonore L s'effectue avec un **sonomètre**.



Lorsque plusieurs sons s'ajoutent, les intensités sonores I dues à chaque son s'ajoutent mais les niveaux sonores L ne s'ajoutent pas.

Exemple : Concert de musique

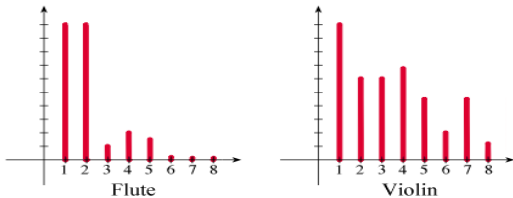
On considère 4 instruments qui émettent, chacun seul, une note de niveau d'intensité sonore L = 60 dB. Quel sera le niveau d'intensité sonore si les 4 instruments jouent ensemble lors d'un concert ?

$$L = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \Leftrightarrow \frac{L}{10} = \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \Leftrightarrow 10^{L/10} = \frac{I}{I_0} \Leftrightarrow I = I_0 \times 10^{L/10}$$

AN :  $I = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{60/10} = 1,0 \times 10^{-6} \text{ W . m}^{-2}$

$$L_{\text{concert}} = 10 \log \left( \frac{I_{\text{concert}}}{I_0} \right) \Leftrightarrow L_{\text{concert}} = 10 \log \left( \frac{4 \times I}{I_0} \right) \text{ AN : } L_{\text{concert}} = 10 \log \left( \frac{4 \times 1,0 \times 10^{-6}}{1,0 \times 10^{-12}} \right) = 66 \text{ dB}$$

### 3- Le timbre d'un son :



Adapted from James Stewart, *Essential Calculus: Early Transcendentals*

Le **timbre d'un son** correspond au nombre, à la position et à l'amplitude relative des harmoniques présents dans son spectre, donc à sa **composition spectrale**.

Exemple : Même note jouée par une flûte ou un violon

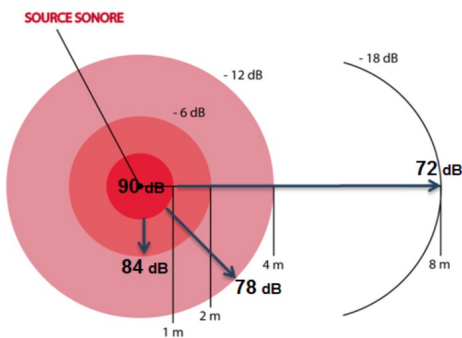
## III-Atténuation sonore

### 1-L'atténuation géométrique :

Lorsqu'une onde sonore se propage dans toutes les directions à partir d'une source ponctuelle, la puissance transportée par l'onde se répartit sur une sphère de plus en plus grande dont le rayon  $r$  est la distance à la source. **Cette puissance reste constante quelque soit la distance, elle ne dépend que de la source.**

L'intensité sonore  $I$  en un point de cette sphère est alors :

$I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi \times r^2}$	<p><math>P</math> : puissance (W)  <math>S = 4\pi \times r^2</math> : surface de la sphère de rayon <math>r</math> ( <math>m^2</math> )  <math>I</math> : intensité sonore ( <math>W \cdot m^{-2}</math> )</p>
---	--



L'**atténuation géométrique A**, en dB, est la diminution du niveau d'intensité sonore  $L$  lorsque la distance  $d$  à la source augmente :

$$A = L_{\text{proche}} - L_{\text{éloigné}}$$

$$A = 10 \log \left( \frac{I_{\text{proche}}}{I_0} \right) - 10 \log \left( \frac{I_{\text{éloigné}}}{I_0} \right) = 10 \log \left( \frac{I_{\text{proche}}}{I_{\text{éloigné}}} \right) > 0$$

Exemple : Lorsque la distance à la source est multipliée par 2, le niveau d'intensité sonore est atténué de 6 dB (  $A = 6 \text{ dB}$  ).

$$A = L_{\text{proche}} - L_{\text{éloigné}} \Leftrightarrow A = 10 \log \left( \frac{I_{\text{proche}}}{I_0} \right) - 10 \log \left( \frac{I_{\text{éloigné}}}{I_0} \right) \Leftrightarrow A = 10 \log \left( \frac{I_{\text{proche}}}{I_{\text{éloigné}}} \right) \Leftrightarrow A = 10 \log \left( \frac{\frac{P}{S_{\text{proche}}}}{\frac{P}{S_{\text{éloigné}}}} \right)$$

Or la puissance  $P$  est la même car elle ne dépend que de la source (qui est la même).

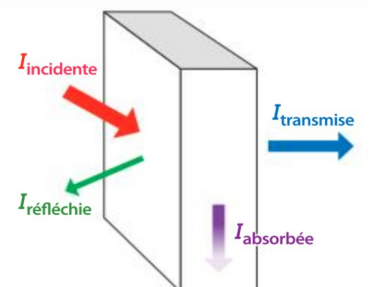
$$D'où A = 10 \log \left( \frac{S_{\text{éloigné}}}{S_{\text{proche}}} \right) \Leftrightarrow A = 10 \log \left( \frac{4\pi r_{\text{éloigné}}^2}{4\pi r_{\text{proche}}^2} \right) \text{ or } r_{\text{éloigné}} = 2 r_{\text{proche}} \Leftrightarrow A = 10 \log \left( \frac{(2 r_{\text{proche}})^2}{r_{\text{proche}}^2} \right)$$

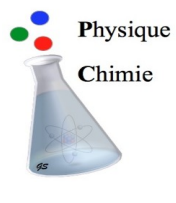
Soit  $A = 10 \log(4) = 6 \text{ dB}$

### 2-L'atténuation par absorption :

Lorsqu'une onde sonore rencontre une paroi, elle peut être transmise, réfléchiée ou absorbée. L'**atténuation par absorption**, en dB, évalue l'efficacité d'un matériau ou milieu matériel à lutter contre la transmission du bruit :

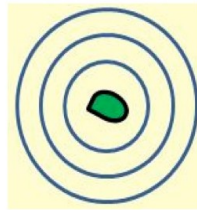
$$A = L_{\text{incident}} - L_{\text{transmis}} \Leftrightarrow A = 10 \log \left( \frac{I_{\text{incident}}}{I_{\text{transmis}}} \right) > 0$$



 Physique Chimie	<b>Ondes et signaux</b>	
	<b>- Fiche C2 - L'effet Doppler</b>	<b>Exercices obligatoires : 22 p 361 – 26 p 363</b> <b>Exercices en plus : 12 p 359 – 28 p 364</b>

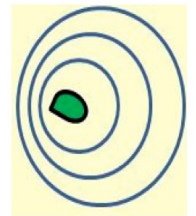
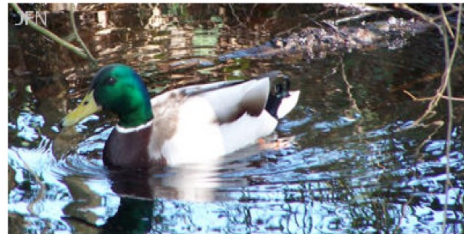
## I-Manifestation de l'effet Doppler

Le son d'une sirène d'un camion de pompier ou d'une voiture de police est **perçu plus aigu quand le véhicule qu'il l'émet s'approche d'un observateur immobile**, et **plus grave quand il s'en éloigne**. Ce phénomène a été prévu théoriquement par Christian Doppler en 1842 puis confirmé expérimentalement quelques années plus tard.



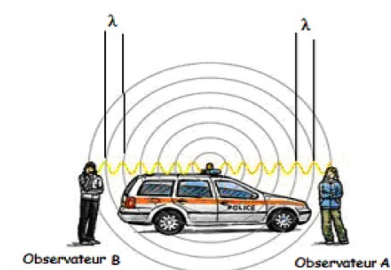
On peut également illustrer l'effet Doppler sur l'exemple d'ondes à la surface de l'eau. Observons la photo d'un canard sur un plan d'eau calme. Quand le canard est immobile, les ondes créées à la surface de l'eau ont toutes la même longueur d'onde quelque soit la direction.

Lorsque le canard se déplace de droite à gauche, pour un observateur situé devant lui à gauche, la longueur d'onde observée est plus courte que pour un observateur situé derrière lui à droite. Or  $\lambda = \frac{v}{f}$  donc la **fréquence**

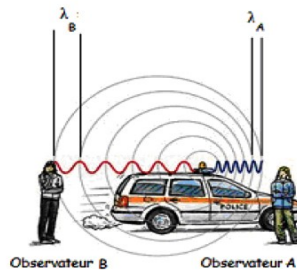


$f = \frac{v}{\lambda}$  est **plus grande** pour l'**observateur de gauche**

**dont le canard s'approche** que pour l'observateur de droite dont le canard s'éloigne. On retrouve bien le même résultat que pour la sirène.



l'émetteur est immobile : les observateurs immobiles A et B perçoivent des ondes de même longueur d'onde  $\lambda = v / f_E$



l'émetteur se déplace à la vitesse  $v_E$  en s'approchant de l'observateur A et en s'éloignant de l'observateur B: ceux-ci perçoivent des ondes de longueur d'onde  $\lambda_A < \lambda$  et  $\lambda_B > \lambda$

Une onde émise avec une fréquence  $f_E$  est perçue avec une fréquence  $f_R$  différente lorsque l'émetteur et le récepteur sont en mouvement relatif : c'est l'effet Doppler.

## II-Décalage Doppler

### 1-Définition

Le décalage Doppler est défini par :

$\Delta f = f_R - f_E$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>f_R</math> : Fréquence de l'onde perçue par l'observateur (Hz)</li> <li>- <math>f_E</math> : Fréquence de l'onde émise par l'émetteur (Hz)</li> <li>- <math>\Delta f</math> : Décalage Doppler (Hz)</li> </ul>
------------------------	---

-Si l'émetteur et le récepteur se rapprochent,  $f_R > f_E$  et  $\Delta f = f_R - f_E > 0$  .

-Si l'émetteur et le récepteur s'éloignent,  $f_R < f_E$  et  $\Delta f = f_R - f_E < 0$  .

-Si l'émetteur et le récepteur restent immobiles l'un par rapport à l'autre,  $f_R = f_E$  et  $\Delta f = 0$  : il n'y alors pas d'effet Doppler.

## 2-Expression du décalage Doppler

On note :

- $f_E$  et  $T_E$  la fréquence et la période de l'onde émise par l'émetteur E ;
- $f_R$  et  $T_R$  la fréquence et la période de l'onde reçue par le récepteur R ;
- $v$  la célérité de propagation de l'onde;
- $v_E$  la vitesse de déplacement de l'émetteur E.

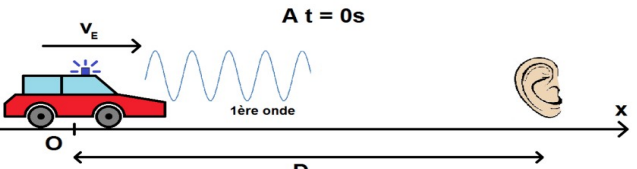
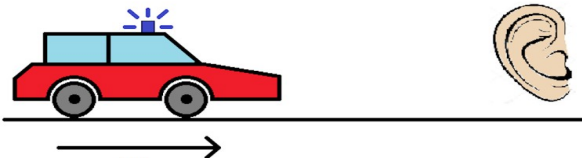
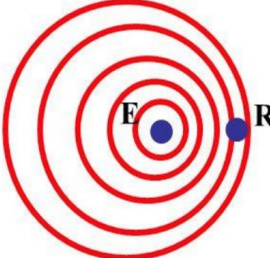
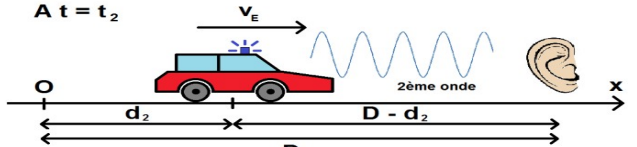
L'approximation suivante est vérifiée :  $v_E \ll v$ .



**Démonstration :**  
Cas de l'éloignement



On s'intéresse au cas où l'émetteur se rapproche d'un récepteur immobile :

Démonstration 1	Démonstration 2
 <p>A <math>t = 0s</math></p>	
<p>A la date <math>t_0 = 0s</math>, E est situé à la distance D de R et émet une première onde.</p>	$f_R > f_E \iff \frac{v}{\lambda_R} > \frac{v}{\lambda_E} \iff \frac{1}{\lambda_R} > \frac{1}{\lambda_E} \iff \lambda_R < \lambda_E$
<p>Soit <math>\Delta t = t_1 - t_0 = t_1</math> la durée mise par l'onde pour parcourir la distance D.</p>	
<p>L'onde est reçue par R à la date <math>t_1</math> : <math>t_1 = \frac{D}{v}</math>.</p>	<p>L'émetteur E se rapprochant du récepteur immobile à la vitesse <math>v_E</math>, la longueur d'onde reçue <math>\lambda_R</math> est diminuée de la distance parcourue par l'émetteur pendant la durée d'une période temporelle <math>T_E</math> :</p>
<p>Pendant ce temps l'émetteur avance vers le récepteur.</p>	$\lambda_R = \lambda_E - v_E \times T_E$
 <p>A <math>t = t_2</math></p>	$\lambda_R = \lambda_E - v_E \times T_E \iff \frac{v}{f_R} = \frac{v}{f_E} - v_E \times \frac{1}{f_E}$
<p>A la date <math>t_2 = T_E</math>, l'émetteur émet une deuxième onde et a avancé d'une distance <math>d_2</math> pendant la durée d'une période <math>T_E</math> : <math>d_2 = v_E \times T_E</math>.</p>	$\frac{v}{f_R} = \frac{v - v_E}{f_E} \iff \frac{f_E}{f_R} = \frac{v - v_E}{v} \iff \frac{f_R}{f_E} = \frac{v}{v - v_E}$
<p>Soit <math>\Delta t' = t_3 - t_2</math> la durée mise par l'onde pour parcourir la distance <math>D - d_2</math>.</p>	<p>On a donc <math>f_R = f_E \times \left( \frac{v}{v - v_E} \right)</math>.</p>
<p>La deuxième onde est reçue par R à la date <math>t_3</math> :</p>	<p><b>Décalage Doppler</b></p>
$t_3 = t_2 + \Delta t' = T_E + \frac{D - d_2}{v}$	$\Delta f = f_R - f_E = f_E \left( \frac{v}{v - v_E} - 1 \right) = f_E \left( \frac{v_E}{v - v_E} \right)$
$t_3 = T_E + \frac{v \times t_1 - v_E \times T_E}{v} = T_E + t_1 - \frac{v_E}{v} \times T_E$	
<p>La durée séparant deux signaux consécutifs captés par R est la période <math>T_R</math> de l'onde reçue : <math>T_R = t_3 - t_1</math></p>	
$T_R = T_E + t_1 - \frac{v_E}{v} \times T_E - t_1 = T_E \left( 1 - \frac{v_E}{v} \right)$	
$\frac{1}{f_R} = \frac{1}{f_E} \times \left( 1 - \frac{v_E}{v} \right) \text{ donc } f_R = f_E \times \left( \frac{v}{v - v_E} \right)$	

On peut aussi en déduire l'expression de la vitesse de déplacement de l'émetteur :

$$v_E = v \times \left(1 - \frac{f_E}{f_R}\right) = v \times \left(\frac{f_R - f_E}{f_R}\right)$$

La valeur de la vitesse  $v_E$  d'un émetteur E se rapprochant d'un récepteur immobile R peut donc être calculée par effet Doppler par comparaison entre la fréquence  $f_R$  de l'onde perçue et la fréquence  $f_E$  de l'onde émise. **L'effet Doppler constitue donc une méthode de mesure de vitesses.**

**Cas général :**

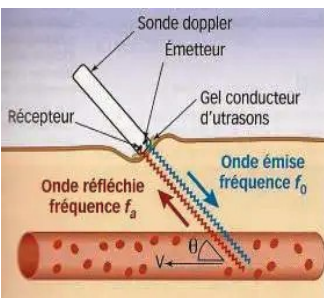
L'émetteur et le récepteur se rapprochent	L'émetteur et le récepteur s'éloignent
$f_R > f_E$ et $\Delta f = f_R - f_E = f_E \times \left(\frac{v_E}{v - v_E}\right) > 0$	$f_R < f_E$ et $\Delta f = f_R - f_E = -f_E \times \left(\frac{v_E}{v + v_E}\right) < 0$

**Remarque :**

Lorsque la valeur de la vitesse de l'émetteur est négligeable devant la célérité de l'onde :  $v - v_E \approx v + v_E \approx v$ . Le décalage Doppler se simplifie sous la forme :  $|\Delta f| = f_E \times \frac{v_E}{v}$ .

