**Suivi d’une transformation chimique-Tableau d'avancement**

|  |
| --- |
| Mots clés :transformation chimique ; réaction chimique ; quantité de matière ; avancement de la réaction ; état initial ; état final ; avancement final ; avancement maximal ; mélange stœchiométrique ; ... |

**I- La transformation chimique.**

1)- Description d’un système chimique.

-          Un système chimique est constitué par l’ensemble des espèces chimiques auxquelles on s’intéresse.

Pour décrire un système chimique, il faut préciser :

-          La nature, la quantité de matière et l’état physique (solide, liquide ou gazeux) des différentes espèces chimiques qui constituent le système.

-          Les conditions de température **T** et de pression **p**.

-          Définition : un système subit une transformation chimique si la nature et (ou) la quantité de matière des espèces chimiques sont différentes à l’état initial et à l’état final.

-          Exemple : Une solution d’acide chlorhydrique (**H +**(aq) + **Cl -**(aq)) réagit avec le magnésium métal.

-        On observe un dégagement gazeux de dihydrogène (**H 2**) et il se forme des ions **Mg  2+** (aq).

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|   | **État initial (E.I)** | **Transformation chimique** | **État final (E.F)** |
| **Espèces****chimiques** | **p** = 1013 hPa**θ** = 20 °C | → | **p** = 1013 hPa**θ** = 20 °C |
| **H+**(aq)      | **n i (H+) =** | **nf (H+)  = ?** |
| **Mg**(s)      | **n i (Mg) =** | **nf (Mg) = ?** |
| **n f (H2)** | **n i (H 2) = 0 mol** | **nf (H2) = ?** |
| **Mg2+**(aq) | **n i (Mg2+) = 0 mol** | **nf (Mg2+) = ?** |
| **Cl -**(aq)      | **n i (Cl-)** | **nf (Cl-) = ni (Cl-)** |
| **H2O (**ℓ) | Large excès : Solvant | Solvant |

-          Lors de la réaction, les ions chlorure sont des ions spectateurs, il ne participe pas à la réaction. D’autre part, l’eau est le solvant, il est en large excès. On ne fera pas de calcul sur l’eau.

2)- La réaction chimique et son équation.

-          La réaction chimique rend compte, à l’échelle macroscopique de l’évolution d’un système subissant une transformation.

-          On représente la réaction chimique par une équation.

-        On note à gauche la formule des réactifs et à droite la formule des produits.

-        Entre les réactifs et les produits, une flèche indique le sens d’évolution du système.

Réactifs         →    Produits

-          Exemple : réaction antre l’acide chlorhydrique et le magnésium :

|  |
| --- |
| **Mg**(s)        +**2 H +**(aq)   →      **Mg2+**(aq) +**H2**(g) |

-          Le coefficient place devant chaque espèce chimique est appelé ; nombre stœchiométrique.

-          Il faut ajuster les nombres stœchiométriques afin de respecter la conservation des éléments chimiques et la conservation de la charge électrique.

-         Par convention, on n’écrit pas le nombre stœchiométrique 1.

-          Les nombres stœchiométriques nous renseignent sur les proportions en quantités de matière.

-          Traduction de la réaction précédente :

-         1 mole de magnésium réagit avec 2 moles d’ions hydrogène pour donner 1 mole d’ions magnésium et 1 mole de dihydrogène gazeux.

**II- Évolution des quantités de matière au cours d’une transformation chimique.**

1)- Étude d’un exemple.

a-  Exemple : la combustion du propane dans le dioxygène donne du dioxyde de carbone et de l’eau. On fait brûler **n1** = 1,0 mole de propane dans **n2**= 3,0 moles de dioxygène. Les conditions de températures et de pression sont les suivantes:**p**=1013 hPa et ****=20 °C.

Formule du propane **C** **3** **H** **8**

-  Donner l’état initial du système chimique.

-  Donner l’état final du système chimique obtenu lorsque la réaction est finie.

b- État initial du système.

|  |
| --- |
| **état initial** **(E.I)**  |
| **p** = 1013 hPa**** = 20 °C  |
| **n i (C** **3** **H** **8) = n** **1** = 1,0 mol |
| **n i (O** **2) = n** **2** = 3,0 mol |
| **n i (CO** **2) =** 0,0 mol |
| **n i (H** **2** **O) =** 0,0 mol |

-  Pour donner l’état final du système chimique, il faut utiliser l’équation de la transformation chimique et réaliser un tableau d’avancement de la réaction.

-  Équation de la réaction :

|  |
| --- |
| **C** **3** **H** **8** (g) + **5 O** **2** (g) → **3**  **CO** **2** (g) + **4 H** **