**III-Applications de l'effet Doppler**

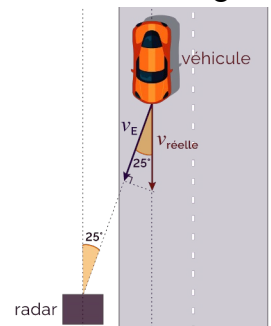
L'effet Doppler est caractéristique des ondes. Il se manifeste avec des ondes mécaniques ou électromagnétiques comme la lumière.



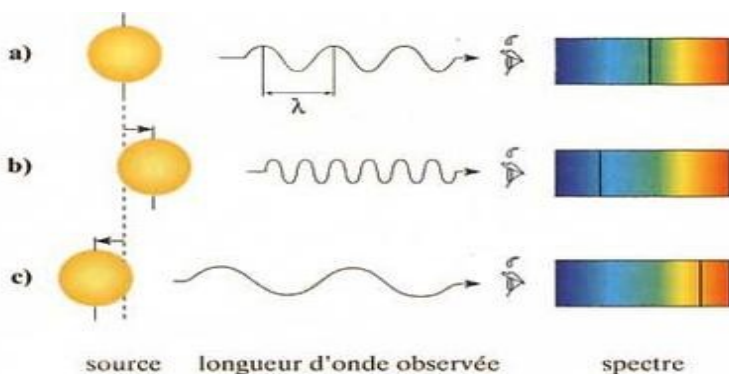
-En **médecine**, le Doppler sanguin permet de mesurer la valeur de la vitesse du sang.

$$v = \frac{\Delta f \times v_{\text{ultrason}}}{2 \times f_0 \times \cos(\theta)}$$

-Dans la **vie courante**, les radars routiers utilisent les ondes électromagnétiques pour mesurer la valeur de la vitesse des véhicules.

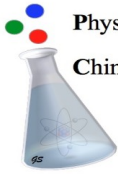


$$v_E = \frac{\Delta f \times c}{2 \times f_0} = v \times \cos(\theta) \iff v = \frac{\Delta f \times c}{2 \times f_0 \times \cos(\theta)}$$



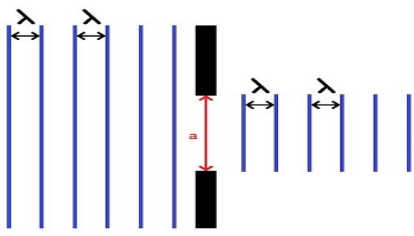
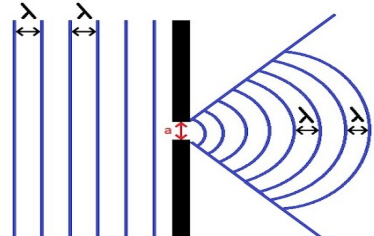
-En **astrophysique**, l'effet Doppler a permis de découvrir que l'Univers est en expansion. Il est utilisé pour mesurer la vitesse radiale des étoiles et détecter des exoplanètes. En astrophysique, c'est le décalage Doppler en longueur d'onde qui est utilisé. On parle d'effet Doppler-Fizeau (détails voir QR-code ci-contre).



 Physique Chimie	<b>Ondes et signaux</b>	
	<b>- Fiche C3 - La diffraction</b>	<b>Exercices obligatoire : 7 p 378 – 20 p 380 – 21 p 381</b> <b>Exercice en plus : 29 p 384</b>

## I-Phénomène de diffraction

La **diffraction** est **une modification de la direction de propagation d'une onde**. Elle se manifeste en particulier dans le cas d'ondes progressives sinusoïdales rencontrant **une ouverture ou un obstacle du même ordre de grandeur que la longueur d'onde  $\lambda$** .

	
Si la largeur $a$ de la fente est grande par rapport à la longueur d'onde $\lambda$ ( $a \gg \lambda$ ) alors l'onde est simplement <b>diaphragmée</b> par la fente.	Si la largeur $a$ de la fente est inférieure ou égale à la longueur d'onde $\lambda$ ( $a \leq \lambda$ ) alors l'onde est <b>diffractée</b> par la fente.



Une onde **diffractée** est déformée, mais **sa longueur d'onde  $\lambda$  et sa fréquence  $f$  ne sont pas modifiées**.

Le phénomène de diffraction intervient dans un grand nombre d'applications scientifiques : DVD, Blue-ray, astronomie, cristallographie.



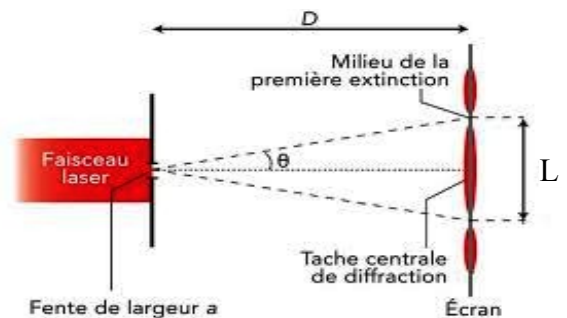
**Animation :**  
PHET Ondes-Diffraction

## II-Diffraction par une ouverture

### 1-Diffraction par une ouverture rectangulaire (fente) :

En réalisant le montage ci-contre, la figure de diffraction obtenue sur l'écran est constituée d'une série de tâches lumineuses :

- une **tâche centrale** large située à l'emplacement de l'impact du faisceau laser en l'absence de fente ;
- des **tâches secondaires** deux fois plus étroites et moins lumineuses, symétriques de part et d'autre de la tâche centrale.



L'**angle caractéristique de diffraction  $\theta$**  ou **écart angulaire** entre le milieu de la tâche centrale et la première extinction peut s'obtenir grâce à :

$\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a}$ Si $\theta$ est petit alors $\sin(\theta) \approx \theta$	- $\lambda$ : Longueur d'onde de la lumière monochromatique (m) - $a$ : Largeur de la fente (m) - $\theta$ : écart angulaire en radian (rad)
--	--

### Largeur de la tâche centrale de diffraction :



$\tan(\theta) = \frac{L}{2D}$  et  $\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a}$  or dans l'approximation des petits angles  $\tan(\theta) \approx \theta$  et  $\sin(\theta) \approx \theta$

$$D'où \theta = \frac{L}{2D} \text{ et } \theta = \frac{\lambda}{a} \Leftrightarrow \frac{L}{2D} = \frac{\lambda}{a} \Leftrightarrow \boxed{L = \frac{2\lambda D}{a}}$$

La représentation graphique de **L (ou  $\theta$ ) en fonction de l'inverse de  $a$  est une droite passant par l'origine**.

## Facteurs d'influence :



Animation : Ostralo -  
Diffraction

- Influence de la largeur de la fente :

Si l'on utilise une fente plus fine, les tâches sont plus larges ; inversement, si l'on élargit la fente, les tâches se resserrent et finissent par disparaître : seul l'impact initial subsiste car l'onde est alors seulement diaphragmée ( $a \gg \lambda$ ).

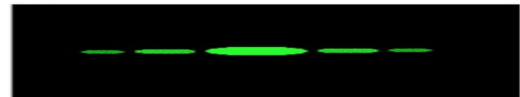
Exemples : Fente de largeur  $a$  (à gauche) et fente de largeur  $a/2$  (à droite)



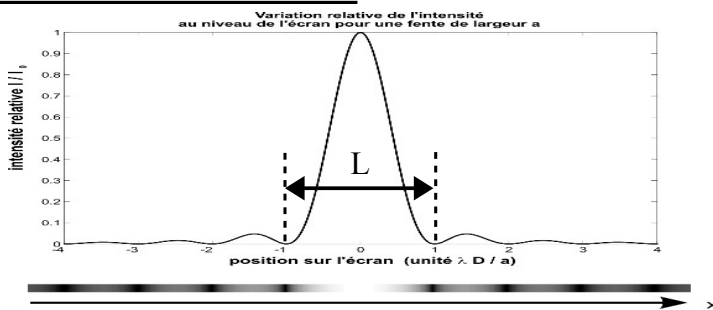
- Influence de la source laser (longueur d'onde) :

Si l'on diminue la longueur d'onde  $\lambda$  de la source de lumière monochromatique, la largeur des tâches diminue.

Exemples : Pour une même largeur de fente : laser rouge (à gauche) et laser vert (à droite)



## Profil d'intensité lumineuse :

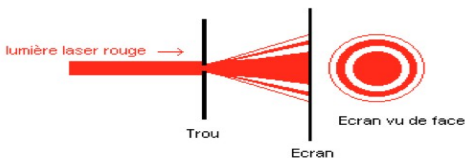


Il est possible à partir d'un profil d'intensité lumineuse de déterminer la largeur de la tâche centrale de diffraction (voir graphique ci-contre).



**Le profil d'intensité peut être donné en fonction de l'angle  $\theta$  ... il faut donc être attentif à la grandeur en abscisse !**

## 2-Diffraction par une ouverture circulaire (trou) :



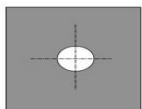
Dans le cas d'une ouverture circulaire, l'angle caractéristique de diffraction  $\theta$  peut s'obtenir grâce à :

$$\sin(\theta) = 1,22 \times \frac{\lambda}{d} \quad \text{avec } d \text{ le diamètre de l'ouverture circulaire (m)}$$

## 3-Théorème de Babinet ou théorème des ouvertures complémentaires :

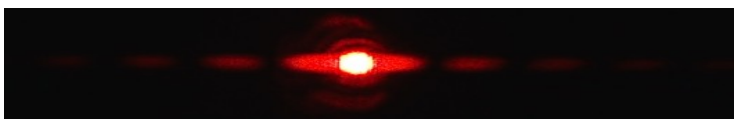


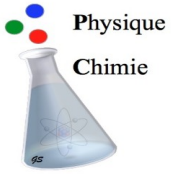
Des ouvertures sont dites complémentaires si la partie ouverte de l'une des ouvertures épouse parfaitement la partie fermée de l'autre ouverture. Ainsi un cheveu d'épaisseur  $L$  est l'ouverture complémentaire d'une fente de même ouverture  $L$ .



**Théorème de Babinet : En dehors de l'image géométrique (au centre), les figures de diffraction données pour deux ouvertures complémentaires sont identiques.**

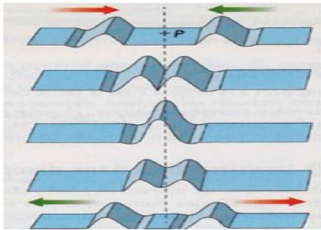
Exemple : Figure de diffraction obtenue par un fil



	<b>Ondes et signaux</b>	
	<b>- Fiche C4 - Les interférences</b>	<b>Exercices obligatoires : 14 p 379 – 16 p 379 – 18 p 380 – 26 p 383 – 28 p 383</b> <b>Exercice en plus : 23 p 381</b>

## I-Phénomène d'interférences

### 1-Principe de superposition de deux ondes :



Un point P se trouvant simultanément sur le passage de deux ondes qui se croisent, se déplace sous l'effet des deux perturbations : le mouvement résultant du point P est la « somme » des deux perturbations. Après le croisement, les deux perturbations continuent à se propager, sans qu'aucune de leurs caractéristiques (célérité, fréquence, longueur d'onde, etc.) ne soient modifiées. Au point P, on parle du principe de « **superposition des vibrations** ».

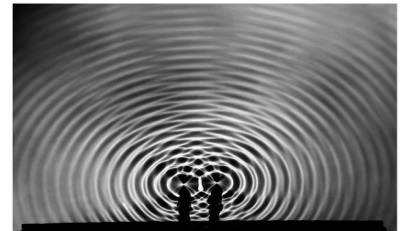
### 2-Conditions d'interférences :

Lorsque deux ondes sinusoïdales de même fréquence se superposent en un point M, l'élongation résultante est la **somme algébrique** des élongations des deux ondes en ce point.

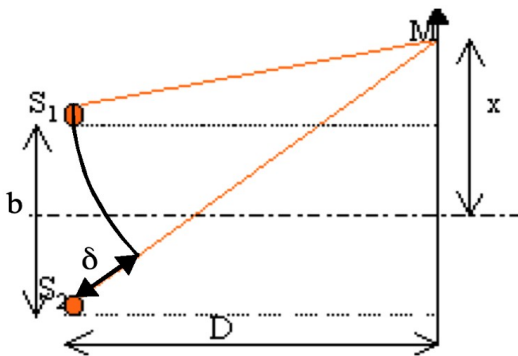
Ces deux ondes **interfèrent** au point M si :

- Elles ont **la même fréquence** et sont donc issues de sources **synchrones**.
- Elles ont **un déphasage constant** et sont donc issues de sources **cohérentes**.

Une source de vibration est dite cohérente si elle émet des ondes sinusoïdales synchrones (de même fréquence) et si sa phase  $\phi$  est constant dans le temps.



### 3-Différence de marche :



Deux vibrations sinusoïdales, issues de deux sources  $S_1$  et  $S_2$  cohérentes, interfèrent en un point M d'un milieu.

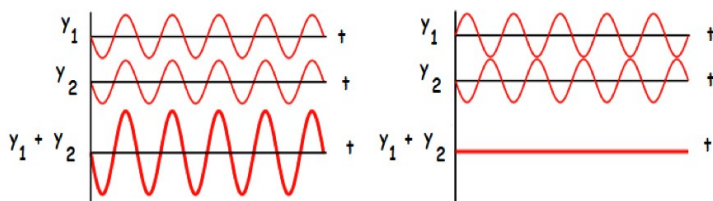
**La différence de marche  $\delta$  en un point M d'un milieu**, soumis aux vibrations émises par deux  $S_1$  et  $S_2$  cohérentes, est la différence entre les distances entre chacune des sources et le point M :

$$\delta = S_2 M - S_1 M$$

Les deux sources étant très proches, on pourra assimiler l'intersection du cercle avec le projeté orthogonal.

### 4-Interférences constructives et destructives :

Deux ondes de même longueur d'onde, issues de deux sources ponctuelles en phase, se propagent dans un milieu homogène, peuvent se superposer en donnant des interférences constructives ou destructives.



**Interférences constructives**

Ondes en phases : les amplitudes des ondes s'additionnent pour une amplitude maximale

**Interférences destructives**

Ondes en opposition de phase : les amplitudes des deux ondes s'annulent.

On observe des **interférences constructives** quand :  $\delta = k \times \lambda$

On observe des **interférences destructives** quand :  $\delta = (2k+1) \times \frac{\lambda}{2}$

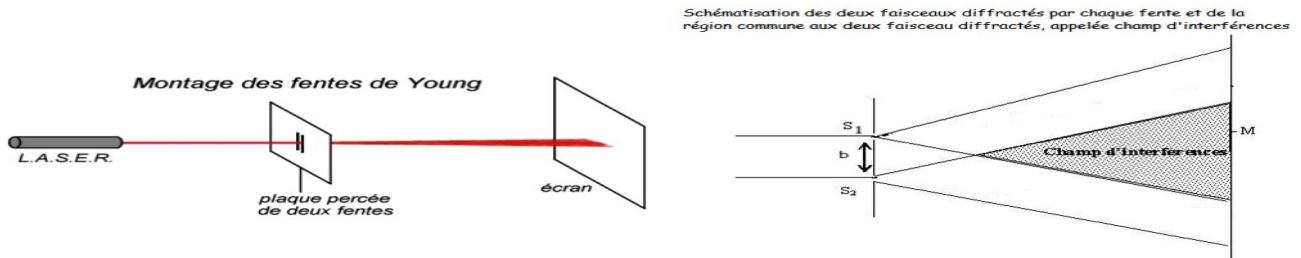
Le nombre  $k$  est appelé **ordre d'interférences** et est un entier relatif  $k \in \mathbb{Z}$ .

## II-Interférences lumineuses

Pour observer des interférences lumineuses, il faut éclairer deux trous (ou deux fentes) avec une source lumineuse monochromatique (source cohérente primaire) afin d'obtenir deux sources cohérentes secondaires : on utilise le **dispositif des fentes d'Young**.

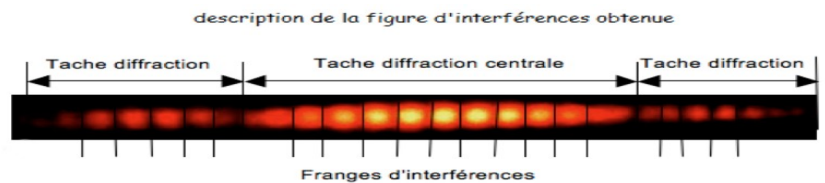
### 1-Observations expérimentales :

Un écran d'observation est placé perpendiculairement au faisceau laser à une distance  $D$  des deux fentes séparées par une distance  $b$  de l'ordre du millimètre.



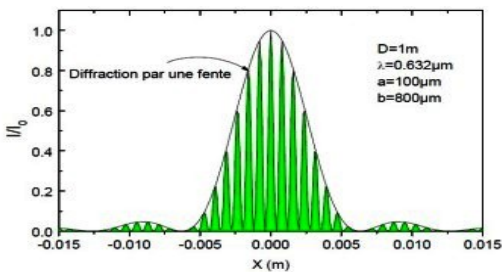
Dans la zone commune aux deux faisceaux diffractés, des **franges d'interférences** apparaissent :

- alternativement brillantes et sombres ;
- rectilignes, parallèles aux fentes ;
- équidistantes.



Des ondes lumineuses cohérentes (même fréquence et déphasage constant), issues ici de  $S_1$  et  $S_2$  peuvent interférer : la lumière peut s'ajouter à la lumière pour donner soit un éclaircissement maximal soit l'obscurité. **Le phénomène d'interférence permet, comme le phénomène de diffraction, de mettre en évidence l'aspect ondulatoire de la lumière.**

### Profil d'intensité lumineuse :



Chaque fente du système des fentes d'Young peut diffracter la lumière, ce qui donne un aspect particulier au profil d'intensité lumineuse.

**Le phénomène d'interférence est modulé par le phénomène de diffraction.**

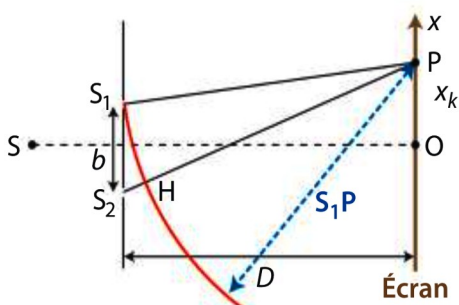
Il est alors possible de déterminer :

- La largeur «  $a$  » des fentes grâce au phénomène de diffraction ;
- L'écartement «  $b$  » des fentes grâce au phénomène d'interférence.

### 2-Franches sombres et brillantes :

- **Différence de chemin optique :**

On définit la **différence de chemin optique**  $\Delta L$  entre deux ondes lumineuses se propageant **dans un milieu, d'indice  $n$** , par :



$$\Delta L = n \delta = n \frac{bx}{D}$$

$$\delta = S_2P - S_1P = \frac{bx}{D}$$

- $\Delta L$  : Différence de chemin optique (m)
- $n$  : Indice de réfraction du milieu
- $\delta$  : Différence de marche (m)
- $b$  : Ecartement des fentes (m)
- $D$  : Distance fente d'Young-Ecran (m)
- $x$  : Position sur l'écran (m)



Démonstrations des expressions de la différence de chemin optique et de la différence de marche



Une onde de longueur d'onde  $\lambda_0$  dans le vide a une longueur d'onde  $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$  dans un milieu d'indice  $n$ . Dans l'air  $n=1,00$  donc  $\lambda = \lambda_0$ .

• **Interférences constructives et destructives :**



Les franges brillantes correspondent à des lieux d'interférences constructives donc  $\delta = k\lambda$  :

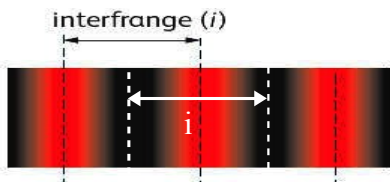
$$\Delta L = n\delta = n \frac{bx}{D} = nk\lambda = k\lambda_0 \iff x = k \frac{\lambda D}{b} = k \frac{\lambda_0 D}{nb} \quad \text{: Position du milieu des franges brillantes}$$



Les franges sombres correspondent à des lieux d'interférences destructives donc  $\delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$  :

$$\Delta L = n\delta = n \frac{bx}{D} = n(2k+1)\frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda_0}{2} \iff x = (2k+1)\frac{\lambda D}{2b} = (2k+1)\frac{\lambda_0 D}{2nb} \quad \text{: Position du milieu des franges sombres}$$

3-**Interfrange :**



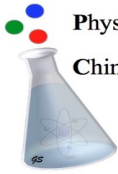
On appelle **interfrange**, noté  $i$ , la distance séparant les milieux de deux franges brillantes consécutives ou de deux franges sombres consécutives. C'est donc la **distance entre deux franges consécutives de même nature**.

Deux franges brillantes consécutives (k et k+1)	Deux franges sombres consécutives (k et k+1)
$i = x_{k+1} - x_k \iff i = (k+1)\frac{\lambda D}{b} - k\frac{\lambda D}{b}$ On a donc : $i = \frac{\lambda D}{b}$	$i = x_{k+1} - x_k \iff i = (2(k+1)+1)\frac{\lambda D}{2b} - (2k+1)\frac{\lambda D}{2b}$ On a donc : $i = \frac{\lambda D}{b}$

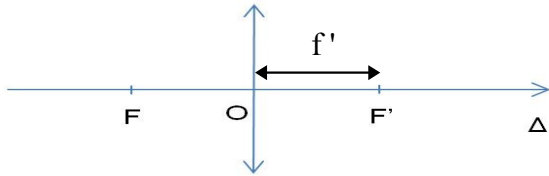
$i = \frac{\lambda D}{b} = \frac{\lambda_0 D}{bn}$	-i : Interfrange (m) - $\lambda$ : Longueur d'onde de la lumière monochromatique dans le milieu (m) - $\lambda_0$ : Longueur d'onde de la lumière monochromatique dans le vide (m) -n : Indice de réfraction du milieu -D : Distance fente d'Young-Ecran (m) -b : Ecartement de fente d'Young (m)
--	--



Animation : Ostralo - Interférences

 Physique Chimie	<b>Ondes et signaux</b>	
	<b>- Fiche C5 - Bases d'optique géométrique</b>	<b>Exercice obligatoire : Microscope</b>

## I- Caractéristiques d'une lentille mince convergente



Une lentille mince convergente peut être modélisée par :

- Un centre optique **O**
- Un foyer principal objet **F**
- Un foyer principal image **F'**

Les foyers **F** et **F'** se situent sur l'**axe optique** ( $\Delta$ ) de la lentille et sont **symétriques l'un de l'autre par rapport au centre optique O**.

La distance entre **O** et **F'** est caractéristique de chaque lentille : c'est la **distance focale** notée  **$f'$** , elle s'exprime en **mètre (m)**. L'inverse de la distance focale est appelée **vergence** notée  **$V$** , elle s'exprime en **dioptrie ( $\delta$ )**.

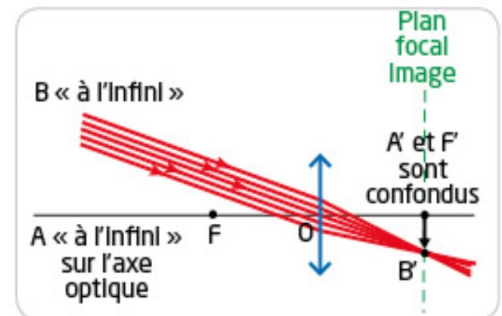
$V = \frac{1}{f'}$	- $V$ : Vergence de la lentille mince convergente ( $\delta$ ) - $f'$ : Distance focale de la lentille mince convergente (m)
--------------------	---

## II- Construction de l'image d'un objet donnée par une lentille mince convergente

### 1-Objet situé à l'infini :

Lorsqu'un objet se situe très loin de la lentille, les rayons incidents issus d'un point objet **B** arrivent sur la lentille parallèles entre eux. Ils se coupent, à la sortie de la lentille, en un point situé sur un plan perpendiculaire à l'axe optique passant par **F'** : le plan focal image.

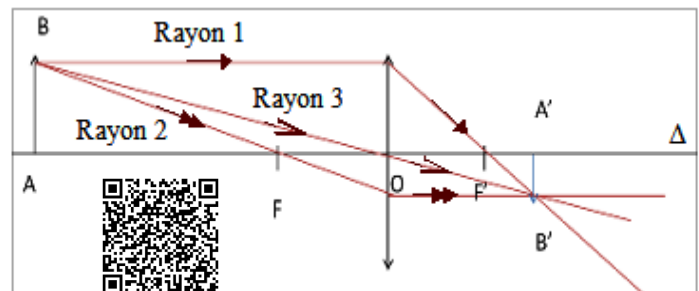
L'image d'un objet situé à l'infini se forme sur le **plan focal image** de la lentille.



### 2-Objet situé entre l'infini et le foyer principal objet F :

Une lentille mince convergente donne d'un objet **AB** perpendiculaire à l'axe optique ( $\Delta$ ) une image **A'B'** perpendiculaire à l'axe optique.

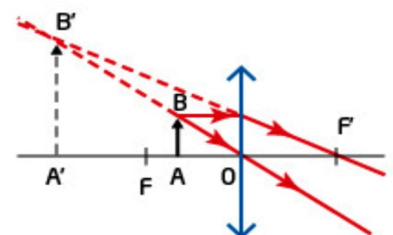
Le point image **B'** est situé à l'intersection des **trois rayons principaux** issus du point objet **B**, l'image de **A** est obtenue en abaissant la perpendiculaire sur l'axe optique à partir de **B'**.



### 3-Objet situé entre le foyer principal objet F et le centre optique de la lentille :

L'image **A'B'** se forme du même côté que l'objet, on ne peut l'observer qu'à travers la lentille.

Si on place l'objet précisément sur le foyer principal objet **F**, configuration de la loupe, l'image se forme à l'infini car les rayons sortent de la lentille parallèles entre eux.

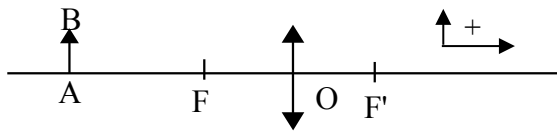


#### 4-Caractéristiques de l'image :

- **réelle** (image située du côté du foyer principal image) ou **virtuelle** (image située du côté du foyer principal objet) ;
- **droite** (image dans le même sens que l'objet) ou **renversée** (image et objet en sens inverse) ;
- **agrandie, réduite ou de même taille que l'objet.**

### III-Formules des lentilles minces convergentes

#### 1-Valeurs algébriques :



L'axe optique est orienté dans le sens de propagation de la lumière et les grandeurs sont algébriques. Sur le schéma ci-contre :

$$\overline{AB} > 0, \overline{OA} < 0, \overline{OF'} > 0, \overline{OF} < 0$$

#### 2-Relation de conjugaison :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

- $\overline{OA'}$  : Distance algébrique lentille-image (m)
- $\overline{OA}$  : Distance algébrique lentille-objet (m)
- $f'$  : Distance focale de la lentille mince convergente (m)

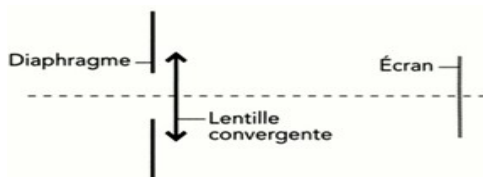
#### 3-Relation de grandissement :

$$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

- $\overline{OA'}$  : Distance algébrique lentille-image(m)
- $\overline{OA}$  : Distance algébrique lentille-objet (m)
- $\overline{A'B'}$  : Taille algébrique de l'image A'B' (m)
- $\overline{AB}$  : Taille algébrique de l'objet AB (m)

Image	Agrandie	Réduite
Renversée	Valeur de $ \gamma $ : $ \gamma  > 1$ Signe de $\gamma$ : $\gamma < 0$	Valeur de $ \gamma $ : $ \gamma  < 1$ Signe de $\gamma$ : $\gamma < 0$
Droite	Valeur de $ \gamma $ : $ \gamma  > 1$ Signe de $\gamma$ : $\gamma > 0$	Valeur de $ \gamma $ : $ \gamma  < 1$ Signe de $\gamma$ : $\gamma > 0$

### IV-L'oeil



L'oeil peut être modélisé par un système optique constitué d'une lentille convergente représentant le cristallin, d'un diaphragme représentant l'iris et par un écran représentant la rétine.

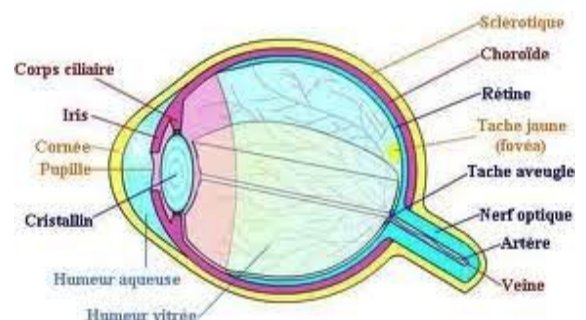
#### • La vision de loin :

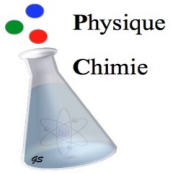
L'oeil normal voit nettement et sans effort des objets éloignés dit à l'infini.

L'image rétinienne, renversée, est perçue droite grâce au cerveau.

#### • La vision de près :

L'oeil normal voit nettement des objets proches. La distance cristallin-rétine étant invariable, ce sont les muscles ciliaires qui agissent sur le cristallin : sa courbure change ainsi sa vergence augmente afin de former l'image de l'objet sur la rétine : l'oeil accommode.



	<b>Ondes et signaux</b>	
	<b>- Fiche C6 -</b> <b>Un instrument d'optique : La lunette astronomique</b>	<b>Exercices obligatoires : 14 p 398 – 15 p 398 – 19 p 400</b> <b>Exercices en plus : 21 p 400 – 25 p 403</b>

## I-Système optique à deux lentilles minces convergentes

### 1-Objectif et oculaire :

Une lunette astronomique permet d'observer des objets lointains en créant une image agrandie de ces objets.

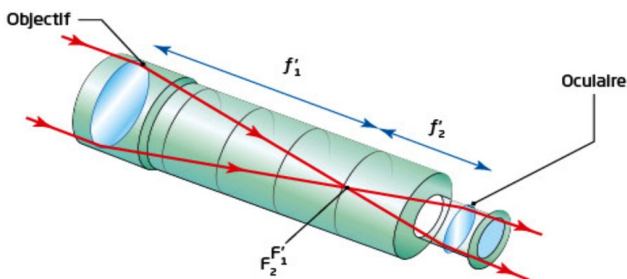
Elle est modélisée par un système optique constitué de deux lentilles minces convergentes ayant un **axe optique commun** :

- **Objectif** : lentille mince convergente  $L_1$  de distance focale  $f_1'$  située du côté de l'objet à observer. Elle joue le rôle de collecteur, son diamètre est large pour collecter un maximum de lumière et **sa distance focale est de l'ordre du mètre**.
- **Oculaire** : lentille mince convergente  $L_2$  de distance focale  $f_2'$  située du côté de l'oeil de l'observateur. Elle joue le rôle de loupe, a **distance focale est de l'ordre du centimètre**, inférieure à celle de l'objectif.

On a donc  $f'_{\text{objectif}} > f'_{\text{oculaire}}$  et  $V_{\text{objectif}} < V_{\text{oculaire}}$



### 2-Principe d'une lunette afocale :



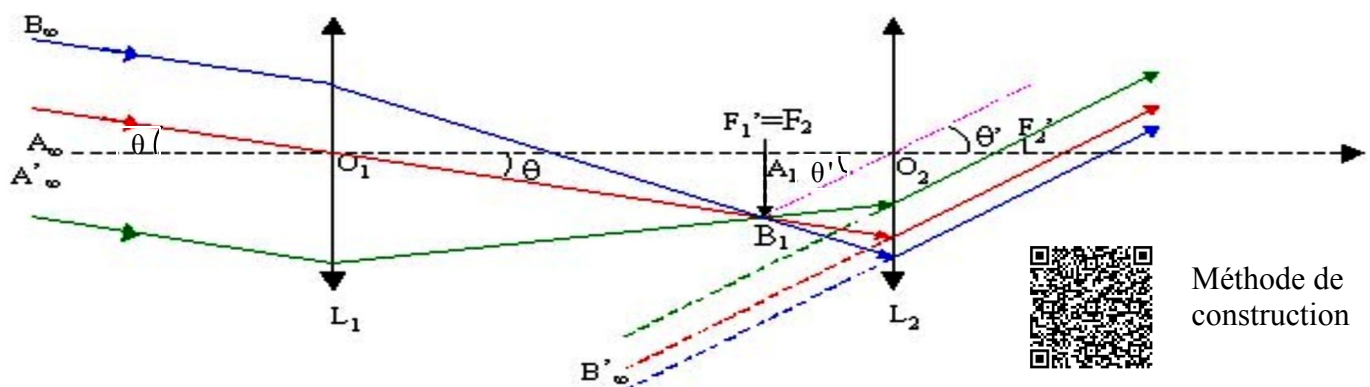
Une lunette est **afocale** si le **foyer principal image de l'objectif  $F_1'$  est confondu avec le foyer principal objet de l'oculaire  $F_2$**  .

L'objet AB à observer étant très éloigné de la lentille  $L_1$  , les rayons lumineux issus de cet objet arrivent sur la lentille  $L_1$  parallèles entre eux.

L'image  $A_1B_1$  , de l'objet AB à l'infini, se situe sur le plan focal image de l'objectif c'est-à-dire en  $F_1'$  . Cette image intermédiaire  $A_1B_1$  est alors l'objet de l'oculaire  $L_2$  .  $F_1'$  étant confondu avec  $F_2$  ,  $A_1B_1$  se situe sur le foyer principal objet de l'oculaire  $L_2$  . L'image A'B' de l'objet  $A_1B_1$  est alors à l'infini. L'image A'B' devient un objet situé à l'infini pour l'oeil, ainsi l'oeil de l'observateur est au repos, il n'accorde pas.

La longueur d'une lunette astronomique correspond à la distance entre les centres optiques de l'objectif et de l'oculaire :  $L \approx O_1O_2 = O_1F_1' + F_1'O_2 = O_1F_1' + F_2O_2 = O_1F_1' + O_2F_2' = f_1' + f_2'$  .

### 3-Schéma du modèle d'une lunette astronomique :



Méthode de construction

L'objet AB étant à l'infini, son image  $A_1B_1$  formée par l'objectif  $L_1$  se trouve dans le plan focal de  $F'_1$ .  
 $A_1B_1$  est une image renversée et réelle.

**L'image A'B' d'un objet AB à l'infini se forme elle-même à l'infini à la sortie de la lunette astronomique, le système optique est afocal.**

**Caractéristiques de l'image A'B' :**

- renversée par rapport à l'objet AB, droite par rapport à l'image intermédiaire  $A_1B_1$ .
- agrandie par rapport à l'image intermédiaire  $A_1B_1$ .
- virtuelle car elle se forme du même côté que l'image intermédiaire  $A_1B_1$ .

**II- Caractéristiques d'une lunette astronomique**

**1- Grossissement :**

Le grossissement G d'une lunette astronomique est défini par :

$G = \frac{\theta'}{\theta}$	$\theta$ : angle sous lequel est vu l'objet à l'oeil nu. $\theta'$ : angle sous lequel est vu l'image à travers la lunette astronomique. $\theta$ et $\theta'$ dans la même unité d'angle en radian (rad)
------------------------------	---



Etablissons l'expression du grossissement en fonction des distances focales de l'objectif et l'oculaire.

D'après le schéma du modèle de la lunette astronomique :

$$\tan(\theta) = \frac{A_1B_1}{O_1F'_1} = \frac{A_1B_1}{f'_1} \quad \text{et} \quad \tan(\theta') = \frac{A_1B_1}{F_2O_2} = \frac{A_1B_1}{f'_2}$$

$\theta$  et  $\theta'$  étant petits (inférieur à 0,30 rad), on peut assimiler les angles à leur tangente :  $\tan(\theta) \approx \theta$  et  $\tan(\theta') \approx \theta'$ .

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\tan(\theta')}{\tan(\theta)} = \frac{\frac{A_1B_1}{f'_2}}{\frac{A_1B_1}{f'_1}} = \frac{f'_1}{f'_2} \times \frac{A_1B_1}{A_1B_1} \quad \text{soit} \quad G = \frac{f'_1}{f'_2}$$

$G = \frac{f'_1}{f'_2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>f'_1</math> : distance focale de l'objectif (m)</li> <li>- <math>f'_2</math> : distance focale de l'oculaire (m)</li> <li>- G : Grossissement (sans unité)</li> </ul>
-------------------------	--

Pour que la lunette astronomique soit grossissante, il faut que  $G > 1$  donc  $f'_1 > f'_2$ .

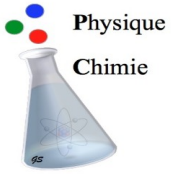
**2- Caractéristiques commerciales :**

Une lunette astronomique commerciale est caractérisée par :

- La distance focale de son objectif et de son oculaire, ce qui permet de connaître son grossissement.
- Le diamètre de son objectif, ce qui permet de connaître sa luminosité.

Dans le commerce les caractéristiques se notent : **diamètre en mm/ distance focale de l'objectif en mm.**

Exemple : LUNETTE MIZAR 70/900 => diamètre : 70 mm et distance focale : 900 mm

	<b>Ondes et signaux</b>	
	<b>- Fiche C7 -</b> <b>La lumière, un flux de photons</b>	<b>Exercices obligatoires : 8 p 416 – 15 p 418 – 18 p 419</b> <b>Exercices en plus : 17 p 419 – 20 p 420</b>

## I-Lumière et photon

Le **rayonnement** est un phénomène physique qui peut être décrit de manière **particulière** (ou **corpusculaire**) par la propagation d'un flux de **photons** ou de manière **ondulatoire** par la propagation d'une **onde électromagnétique**.

Un **photon** est une **particule** de masse nulle au repos et de charge électrique nulle, associée aux ondes électromagnétiques, **se déplaçant, dans le vide, à la vitesse de la lumière** :  $c=3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ . Chaque photon possède une **énergie (en Joule) proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique considérée**.

$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>-E : énergie du photon (J)</li> <li>- <math>\nu</math> : fréquence de l'onde électromagnétique (Hz)</li> <li>- <math>h=6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}</math> : constante de Planck</li> <li>- <math>\lambda</math> : longueur d'onde dans le vide de l'onde électromagnétique (m)</li> <li>-c : célérité de l'onde électromagnétique ( <math>\text{m.s}^{-1}</math> )</li> </ul>
----------------------------------	---

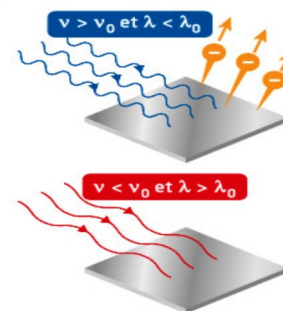
L'énergie d'un photon peut être donnée en **électron-volt (eV)** :  $1,00 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

## II-L'effet photoélectrique

### 1-Description de l'effet photoélectrique :

L'effet photoélectrique est un phénomène physique durant lequel un matériau, généralement métallique, émet des électrons lorsqu'il est exposé à la lumière (ou un rayonnement électromagnétique). Il a été interprété par H. R. HERTZ en 1887.

Ce phénomène se produit si la fréquence  $\nu$  du rayonnement électromagnétique est supérieure à une fréquence seuil notée  $\nu_0$ . Cette fréquence dépend seulement de la nature du matériau.



### 2-Intérêt historique :

L'effet photoélectrique ne peut pas être expliqué de manière satisfaisante lorsque l'on considère que la lumière est une onde, théorie acceptée avant le modèle d'Einstein en 1905.

En effet, si on considère la lumière comme une onde, en augmentant son intensité et en attendant longtemps, on devrait pouvoir fournir suffisamment d'énergie au matériau pour en libérer les électrons ; ce que contredit l'expérience.

L'interprétation d'Einstein, l'absorption d'un photon, permettait d'expliquer parfaitement toutes les caractéristiques de ce phénomène. Les photons de la source lumineuse possèdent une énergie caractéristique déterminée par la fréquence du rayonnement électromagnétique :  $E = h \nu$ .

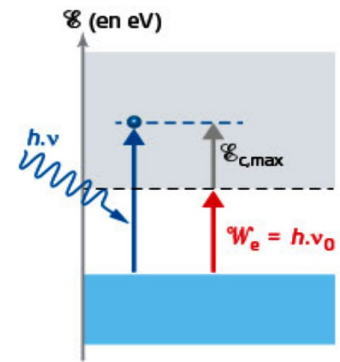
Lorsqu'un électron du matériau absorbe un photon et que l'énergie de celui-ci est suffisante, l'électron est éjecté. Augmenter l'intensité de la source lumineuse ne change pas l'énergie des photons mais seulement leur nombre, ce qui n'a donc pas d'influence sur l'effet photoélectrique.

### 3-Bilan énergétique :

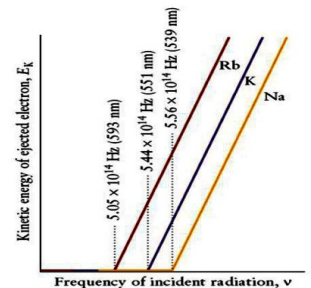
Un métal est constitué par un réseau cristallin d'ions positifs fixes entre lesquels circulent des **électrons libres** de se déplacer à l'intérieur de ce réseau. Pour extraire un électron, il faut lui fournir une énergie  $W_e$ , appelée **travail d'extraction**.

Lors de l'interaction photon-électron, trois cas sont envisageables :

- L'énergie du photon est inférieure au travail d'extraction  $h \times \nu < W_e$  : l'électron reste dans le réseau métallique.
- L'énergie du photon est égale au travail d'extraction de l'électron  $h \times \nu_0 = W_e$  : l'énergie du photon suffit tout juste à expulser l'électron hors du métal.
- L'énergie du photon est supérieure au travail d'extraction  $h \times \nu > W_e$  : une partie de cette énergie sert à libérer l'électron du réseau métallique, l'électron emporte l'excédent sous forme d'énergie cinétique.



$h \nu = W_e + E_c$ $h \nu = W_e + \frac{1}{2} m v^2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\nu</math> : Fréquence de l'onde électromagnétique (Hz)</li> <li>- <math>h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}</math> : Constante de Planck</li> <li>- <math>W_e</math> : Travail d'extraction (J)</li> <li>- <math>E_c</math> : Energie cinétique (J)</li> </ul>
---	---



### III-Applications de l'interaction photon-matière

#### 1-Par absorption de photons : les cellule photoélectriques :

Une cellule photoélectrique est un dispositif dont une des propriétés électriques (tension, résistance...) est modifiée par **absorption de photons**. La plupart de ces dispositifs font appels à des **matériaux semi-conducteurs**.

Ces cellules sont utilisées pour :

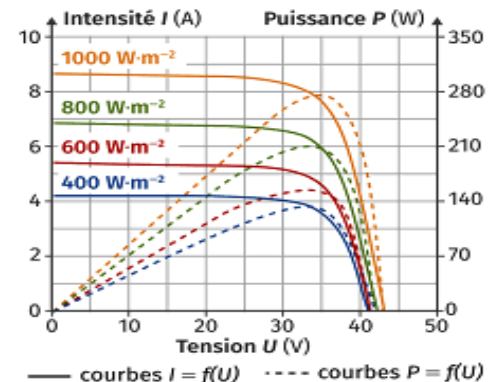
- mesurer l'intensité lumineuse : luxmètre, spectrophotomètre ...
- des dispositifs contrôlés par la lumière : photodiode, photorésistance.
- Produire de l'énergie électrique : cellule photovoltaïque.



Une cellule photovoltaïque transforme l'énergie lumineuse (rayonnement) en énergie électrique. Le rendement d'une cellule photovoltaïque est d'environ 15%, ce qui reste encore une valeur faible (QR code : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque).

Le rendement d'une cellule photovoltaïque s'exprime par :

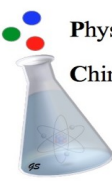
$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{reçue}}} = \frac{P_{\text{elec}}}{P_{\text{lum}}} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{reçue}}} = \frac{E_{\text{elec}}}{E_{\text{lum}}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>P_{\text{elec}}</math> et <math>P_{\text{lum}}</math> : Puissance électrique et lumineuse (W)</li> <li>- <math>E_{\text{elec}}</math> et <math>E_{\text{lum}}</math> : Energie électrique et lumineuse (J)</li> <li>- <math>\eta</math> : Rendement (sans unité très souvent exprimé en %)</li> </ul>
---	--



#### 2-Par émission de photons : les diodes électroluminescentes :



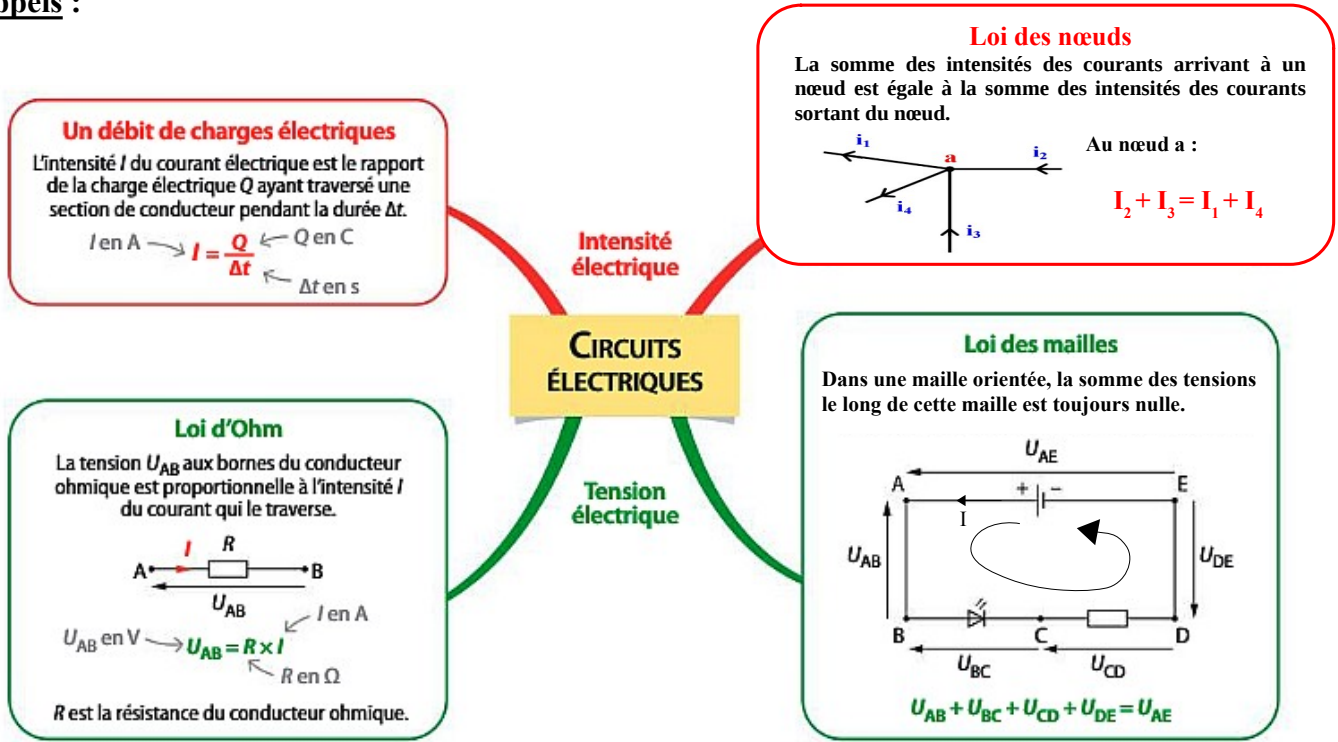
Une diode électroluminescentes (DEL) est un dipôle qui émet des photons lorsqu'elle est traversée par un courant électrique. Les DEL sont constituées de matériaux semi-conducteurs qui déterminent la couleur de la lumière émise (QR code : Principe de fonctionnement d'une DEL).

 Physique Chimie	<b>Ondes et signaux</b>	
	<b>- Fiche C8 -</b> <b>Notions d'électrocinétique</b>	<b>Exercices obligatoires : 5 p 436 – 6 p 436 – 20 p 439 – 27 p 441</b>

L'électrocinétique est l'étude du mouvement d'ensemble des porteurs de charge dans un circuit que l'on appelle courant électrique.

## I- Les circuits électriques

### 1- Rappels :

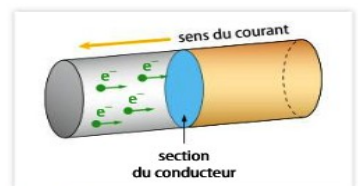


### 2- Intensité du courant électrique :

Un régime est **continu** lorsque les grandeurs électriques, notamment l'intensité et la tension **ne dépendent pas du temps**. On parle de régime **variable** si ces grandeurs **varient dans le temps**.

L'intensité du courant est la mesure du **débit d'électrons à travers la section de conducteur**. Pour la définir, il faut compter le nombre  $\Delta n$  d'électrons qui traversent une section  $S$  pendant une durée  $\Delta t$  donnée. La charge qui a traversé est  $\Delta q = e \times \Delta n$ . L'intensité du courant  $I$  correspond au rapport de  $\Delta q$  et  $\Delta t$  :

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \text{ . Ce débit est constant en régime continu mais pas en régime variable.}$$



L'intensité n'est pas nécessairement indépendante du temps, il faut donc que la durée de mesure soit la plus petite possible. L'intensité est alors définie comme la limite du rapport de  $\Delta q$  sur  $\Delta t$  quand  $\Delta t$  tend vers 0. cette limite correspond à la dérivée par rapport au temps de la charge  $q$ .

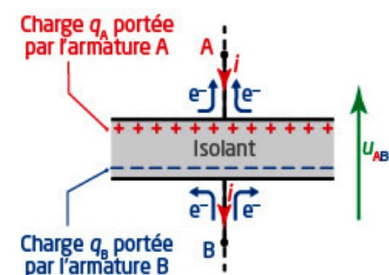
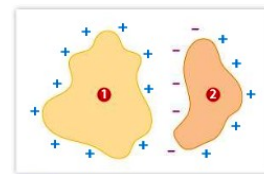
$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$	$-i(t)$ : Intensité du courant à la date $t$ (A) $-q(t)$ : Charge à la date $t$ en coulomb (C) $-t$ : temps (s)
---------------------------	---

L'intensité du courant correspond au coefficient directeur de la tangente à la courbe  $q=f(t)$  à la date  $t$ .

## II-Modèle du condensateur

### 1-Comportement capacitif :

Lorsqu'on approche un conducteur chargé d'un matériau conducteur non chargé, il se produit une accumulation de charges positives et négatives sur les surfaces en regard qui résulte d'interactions électrostatiques : il s'agit d'une électrisation par influence.

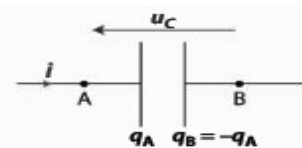


Un **condensateur** est constitué de deux armatures conductrices en regard séparées par un isolant (ou « diélectrique »). Soumis à une tension, le condensateur **accumule des charges électriques** sur ses armatures de valeurs absolues égales et de signes opposés  $q_A = -q_B$  : il a un **comportement capacitif**.

Exemple : Un flash d'appareil photo comporte un condensateur, un nuage d'orage a un comportement capacitif.

### 2-Relation entre charge et tension :

La charge  $q$  à une date  $t$  notée  $q(t)$  d'une armature d'un condensateur est liée à la tension  $U(t)$  à ses bornes, par la relation :



$$q_A(t) = C \times U_{AB}(t)$$

$$q(t) = C \times U_c(t)$$

- $q_A(t)$  : Charge de l'armature A du condensateur à la date  $t$  (C)
- $U_{AB}(t)$  : Tension aux bornes du condensateur à la date  $t$  (V)
- $C$  : Capacité du condensateur en farad (F)

La **capacité** est la grandeur caractéristique d'un condensateur, elle correspond à l'**aptitude qu'a ce dernier à accumuler des charges électriques sur ces armatures**. Elle s'exprime en **Farad (F)**.



Les condensateurs usuels ont des capacités de l'ordre du microfarad  $1 \mu F = 10^{-6} F$  ou nanofarad  $1 nF = 10^{-9} F$ .

La valeur de capacité d'un condensateur dépend de la géométrie du condensateur, de la surface des armatures, de la distance entre les armatures et des matériaux utilisés (QR code : Animation)

### 3-Intensité dans la branche d'un condensateur :



L'intensité du courant traversant la branche d'un condensateur à une date  $t$  est égal à  $i(t) = \frac{dq_A(t)}{dt}$

or  $q_A(t) = C \times U_{AB}(t)$  donc  $i(t) = \frac{d(C \times U_{AB}(t))}{dt} = C \times \frac{dU_{AB}(t)}{dt}$ .

En régime variable, l'intensité du courant  $i(t)$  traversant la branche d'un condensateur vaut :

$$i(t) = \frac{dq_A(t)}{dt} = C \times \frac{dU_{AB}(t)}{dt}$$

Le signe de l'intensité dépend du sens de variation de  $q_A$  et donc de  $U_{AB}$

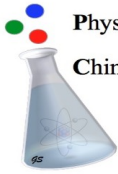
Si la charge  $q_A$  augmente ( $q_A(t)$  est une fonction croissante) alors  $\frac{dq_A(t)}{dt} > 0$  et  $i(t) > 0$  et inversement.

### 4-Capteurs capacitifs :

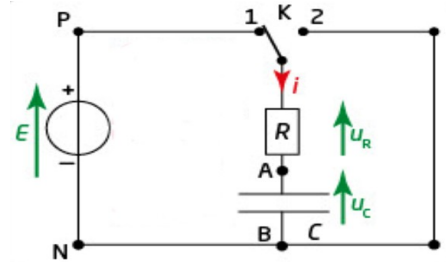


Un capteur capacitif utilise les modifications de la capacité d'un condensateur, sous l'effet de la modification d'une grandeur (surface des armatures, épaisseur et nature du matériau isolant ...). Ces dispositifs sont conçus pour réaliser la mesure de déplacement, d'épaisseur, de distance et de position.

Exemples : QR code ci-contre

 Physique Chimie	<h1>Ondes et signaux</h1>	
	<h2>- Fiche C9 - Circuit RC série</h2>	<b>Exercices obligatoires : 13 p 437 – 18 p 438 – 22 p 439</b> <b>Exercices en plus : 26 p 441 – 30 p 442</b>

Un dipôle RC série est l'association d'un condensateur de capacité C et d'un conducteur ohmique de résistance R. Dans le circuit ci-contre, lorsque l'interrupteur est en position 1, le condensateur, initialement déchargé, se charge. Lorsque l'interrupteur est en position 2, le condensateur se décharge dans le conducteur ohmique.



### 1-Charge d'un condensateur

Lorsque l'interrupteur est en position 1, à l'instant  $t=0s$ , le condensateur est déchargé et la tension à ses bornes est donc nulle :  $u_c(t=0s)=0V$ . La tension aux bornes du condensateur augmente progressivement au cours de la charge, elle évolue en fonction du temps : on la note  $u_c(t)$ .

#### 1-Obtention de l'équation différentielle vérifiée par la tension $u_c$ :



D'après la loi des mailles :  $E = u_c(t) + u_R(t)$

On a  $u_R(t) = R \times i(t)$  or  $i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$  et  $q(t) = C \times u_c(t) \Leftrightarrow i(t) = \frac{d}{dt}[C \times u_c(t)] = C \times \frac{du_c(t)}{dt}$

Donc  $u_R(t) = R \times C \times \frac{du_c(t)}{dt}$

L'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur lors de sa charge est :

$$E = u_c(t) + R \times C \times \frac{du_c(t)}{dt} \text{ . Sous la forme canonique : } \boxed{\frac{du_c(t)}{dt} + \frac{1}{R \times C} \times u_c(t) = \frac{E}{R \times C}} \text{ avec } \tau = R \times C$$

#### 2-Obtention de la solution de l'équation différentielle :

-Solution homogène :  $u_{ch}(t) = A e^{-\frac{1}{\tau} \times t}$  avec  $\tau = RC$

-Solution particulière : La solution particulière est de même nature que le second membre de l'équation différentielle donc  $u_{cp}(t) = cste$

$$\frac{du_{cp}(t)}{dt} + \frac{1}{R \times C} \times u_{cp}(t) = \frac{E}{R \times C} \text{ or } \frac{du_{cp}(t)}{dt} = 0 \Leftrightarrow \frac{1}{R \times C} \times u_{cp}(t) = \frac{E}{R \times C} \Leftrightarrow u_{cp}(t) = E$$

-Solution générale :  $u_c(t) = u_{ch}(t) + u_{cp}(t) \Leftrightarrow u_c(t) = A e^{-\frac{1}{\tau} \times t} + E$

-Condition initiale : A  $t=0s$ ,  $u_c(t=0s)=0$  (**condensateur déchargé**)  $\Leftrightarrow u_c(t=0) = A e^{-\frac{1}{\tau} \times 0} + E = 0 \Leftrightarrow A + E = 0 \Leftrightarrow A = -E$

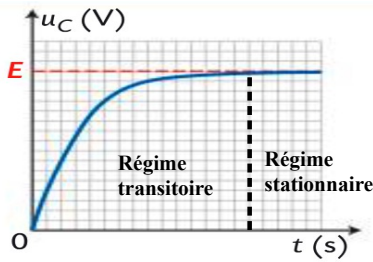
On a donc  $u_c(t) = -E e^{-\frac{1}{\tau} \times t} + E = E \left( 1 - e^{-\frac{1}{\tau} \times t} \right)$

La solution de cette équation différentielle correspondant à la **loi de d'évolution de la tension aux bornes du condensateur dans le cas de la charge** :

$u_c(t) = E \left[ 1 - e^{-\frac{1}{\tau} \times t} \right]$ $u_c(t) = E \left[ 1 - \exp \left( -\frac{1}{\tau} \times t \right) \right]$	$u_c$ : Tension aux bornes du condensateur (V) $E$ : Tension aux bornes du générateur de tension (V) $\tau = R \times C$ : Constante de temps (ou temps caractéristique) (s) $R$ : Valeur de la résistance du conducteur ohmique ( $\Omega$ ) $C$ : Capacité du condensateur (F)
---	--



Il est important de savoir **établir** la solution de l'équation différentielle ou de **vérifier** qu'une solution fournie **est ou n'est pas** solution de l'équation différentielle.

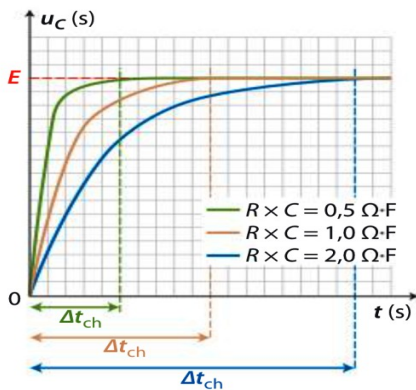


L'évolution de la tension  $u_c = f(t)$  est représentée ci-contre.

Le régime est **transitoire** lorsque la tension  $u_c$  aux bornes du condensateur varie au cours du temps.

Le régime est **stationnaire (ou permanent)** lorsque la tension  $u_c$  aux bornes du condensateur atteint la valeur E et ne varie plus au cours du temps.

### 3-Temps caractéristique $\tau$ :



Le temps caractéristique  $\tau$ , appelé aussi constante de temps, est défini par :

$\tau = R \times C$	R : Valeur de la résistance du conducteur ohmique ( $\Omega$ )
	C : Capacité du condensateur (F)
	$\tau$ : constante de temps (s)

Analyse dimensionnelle :

$$\dim(\tau) = T$$

$$\dim(R \times C) = \dim(R) \times \dim(C) = \dim\left(\frac{u_R}{i}\right) \times \dim\left(\frac{i \times dt}{du_c}\right) = \dim\left(\frac{u_R \times i \times dt}{i \times du_c}\right)$$

$$d'où \dim(R \times C) = \dim(R) \times \dim(C) = \dim(dt) = T$$

On a donc :  $\dim(\tau) = \dim(R \times C) = T \Leftrightarrow \tau$  est homogène à un temps.

La durée de la charge du condensateur dépend du temps caractéristique  $\tau$ . Plus  $\tau$  est grand, plus le temps de charge du condensateur est long.

$\tau$  détermine la durée de la charge du condensateur. En effet, pour  $t = 5\tau$ , on peut considérer que le condensateur est chargé :

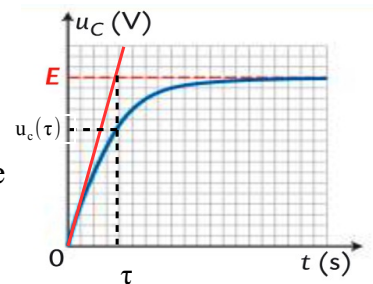
$$u_c(5\tau) = E \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1}{\tau} \times 5\tau\right) \right] = E [1 - \exp(-5)] = 0,993 E \quad (99,3\% \text{ de } E)$$

Si  $t < 5\tau$  le régime est transitoire et si  $t > 5\tau$  le régime est stationnaire.

On peut déterminer graphiquement cette constante de temps de deux manières (voir graphique ci-contre) :

-à  $t = \tau$ , la tangente à la courbe à  $t = 0s$  et l'asymptote horizontale de la courbe se coupent ;

$$-à \quad t = \tau, \quad u_c(\tau) = E \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1}{\tau} \times \tau\right) \right] = E [1 - \exp(-1)] = 0,63 E$$



## II-Décharge du condensateur

Lorsque l'interrupteur est en position 2, à l'instant  $t = 0s$ , le condensateur est chargé et la tension à ses bornes est égale à E :  $u_c(t = 0s) = E V$ . La tension diminue progressivement au cours de la décharge, elle évolue en fonction du temps.

### 1-Obtention de l'équation différentielle vérifiée par la tension $u_c$ :



D'après la loi des mailles :  $u_c(t) + u_R(t) = 0$

$$\text{On a } u_R(t) = R \times i(t) \text{ or } i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \text{ et } q(t) = C \times u_c(t) \Leftrightarrow i(t) = \frac{d}{dt} [C \times u_c(t)] = C \times \frac{du_c(t)}{dt}$$

$$\text{Donc } u_R(t) = R \times C \times \frac{du_c(t)}{dt}$$

L'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur lors de sa décharge est :

$$u_c(t) + R \times C \times \frac{du_c(t)}{dt} = 0$$

Sous la forme canonique :  $\frac{du_c(t)}{dt} + \frac{1}{R \times C} \times u_c(t) = 0$  avec  $\tau = R \times C$

## 2-Obtention de la solution de l'équation différentielle :



-Solution homogène :  $u_{ch}(t) = A e^{-\frac{1}{\tau} \times t}$  avec  $\tau = RC$

-Solution particulière : La solution particulière est de même nature que le second membre de l'équation différentielle donc  $u_{cp}(t) = 0$

-Solution générale :  $u_c(t) = u_{ch}(t) + u_{cp}(t) \Leftrightarrow u_c(t) = A e^{-\frac{1}{\tau} \times t}$

-Condition initiale : A  $t=0s$ ,  $u_c(t=0s) = E$  (**condensateur chargé sous la tension E**)  $\Leftrightarrow$

$$u_c(t=0) = A e^{-\frac{1}{\tau} \times 0} = E \Leftrightarrow A = E$$

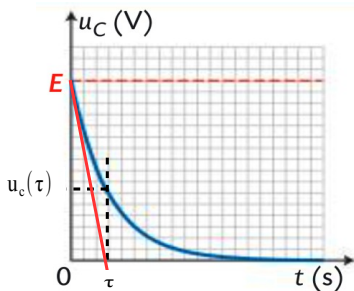
On a donc  $u_c(t) = E e^{-\frac{1}{\tau} \times t}$

La solution de cette équation différentielle correspondant à la **loi de d'évolution de la tension aux bornes du condensateur dans le cas de la décharge** :

$u_c(t) = E e^{-\frac{1}{\tau} \times t}$ $u_c(t) = E \exp\left(-\frac{1}{\tau} \times t\right)$	$u_c$ : Tension aux bornes du condensateur (V) $E$ : Tension aux bornes du générateur de tension (V) $\tau = R \times C$ : Constante de temps (ou temps caractéristique) (s) $R$ : Valeur de la résistance du conducteur ohmique ( $\Omega$ ) $C$ : Capacité du condensateur (F)
--	--

**ATTENTION!** Il est important de savoir **établir** la solution de l'équation différentielle ou de **vérifier** qu'une solution fournie **est ou n'est pas** solution de l'équation différentielle.

## 3-Représentations et exploitation de $u_c(t)$ :



La durée de la décharge du condensateur dépend du temps caractéristique  $\tau$ . Plus  $\tau$  est grand, plus le temps de décharge du condensateur est long.

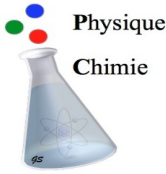
Pour  $t = 5\tau$ , on peut considérer que le condensateur est déchargé. En effet :

$$u_c(5\tau) = E \exp\left(-\frac{1}{\tau} \times 5\tau\right) = E \exp(-5) = 0,0067 E \quad (0,67\% \text{ de } E)$$

On peut déterminer graphiquement cette constante de temps de deux manières (voir graphique ci-dessus) :

-à  $t = \tau$ , la tangente à la courbe à  $t=0s$  et l'asymptote horizontale de la courbe se coupent ;

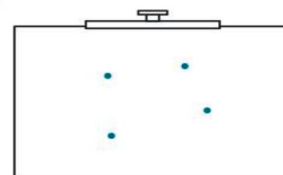
-à  $t = \tau$ ,  $u_c(\tau) = E \exp\left(-\frac{1}{\tau} \times \tau\right) = E \exp(-1) = 0,37 E$

	<b>L'énergie : conversions et transferts</b>	
	<b>- Fiche D1 - Gaz parfait</b>	<b>Exercices obligatoires : 8 p 312 – 23 p 315</b> <b>Exercices en plus : 29 p 317</b>

## I-Modèle du gaz parfait

GAZ PARFAIT	
À l'échelle macroscopique	Comportement à l'échelle microscopique
Le gaz parfait est au repos à la température $T$ (en K).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mouvement incessant et désordonné des entités du gaz, assimilées à des points matériels</li> <li>Pas d'interaction entre elles</li> </ul>
La pression $P$ (en Pa) est faible.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pas de chocs entre les entités du gaz</li> <li>Chocs seulement entre les entités du gaz et la paroi</li> </ul>
La masse volumique $\rho = \frac{m}{V}$ (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) est très faible.	Entités du gaz très éloignées les unes des autres

A l'échelle microscopique, un gaz est modélisé par un ensemble d'entités (atomes, molécules) en mouvement aléatoire et désordonné. Les grandeurs macroscopiques de description du gaz reflètent le comportement microscopique des entités qui le constituent.




Un gaz est dit « parfait » si :

- la taille de ses entités est négligeable devant la distance qui les sépare ce qui permet de les considérer comme ponctuelles (petit volume propre).
- les interactions entre les entités sont négligeables.

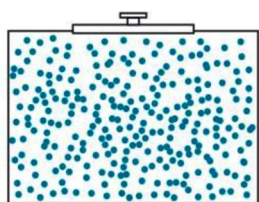
Un gaz parfait est un **modèle** décrivant le comportement des **gaz à basse pression**.

## II-Equation d'état du gaz parfait

L'équation d'état du gaz parfait relie différentes grandeurs macroscopiques qui permettent de le décrire :

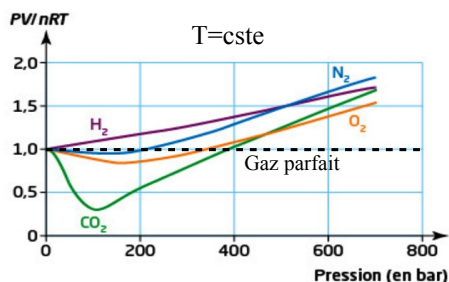
$P \times V = n \times R \times T$	<ul style="list-style-type: none"> <li>-P : pression du gaz parfait (Pascal <math>\Leftrightarrow</math> Pa) 1 bar = <math>10^5</math> Pa = <math>10^3</math> hPa</li> <li>-V : volume occupé par le gaz parfait ( <math>\text{m}^3</math> ) 1 L = <math>10^{-3}</math> <math>\text{m}^3</math></li> <li>-n : quantité de matière du gaz parfait (mol)</li> <li>-R : constante des gaz parfaits ( <math>R = 8,314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}</math> )</li> <li>-T : température du gaz parfait (Kelvin <math>\Leftrightarrow</math> K) <math>T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273,15</math></li> </ul>	
------------------------------------	---	---

## III-Limites du modèle du gaz parfait



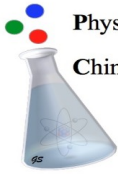
Si la pression du gaz est trop importante alors le modèle du gaz parfait n'est plus adapté : les entités ne peuvent plus être modélisées par des points et les interactions entre elles ne sont plus négligeables.

Il existe d'autres modèles (modèle du gaz de Van der Waals ...) qui apportent des facteurs correctifs (pression, volume) à l'équation d'état pour prendre en compte les interactions devenues non négligeables entre les différentes entités qui constituent le gaz.



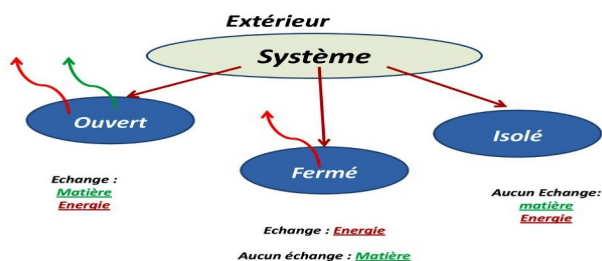
Un gaz à une pression voisine ou inférieure à la pression atmosphérique (  $P_{\text{atm}} = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa} \approx 1,0 \text{ bar}$  ) peut être assimilé à un gaz parfait.

Au dessus de  $P = 10^6 \text{ Pa} = 10 \text{ bar}$  , les résultats obtenus avec le modèle du gaz parfait s'éloignent de la réalité : le modèle du gaz parfait n'est plus adapté pour décrire le comportement du gaz (voir graphique ci-contre).

 Physique Chimie	<b>L'énergie : conversions et transferts</b>	
	<b>- Fiche D2 -</b> <b>Energie interne et premier principe de la thermodynamique</b>	<b>Exercices obligatoires : 14 p 313 – 19 p 314 – 22 p 314 – 24 p 315</b> <b>Exercices en plus : 27 p 316 – 32 p 319</b>

## I-L'énergie interne

### 1-Système macroscopique :



Un **système macroscopique** est une portion d'espace limitée par une surface contenant la matière constituant ce système. Il est **constitué d'un très grand nombre d'entités microscopiques**.

Tout ce qui n'appartient pas au système est appelé **extérieur**.

On s'intéressera en terminale uniquement aux **systèmes fermés** ou **isolés**.

### 2-Energies d'un système macroscopique :

Les particules constituant un système macroscopique sont animées de mouvements incessants et désordonnés. On parle d'**agitation thermique**, laquelle est mesurée, à l'échelle macroscopique, par la **température**. Plus la température est élevée, plus l'agitation thermique est importante, et plus l'**énergie cinétique microscopique** des particules est grande. L'**énergie potentielle microscopique** est, elle due aux interactions entre les particules constituant le système.

-L'**énergie interne**  $U$  d'un système macroscopique résulte de contributions microscopiques : l'énergie cinétique microscopique et l'énergie potentielle microscopique :  $U = E_{cm} + E_{pm}$  .

-L'**énergie mécanique**  $E_m$  d'un système macroscopique résulte de contributions macroscopiques : l'énergie cinétique macroscopique et l'énergie potentielle macroscopique :  $E_m = E_c + E_p$  .

-L'**énergie totale**  $E_t$  d'un système macroscopique est la somme de son énergie interne et de son énergie mécanique :  $E_t = U + E_m$  .

Pour un système fermé évoluant d'un état initial vers un état final :  $(\Delta E_t)_{i \rightarrow j} = (\Delta U)_{i \rightarrow j} + (\Delta E_m)_{i \rightarrow j}$  .

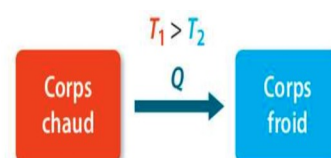
Si le **système macroscopique est au repos c'est-à-dire immobile**  $(\Delta E_t)_{i \rightarrow j} = (\Delta U)_{i \rightarrow j}$  car  $(\Delta E_m)_{i \rightarrow j} = 0$

### 3-Modes de transfert de l'énergie :

Le **travail**  $W$  et le **transfert thermique**  $Q$  sont les deux modes de transfert de l'énergie entre un système fermé et l'extérieur.

-**Travail**  $W$  : Transfert d'énergie qui s'effectue macroscopiquement et qui est dû au déplacement du point d'application d'une force s'exerçant sur le système.

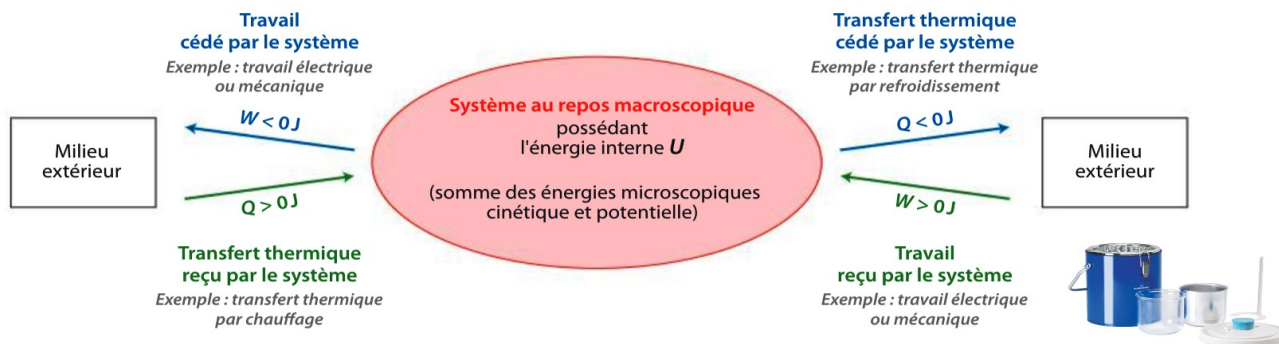
-**Transfert thermique**  $Q$  : Transfert d'énergie qui s'effectue microscopiquement de manière désordonné entre le système et l'extérieur. **Le transfert thermique est toujours orienté du corps chaud vers le corps froid**. Un transfert thermique a une conséquence macroscopique : une **variation de température ou un changement d'état physique** du système. Lorsque le transfert est terminé, les deux systèmes sont en **équilibre thermique**, ils ont la **même température**.



Ces termes d'échange sont des **grandeurs algébriques** (exprimés en joules) :

-**Positives** si l'énergie est **reçue** par le système ;

-**Négatives** si l'énergie est **cédée** par le système.



## II-Premier principe de la thermodynamique

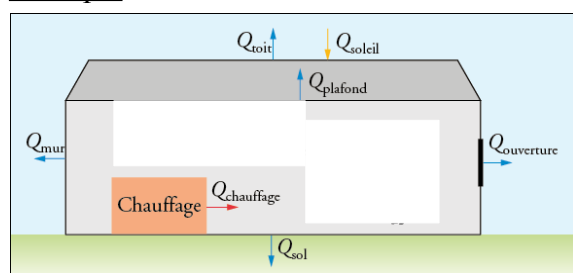
### 1-Enoncé :

Pour un système macroscopique fermé et au repos, la variation d'énergie interne du système entre un état initial et un état final  $\Delta U_{i \rightarrow f}$  est égale à la somme des énergies échangées par le système avec l'extérieur par travail  $W$  et/ou par transfert thermique  $Q$ .

$\Delta U_{i \rightarrow f} = Q + W$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\Delta U_{i \rightarrow f}</math> : Variation d'énergie interne (J)</li> <li>- <math>Q</math> : Transfert thermique (J)</li> <li>- <math>W</math> : Travail (J)</li> </ul>
--------------------------------------	---

Pour un système isolé  $S\{A+B\}$  :  $(\Delta U_S)_{i \rightarrow f} = (\Delta U_A)_{i \rightarrow f} + (\Delta U_B)_{i \rightarrow f} = 0 \iff (\Delta U_A)_{i \rightarrow f} = -(\Delta U_B)_{i \rightarrow f}$

Exemple : Etude d'une maison



Pour le système {maison} :

$$\Delta U_{\text{maison}} = Q_{\text{soleil}} + Q_{\text{toit}} + Q_{\text{plafond}} + Q_{\text{mur}} + Q_{\text{ouverture}} + Q_{\text{sol}} + Q_{\text{chauffage}}$$

avec :

$$Q_{\text{soleil}} > 0 \text{ et } Q_{\text{chauffage}} > 0$$

$$Q_{\text{toit}} < 0, Q_{\text{plafond}} < 0, Q_{\text{mur}} < 0, Q_{\text{sol}} < 0 \text{ et } Q_{\text{ouverture}} < 0$$

$$\Delta U_{\text{maison}} = Q_{\text{soleil}} - |Q_{\text{toit}}| - |Q_{\text{plafond}}| - |Q_{\text{mur}}| - |Q_{\text{ouverture}}| - |Q_{\text{sol}}| + Q_{\text{chauffage}}$$

### 2-Cas des systèmes incompressibles :

Lorsqu'un système incompressible (solide ou liquide) de masse «  $m$  » et de capacité thermique massique «  $c$  » subit une variation de température sans changer d'état physique, sa variation d'énergie interne a pour expression :

$\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times (T_f - T_i)$ $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\Delta U_{i \rightarrow f}</math> : Variation d'énergie interne (J)</li> <li>- <math>m</math> : Masse du système incompressible (kg)</li> <li>- <math>c</math> : Capacité thermique massique ( <math>J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}</math> ou <math>J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}</math> )</li> <li>- <math>T</math> : Température (K) ou <math>\theta</math> : Température (<math>^\circ C</math>)</li> </ul>
---	---

La **capacité thermique massique** correspond à l'énergie thermique que doit recevoir 1 kg d'un corps pour élever sa température d'1K ou d'1 $^\circ C$ . Elle dépend de la nature du corps et de son état physique.

On utilise parfois la **capacité thermique C** :  $C = m \times c$ . Elle s'exprime donc en  $J \cdot ^\circ C^{-1}$  ou  $J \cdot K^{-1}$ . Il vient ainsi :  $\Delta U_{i \rightarrow f} = C \times \Delta T = C \times \Delta \theta$

Matériau	$c (J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$
Aluminium Al(s)	897
Eau H <sub>2</sub> O(s)	$2,06 \times 10^3$
Éthanol C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH(l)	$2,44 \times 10^3$
Eau H <sub>2</sub> O(l)	$4,18 \times 10^3$

Lorsque le système est à l'**équilibre thermique** ( $T_f = T_i$ )  $\iff \Delta U_{i \rightarrow f} = 0$

### III-Bilan énergétique

Pour établir un **bilan énergétique** il faut :

- **définir le système macroscopique étudié (et ses sous-systèmes si il y en a) ;**
- **Pour le système (ou les sous-systèmes) donner l'expression de la variation de son énergie interne et donner son signe ;**
- **Réaliser un diagramme énergétique entre le système et le(s) extérieur(s) :**
  - **relever la nature des transferts énergétiques (par travail ou par transfert thermique) entre ce système et l'extérieur ;**
  - **repérer le sens de ces transferts vis-à-vis du système et déterminer leur signe car ce sont des grandeurs algébriques ;**
- **Appliquer le premier principe de la thermodynamique.**

Exemple : Bouilloire électrique

Il faut 3 minutes et 30 secondes pour porter à ébullition 1,0 L d'eau initialement à 20°C. Déterminer l'énergie thermique perdue par le système {bouilloire + eau} avec l'air ambiant.

Données :  $P_{elec} = 2000 \text{ W}$ ,  $C_{bouilloire} = 900 \text{ J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\rho_{eau} = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$  et  $c_{eau} = 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

Système : {Bouilloire + eau }

-Sous système 1 {Bouilloire} :  $\Delta U_{bouilloire} = C_{bouilloire} \times (\theta_f - \theta_i)$  et  $\Delta U_{bouilloire} > 0$  car  $\theta_f > \theta_i$

-Sous système 2 {eau} :  $\Delta U_{eau} = m_{eau} \times c_{eau} \times (\theta_f - \theta_i) = \rho_{eau} \times V_{eau} \times c_{eau} \times (\theta_f - \theta_i)$  et  $\Delta U_{eau} > 0$  car  $\theta_f > \theta_i$

$\Delta U_{système} = \Delta U_{bouilloire} + \Delta U_{eau}$



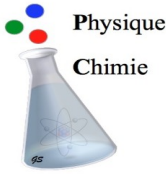
-Travail électrique de la source électrique  $W$  (énergie électrique) capté par le système :  $W > 0$

-Transfert thermique  $Q$  cédé à l'air ambiant (extérieur) :  $Q < 0$

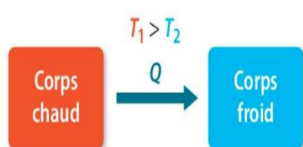
Premier principe de la thermodynamique appliqué au système :  $\Delta U_{système} = W + Q$

On a donc :  $Q = \Delta U_{système} - W \Leftrightarrow Q = \underbrace{C_{bouilloire} \times (\theta_f - \theta_i)}_{\Delta U_{bouilloire}} + \underbrace{\rho_{eau} \times V_{eau} \times c_{eau} \times (\theta_f - \theta_i)}_{\Delta U_{eau}} - \underbrace{P_{elec} \times \Delta t}_W$

AN :  $Q = 900 \times (100 - 20) + 1,0 \times 1,0 \times 4,18 \times 10^3 \times (100 - 20) - 2000 \times (3 \times 60 + 30) = -1,4 \times 10^4 \text{ J}$

	<b>L'énergie : conversions et transferts</b>	
	<b>- Fiche D3 -</b> <b>Transferts, flux et résistance thermique</b>	<b>Exercices obligatoires : 5 p 334 – 21 p 338</b> <b>Exercices en plus : 20 p 337 – 26 (partie I) p 340</b>

## I-Les modes de transferts thermiques



L'existence d'une différence de température entre deux systèmes induit un **transfert thermique d'énergie Q** du système le plus chaud vers le système le plus froid. Lorsque l'échange est terminé, les deux systèmes sont en **équilibre thermique** : ils ont la même température.

Le retour à l'état initial est impossible : il y a **irréversibilité**.

On peut interpréter les transferts thermiques dans la matière suivant trois modes : **la conduction, la convection et le rayonnement**.

### 1-La conduction :

Le transfert par conduction est généré, au niveau microscopique, par des interactions entre particules en contact direct. Le transfert thermique se fait de proche en proche, **sans déplacement de matière**. L'énergie cinétique microscopique des particules des zones les plus chaudes, dont l'agitation thermique est plus importante, est transmise, à la suite de collisions, aux particules des zones les plus froides. **Il n'y a aucun déplacement macroscopique de matière**.

C'est le seul mode de transfert thermique dans les solides.

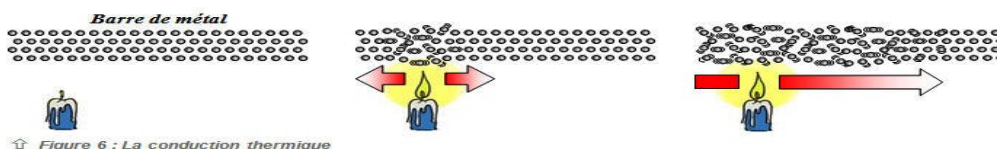


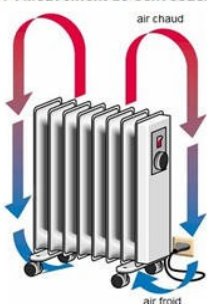
Figure 6 : La conduction thermique

Vidéo : La conduction



### 2-La convection :

Figure 7 : Mouvement de convection



**Elle est spécifique des fluides (liquides ou gaz)**. Les zones les plus chaudes se dilatent et, moins denses, s'élèvent pour laisser la place aux zones les plus froides. La convection correspond donc à **un déplacement macroscopique de matière**.

On distingue deux types de convection :

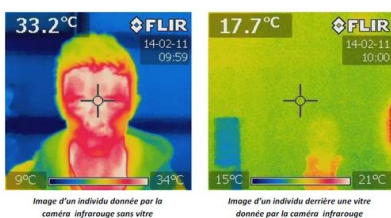
-La convection naturelle (ou libre) : la masse volumique est en général fonction de la température. Cette différence de masse volumique implique une différence de la poussée d'Archimède et donc crée un mouvement.

-La convection forcée : la convection forcée est provoquée par une circulation artificielle (pompe, turbine) d'un fluide.



Vidéo : La convection

### 3-Le rayonnement :



Tout corps, en raison de sa température, émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique, il en absorbe également.

Ce rayonnement modifie l'agitation thermique des particules d'un milieu mais est aussi possible dans le vide car les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide.



**Exemples :** Le soleil émet un rayonnement thermique visible, une personne émet un rayonnement thermique dans l'IR.

Vidéo : Le rayonnement

## II-Flux thermique

Un transfert thermique entre le système et l'extérieur peut se faire plus ou moins rapidement. Pour évaluer cette vitesse de transfert, on définit le **flux thermique** qui correspond à l'**énergie échangée par transfert thermique entre le système et l'extérieur par unité de temps**. Il se calcule par :

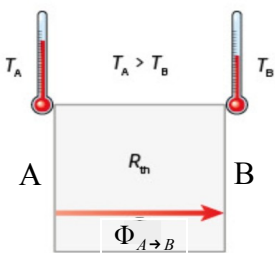
$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\Phi</math> : Flux thermique en Watt (W)</li> <li>- <math>Q</math> : Transfert thermique (J)</li> <li>- <math>\Delta t</math> : Durée du transfert thermique (s)</li> </ul>
-----------------------------	--

Le flux thermique a la même unité qu'une puissance : on parle également de **puissance thermique** notée  $P_{th}$ . Il est **toujours orienté du corps chaud vers le corps froid**.

Comme le transfert thermique, le flux thermique est une **grandeur algébrique** :

- **Positive** si le flux est **reçu** par le système ( $\Phi > 0$ ) ;
- **Négative** si le flux est **cédé** par le système ( $\Phi < 0$ ).

## III-Résistance thermique



La résistance thermique caractérise l'**aptitude d'un milieu à s'opposer au transfert thermique** entre deux points à **deux températures différentes et constantes au cours du temps** (thermostat).

Il existe une relation liant le flux thermique orienté  $\Phi_{A \rightarrow B}$  (**toujours positif et orienté du corps chaud vers le corps froid**), la différence de températures entre les points A et B et la résistance thermique  $R_{th}$  :

$\Phi_{A \rightarrow B} = \frac{T_A - T_B}{R_{th}} = \frac{\theta_A - \theta_B}{R_{th}} \text{ avec } T_A > T_B$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\Phi_{A \rightarrow B}</math> : Flux thermique orienté en Watt (W)</li> <li>- <math>T</math> ou <math>\theta</math> : Température (K ou °C)</li> <li>- <math>R_{th}</math> : Résistance thermique (<math>K \cdot W^{-1}</math> ou <math>^{\circ}C \cdot W^{-1}</math>)</li> </ul>
--	--

Pour un même écart de température entre deux points, plus la résistance thermique du milieu est grande et plus le flux thermique orienté est faible.

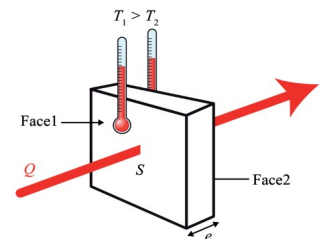
Pour le système {A} :  $\Phi < 0 \Leftrightarrow \Phi = -\Phi_{A \rightarrow B}$  et pour le système {B} :  $\Phi > 0 \Leftrightarrow \Phi = +\Phi_{A \rightarrow B}$

### Remarques :

-La résistance thermique  $R_{th}$  d'un parallélépipède rectangle (paroi plane) dépend de la **conductivité thermique  $\lambda$  du matériau**, de son **épaisseur  $e$**  et de la **surface  $S$** . La résistance thermique est donc définie par :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda S} \text{ avec } e \text{ en m, } S \text{ en m}^2, \lambda \text{ en W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \text{ et } R_{th} \text{ en K} \cdot \text{W}^{-1}.$$

Cette relation n'est pas à connaître car elle dépend de la géométrie de la situation.



-Lorsqu'une paroi est composée de **plusieurs couches de matériaux différents**, la résistance thermique totale est égale à la **somme des résistances thermiques de chacune des couches**.

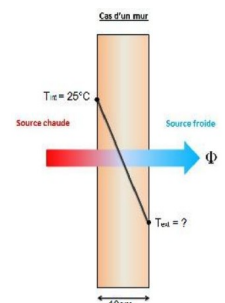
### Exemple : Mur

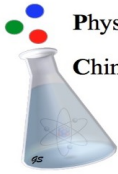
La déperdition thermique à travers un mur en béton de  $30 \text{ m}^2$  de surface est  $690 \text{ W}$ . Sachant que le mur a une épaisseur de  $10 \text{ cm}$ , et que sa température de surface intérieure est  $25^{\circ}\text{C}$ . Déterminer la température de surface extérieure.

Donnée : conductivité thermique du béton  $\lambda = 1,75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

$$\Phi_{\text{int} \rightarrow \text{ext}} = \frac{\theta_{\text{int}} - \theta_{\text{ext}}}{R_{th}} \text{ or } R_{th} = \frac{e}{\lambda S} \Leftrightarrow \Phi_{\text{int} \rightarrow \text{ext}} = \frac{(\theta_{\text{int}} - \theta_{\text{ext}}) \times \lambda \times S}{e} \Leftrightarrow (\theta_{\text{int}} - \theta_{\text{ext}}) = \frac{\Phi_{\text{int} \rightarrow \text{ext}} \times e}{\lambda \times S}$$

$$\theta_{\text{ext}} = \theta_{\text{int}} - \frac{\Phi_{\text{int} \rightarrow \text{ext}} \times e}{\lambda \times S} \text{ AN : } \theta_{\text{ext}} = 25 - \frac{690 \times 10 \times 10^{-2}}{1,75 \times 30} = 24^{\circ}\text{C}$$



 Physique Chimie	<b>L'énergie : conversions et transferts</b>	
	<b>- Fiche D4 - Loi phénoménologique de Newton</b>	<b>Exercices obligatoires : 15 p 336 – 18 p 337</b> <b>Exercice en plus : 16 p 336</b>

Considérons un système incompressible (solide ou liquide) en contact avec le milieu extérieur sans échange de matière, le système ou le milieu extérieur étant fluide (liquide ou gaz). L'évolution de la température  $\theta$  (ou  $T$ ) au cours du temps de ce système est difficile à modéliser car plusieurs modes de transfert thermique (convection et conduction) interviennent.

### I-Modèle de la loi de Newton

Lorsque le principal mode de transfert thermique est la **convection** dans le fluide extérieur, la **loi phénoménologique de Newton** modélise l'évolution du flux thermique  $\Phi$  au cours du temps à partir d'observations expérimentales. Cette loi s'écrit :

$\Phi(t) = h \times S \times [\theta_e - \theta(t)]$	- $\Phi$ : Flux thermique (W) - $h$ : Coefficient d'échange par convection ( $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ ou $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) - $S$ : Surface du système en contact avec le fluide extérieur ( $m^2$ )
$\Phi(t) = h \times S \times [T_e - T(t)]$	- $\theta_e$ ou $T_e$ : Température du fluide extérieur ( $^\circ C$ ou $K$ ) - $\theta$ ou $T$ : Température du système de surface $S$ ( $^\circ C$ ou $K$ )



#### Remarques :

- le système dont la surface d'échange  $S$  avec le milieu extérieur a une température  $\theta$  supposée uniforme en tous points de la surface d'échange ;
- le fluide extérieur de température  $\theta_e$  (ou  $T_e$ ) constante est appelé **thermostat**.
- Ordre de grandeur de coefficient d'échange par convection (voir tableau ci-contre).

Fluides et conditions	Coefficient d'échange convectif $h$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )
Gaz en convection forcée	$30 < h < 300$
Gaz en convection naturelle	$10 < h < 30$
Eau en convection forcée	$300 < h < 10000$
Eau en convection naturelle	$100 < h < 900$

### II-Evolution de la température du système en contact avec un thermostat

#### 1-Etablissement de l'équation différentielle vérifiée par la température du système :



A la date  $t$ , le système est à la température  $\theta(t)$ .  
 A la date  $t + \Delta t$ , le système est à la température  $\theta(t + \Delta t)$ .



Même démarche pour  $T(t)$

La variation de la température  $\Delta\theta(t)$  du système pendant la durée  $\Delta t$  vaut :  $\Delta\theta(t) = \theta(t + \Delta t) - \theta(t)$ .

- Appliquons le premier principe de la thermodynamique :

$$\Delta U = Q + W \quad \text{or} \quad W = 0 \quad \text{pour un système incompressible} \Leftrightarrow \Delta U = Q$$

Pendant la durée  $\Delta t$ , la variation d'énergie interne du système incompressible s'écrit :  $\Delta U(t) = m \times c \times \Delta\theta(t)$

On peut donc écrire :  $Q(t) = m \times c \times \Delta\theta(t)$

- Utilisons l'expression du flux thermique :

$$\Phi(t) = \frac{Q(t)}{\Delta t} \Leftrightarrow Q(t) = \Phi(t) \times \Delta t \quad \text{or} \quad Q(t) = m \times c \times \Delta\theta(t)$$

$$\text{Donc} \quad m \times c \times \Delta\theta(t) = \Phi(t) \times \Delta t$$

- Utilisons la loi phénoménologique de Newton :

La loi phénoménologique de Newton stipule que :  $\Phi(t) = h \times S \times [\theta_e - \theta(t)]$

Donc  $m \times c \times \Delta\theta(t) = h \times S \times [\theta_e - \theta(t)] \times \Delta t \iff \frac{m \times c \times \Delta\theta(t)}{\Delta t} = h \times S \times [\theta_e - \theta(t)]$

Or lorsque  $\Delta t$  tend vers 0,  $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta\theta(t)}{\Delta t} \right) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\theta(t+\Delta t) - \theta(t)}{\Delta t} \right) = \frac{d\theta(t)}{dt}$

d'où  $m \times c \times \frac{d\theta(t)}{dt} = h \times S \times [\theta_e - \theta(t)] \iff m \times c \times \frac{d\theta(t)}{dt} + h \times S \times \theta(t) = h \times S \times \theta_e$

On obtient alors l'équation différentielle sous forme canonique :

$\frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta(t) = \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e$	avec $\tau = \frac{m \times c}{h \times S}$
--	---

## 2- Solution de l'équation différentielle :

-Solution homogène :  $\theta_h(t) = A e^{-\frac{1}{\tau} \times t}$  avec  $\tau = \frac{m \times c}{h \times S}$

-Solution particulière : La solution particulière est de même nature que le second membre de l'équation différentielle donc  $\theta_p(t) = \text{cste}$

$$\frac{d\theta_p(t)}{dt} + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_p(t) = \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e \quad \text{or} \quad \frac{d\theta_p(t)}{dt} = 0 \iff \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_p(t) = \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e \iff \theta_p(t) = \theta_e$$

-Solution générale :  $\theta_c(t) = \theta_h(t) + \theta_p(t) \iff \theta(t) = A e^{-\frac{1}{\tau} \times t} + \theta_e$

-Condition initiale : A  $t=0s$ ,  $\theta(t=0s) = \theta_i \iff \theta(t=0) = A e^{-\frac{1}{\tau} \times 0} + \theta_e = \theta_i \iff A + \theta_e = \theta_i \iff A = \theta_i - \theta_e$

On a donc  $\theta(t) = (\theta_i - \theta_e) e^{-\frac{1}{\tau} \times t} + \theta_e$

La solution de cette équation différentielle correspondant à la **loi de d'évolution de la température d'un système en contact avec un thermostat** :

$\theta(t) = (\theta_i - \theta_e) e^{-\frac{1}{\tau} \times t} + \theta_e$ $\theta(t) = (\theta_i - \theta_e) \exp\left(-\frac{1}{\tau} \times t\right) + \theta_e$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\theta_i</math> : Température du système à <math>t=0s</math> (<math>^{\circ}C</math>)</li> <li>- <math>\theta_e</math> : Température du thermostat (fluide extérieur) (<math>^{\circ}C</math>)</li> <li>- <math>\tau = \frac{m \times c}{h \times S}</math> : Constante de temps (ou temps caractéristique) de l'évolution de la température du système (s)</li> </ul>
--	---



Il est important de savoir **établir** la solution de l'équation différentielle ou de **vérifier** qu'une solution fournie **est ou n'est pas** solution de l'équation différentielle.

## 3- Temps caractéristique :

Le temps caractéristique  $\tau$ , appelé aussi constante de temps, est défini par :

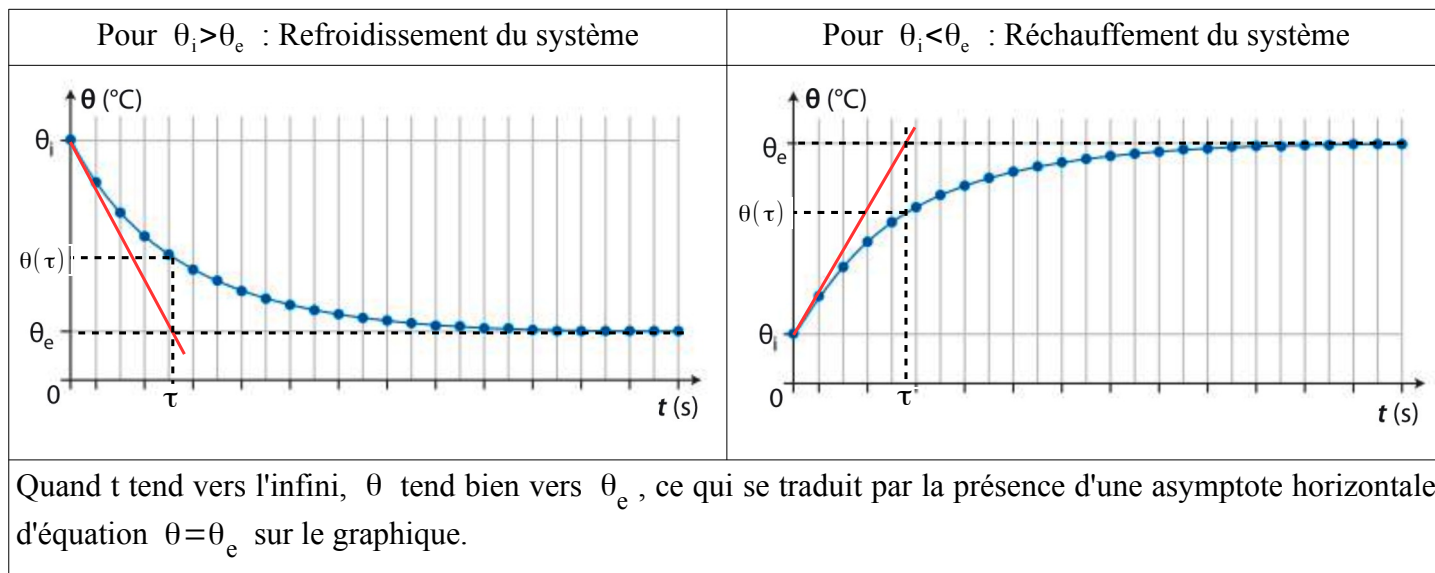
$\tau = \frac{m \times c}{h \times S}$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>m</math> : Masse du système incompressible (kg)</li> <li><math>c</math> : Capacité thermique massique ( <math>J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}</math> ou <math>J \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}</math> )</li> <li><math>h</math> : Coefficient d'échange par convection ( <math>W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}</math> ou <math>W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}</math> )</li> <li><math>S</math> : Surface du système en contact avec le fluide extérieur ( <math>m^2</math> )</li> <li><math>\tau</math> : constante de temps (temps caractéristique) (s)</li> </ul>
--	--

Analyse dimensionnelle :

$\dim(\tau) = T$

$$\dim\left(\frac{m \times c}{h \times S}\right) = \frac{\dim(m \times c)}{\dim(h \times S)} = \dim(m \times c) \times \frac{1}{\dim(h \times S)} = \dim\left(\frac{\Delta U}{\Delta \theta}\right) \times \dim\left(\frac{\Delta \theta}{\Phi}\right) = \dim\left(\frac{\Delta U}{\Phi}\right) = \dim(\Delta t) = T$$

$\tau$  est homogène à un temps.



La constante de temps donne une échelle de temps de l'évolution de la température du système. On peut déterminer graphiquement cette constante de temps de deux manières (voir graphiques) :

- à  $t = \tau$ , la tangente à la courbe à  $t = 0s$  et l'asymptote horizontale de la courbe se coupent ;
- à  $t = \tau$ ,  $\theta(\tau) = 0,37\theta_i + 0,63\theta_e$ .

Pour  $t = 5\tau$ , la température du système  $\theta$  est presque égale à celle du thermostat  $\theta_e$  :  $\theta \approx \theta_e$ .

#### 4-Durée et température finale :

On cherche la durée  $\Delta t = t_f - t_i$  mise par le système pour passer de la température  $\theta_i$  (à la date  $t_i$ ) à la température  $\theta_f$  (à la date  $t_f$ ). Pour cela il faut résoudre  $\theta(t_f) = \theta_f$ .

$$\theta(t_f) = (\theta_i - \theta_e)e^{-\frac{1}{\tau} \times t_f} + \theta_e = \theta_f \iff (\theta_i - \theta_e)e^{-\frac{1}{\tau} \times t_f} = \theta_f - \theta_e \iff e^{-\frac{1}{\tau} \times t_f} = \frac{\theta_f - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \iff -\frac{1}{\tau} \times t_f = \ln\left(\frac{\theta_f - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}\right)$$

$$t_f = -\tau \times \ln\left(\frac{\theta_f - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}\right) \text{ or } \tau = \frac{m \times c}{h \times S} \iff t_f = -\frac{m \times c}{h \times S} \times \ln\left(\frac{\theta_f - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}\right)$$



**UNITÉS !**

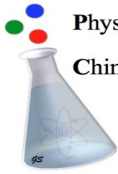
Exemple : Refroidissement d'un fer à cheval

Pour accélérer le refroidissement d'un fer à cheval afin de le poser rapidement sur le sabot, un maréchal-ferrant plonge le fer encore chaud à la température  $\theta_i = 600^\circ\text{C}$  dans un récipient contenant de l'eau à température ambiante  $\theta_e = 15^\circ\text{C}$  que l'on considère comme constante. Estimer la valeur de la durée nécessaire pour que le fer soit refroidi à une température  $\theta_f = 40^\circ\text{C}$  à laquelle l'artisan pourra poser le fer à l'aide de clous sur le sabot du cheval.

Données :  $h_{\text{eau}} = 360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $S_{\text{Fer}} = 293 \text{ cm}^2$ ,  $c_{\text{Fer}} = 440 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $V_{\text{Fer}} = 104 \text{ cm}^3$  et  $\rho_{\text{Fer}} = 7,87 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

$$t_f = -\frac{m_{\text{Fer}} \times c_{\text{Fer}}}{h_{\text{eau}} \times S_{\text{Fer}}} \times \ln\left(\frac{\theta_f - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}\right) \iff t_f = -\frac{\rho_{\text{Fer}} \times V_{\text{Fer}} \times c_{\text{Fer}}}{h_{\text{eau}} \times S_{\text{Fer}}} \times \ln\left(\frac{\theta_f - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}\right)$$

$$\text{AN : } t_f = -\frac{7,87 \times 10^{-3} \times 104 \times 440}{360 \times 293 \times 10^{-4}} \times \ln\left(\frac{40 - 15}{600 - 15}\right) = 1,1 \times 10^2 \text{ s} = 1,8 \text{ min}$$

 Physique Chimie	<b>L'énergie : conversions et transferts</b>	
	<b>- Fiche D5 -</b> <b>Bilan thermique du système Terre-atmosphère</b>	<b>Exercices obligatoires : 7 p 334 – 9 p 335 – 17 p 336 – 24 p 339</b>

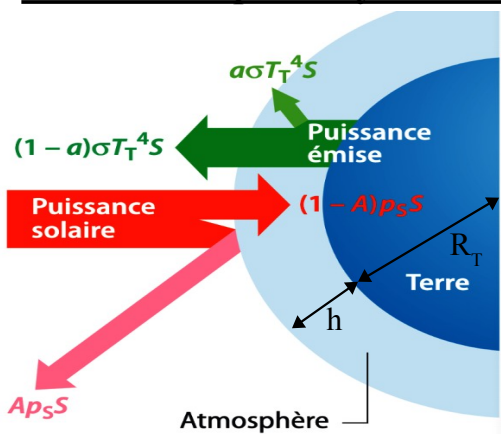
## I-Loi de Stefan-Boltzmann

Un corps noir est un objet idéal qui absorbe la totalité de l'énergie des photons qui frappent sa surface. Un corps noir rayonne de l'énergie thermique. La **puissance thermique rayonnée** par un corps noir de surface  $S$  et de température de surface  $T$ , est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann :

$P_{th,r} = \sigma \times T^4 \times S$	- $P_{th,r}$ : Puissance thermique rayonnée (W) - $T$ : Température de surface (K) - $S$ : Surface ( $m^2$ ) - $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ constante de Stefan-Boltzmann
---	--

La loi de Stefan-Boltzmann peut être aussi donnée pour une **puissance thermique surfacique rayonnée**  $\rho_{th,r}$ , on a alors :  $\rho_{th,r} = \sigma \times T^4 = \frac{P_{th,r}}{S}$  avec  $\rho_{th}$  en  $W \cdot m^{-2}$ .

## II-Bilan thermique du système Terre-atmosphère



Le système Terre-atmosphère est assimilé à une boule de surface  $S$ . Il reçoit une énergie thermique solaire de puissance thermique  $P_{ths} = \rho_s \times S$  avec  $\rho_s = 340 W \cdot m^{-2}$  la puissance thermique surfacique solaire moyenne reçue par le système Terre-atmosphère.

### 1-Prise en compte de l'albédo terrestre :

L'albédo  $A$  est le pouvoir réfléchissant d'une surface, c'est-à-dire le rapport de l'énergie (ou puissance) lumineuse réfléchie à l'énergie lumineuse (ou puissance) incidente. L'albédo est une grandeur sans unité et compris entre 0 et 1.

Le système Terre-atmosphère réfléchit la fraction  $A$  et absorbe la fraction  $(1-A)$  avec  $A$  l'**albédo terrestre moyen** :  $A = 0,34$ .

La puissance thermique  $P_{th,a}$  absorbée par le système Terre-atmosphère vaut donc :  $P_{th,a} = (1-A) \times P_{ths}$  or  $P_{ths} = \rho_s \times S$  soit  $P_{th,a} = (1-A) \times \rho_s \times S$ .

### 2-Prise en compte de l'effet de serre :

La Terre se comporte comme un corps noir de température de surface  $T_T$ . Elle émet donc par rayonnement infrarouge de l'énergie thermique de puissance thermique  $P_{th,rT} = \sigma \times T_T^4 \times S_T$ .

Or  $S_T = 4\pi R_T^2$  et  $S = 4\pi(R_T + h)^2$  or  $h \ll R_T \Leftrightarrow S_T \approx S$

On a donc  $P_{th,rT} = \sigma \times T_T^4 \times S$ .

Afin de prendre en compte l'**effet de serre**, on utilise le coefficient  $a$  appelé **coefficient d'absorption** moyen du rayonnement terrestre dans l'atmosphère. Plus la quantité de gaz à effet de serre est grande dans l'atmosphère, plus le coefficient  $a$  est grand. Actuellement,  $a = 0,45$ .

L'atmosphère terrestre absorbe la fraction  $a$  du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre, seule la fraction  $(1-a)$  du rayonnement terrestre est émise dans le cosmos.

La puissance thermique émise par le système Terre-atmosphère par rayonnement vers le cosmos vaut :

$$P_{th,e} = (1-a) \times P_{th,rT} \quad \text{or} \quad P_{th,rT} = \sigma \times T_T^4 \times S \quad \Leftrightarrow \quad \boxed{P_{th,e} = (1-a) \times \sigma \times T_T^4 \times S}$$

### 3-Température à l'équilibre du système Terre-atmosphère :

A l'équilibre thermique du système Terre-atmosphère, **la puissance thermique solaire absorbée  $P_{th,a}$  par le système Terre-atmosphère est égale à la puissance émise par rayonnement  $P_{th,e}$  :  $P_{th,a} = P_{th,e}$  .**

$$(1-A) \times \rho_s \times S = (1-a) \times \sigma \times T_T^4 \times S \quad \text{soit} \quad T_T = \left( \frac{(1-A) \times \rho_s}{(1-a) \times \sigma} \right)^{1/4} = \left( \frac{(1-0,34) \times 340}{(1-0,45) \times 5,67 \times 10^{-8}} \right)^{1/4} = 291 \text{ K} = 18^\circ \text{C}$$

L'expression obtenue pour la température d'équilibre  $T_T$  du sol terrestre montre que :

-plus l'albédo  $A$  est grand, plus  $T_T$  est petite : la blancheur de la surface terrestre, et donc la présence des glaciers, favorise la diminution de la température ;

-plus le coefficient  $a$  est grand, et donc plus la quantité de gaz à effet de serre est importante, plus  $T_T$  est grande : l'émission de gaz à effet de serre accélère le réchauffement climatique.

Le tableau ci-dessous illustre bien l'influence de  $A$  et  $a$  :

	$A=0$ et $a=0$	$A=0,34$ et $a=0$	$A=0$ et $a=0,45$	$A=0,34$ et $a=0,45$
$T_T$	$5^\circ \text{C}$	$-22^\circ \text{C}$	$50^\circ \text{C}$	$18^\circ \text{C}$

# Tableau périodique

## TABLEAU PÉRIODIQUE

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
I	H 1, 1,0 HYDROGÈNE	He 2, 4,0 HELIUM																	
II	Li 3, 6,9, 4 LITHIUM	Be 4, 9,0 BERYLLIUM																	
III	Na 11, 23,0, 12, 24,3 SODIUM	Mg 12, 24,3 MAGNÉSIMUM																	
IV	K 19, 39,1, 20, 40,1 POTASSIUM	Ca 20, 40,1 CALCIUM	Sc 21, 45,0 SCANDIUM	Ti 22, 47,9 TITANE	V 23, 50,9 VANADIUM	Cr 24, 52,0 CHROME	Mn 25, 54,9 MANGANÈSE	Fe 26, 55,8 FER	Co 27, 58,9 COBALT	Ni 28, 58,7 NICHEL	Cu 29, 63,5 CUVRE	Zn 30, 65,4 ZINC	Ga 31, 69,7 GALLIUM	Ge 32, 72,6 GERMANIUM	As 33, 74,9 ARSENIC	Se 34, 79,0 SÉLÉNIUM	Br 35, 79,9 BROME	Kr 36, 83,8 KRYPTON	
V	Rb 37, 85,5, 38, 87,6 RUBIDIUM	Sr 38, 87,6 STRONTIUM	Y 39, 88,9 YTRIUM	Zr 40, 91,2, 41, 92,9 ZIRCONIUM	Nb 41, 92,9 NIOBIUM	Mo 42, 95,9 MOLYBDÈNE	Tc 43, 98,4 TECHNÉTIUM	Ru 44, 101,1, 45, 102,9 RUTHÉNIUM	Rh 46, 106,4, 47, 107,9 RHODIUM	Pd 47, 106,4, 48, 112,4 PALLADIUM	Ag 48, 107,9 ARGENT	Cd 49, 112,4 CADMIUM	In 49, 114,8 INDIUM	Sn 50, 118,7 ÉTAIN	Sb 51, 121,8 ANTIMOINE	Te 52, 127,6 TELLURE	I 53, 126,9 IODE	Xe 54, 131,3 XÉNON	
VI	Cs 55, 132,9, 56, 137,3 CÉSURIUM	Ba 56, 137,3 BARYUM	La 57, 138,9 LANTHANE	Hf 72, 178,5 HAFNIUM	Ta 73, 180,9 TANTALE	W 74, 183,8 TUNGSTÈNE	Re 75, 186,2 RHÉNIUM	Os 76, 192,2 OSMIUM	Ir 77, 192,2 IRIDIUM	Pt 78, 195,1 PLATINE	Au 79, 197,0 OR	Hg 80, 200,6 MERCURE	Tl 81, 204,4 THALLIUM	Pb 82, 207,2 PLOMB	Bi 83, 209,0 BISMUTH	Po 84, 209 POLONIUM	At 85, 210 ASTATE	Rn 86, 222 RADON	
VII	Fr 87, 223,88 FRANCIUM	Ra 88, 226 RADIUM	Ac 89, 227 ACTINIUM	Rf 104, 261 RUTHÉRFORIUM	Db 105, 262 DUBNIUM	Sg 106, 263 SEABORGIUM	Bh 107, 264 BOHRIUM	Hs 108, 265 HASSIUM	Mt 109, 266 MEITNERIUM	Ds 110, 267 DARMSTADTIUM	Rg 111, 268 ROBERTSIUM	Cn 112, 269 COPERNICIUM	Uut 113, 270 UNUNTRIUM	Fl 114, 271 FLEROVIUM	Uup 115, 272 UNUNPENTIUM	Lv 116, 273 LIVERMORIUM	Uus 117, 274 UNUNSEPTIUM	Uuo 118, 276 OGANESSON	
			Ce 58, 140,1 CÉRIUM	Pr 59, 140,9 PRASÉODYME	Nd 60, 144,2 NÉODYME	Pm 61, 145 PROMÉTHIUM	Sm 62, 150,4 SAMARIUM	Eu 63, 152,0 EUROPYUM	Gd 64, 157,3 GADOLINIUM	Tb 65, 158,9 TERBIUM	Dy 66, 162,5 DYSPROSIUM	Ho 67, 164,9 HOLMIUM	Er 68, 167,3 ERBIUM	Tm 69, 168,9 THULIUM	Yb 70, 173,0 YTBRIUM	Lu 71, 175,0 LUTÉTIUM			
			Th 90, 232,0 THORIUM	Pa 91, 231,0 PROTACTINIUM	U 92, 238,0 URANIUM	Np 93, 237,0 NEPTUNIUM	Pu 94, 244 PLUTONIUM	Am 95, 243 AMÉRICIUM	Cm 96, 247 CURIUM	Bk 97, 247 BERKÉLIUM	Cf 98, 251 CALIFORNIUM	Es 99, 252 EINSTEINIUM	Fm 100, 257 FERMIUM	Md 101, 258 MENDELÉVIUM	No 102, 259 NOBÉLIUM	Lr 103, 262 LAVRENCIUM			

\* Les noms des éléments n'ont pas encore été attribués.

2 — Numéro de la colonne

1,5 — Électronégativité

— Symbole —

— Numéro atomique —

— Masse molaire atomique en g·mol<sup>-1</sup> —

— Nom —

VI

VII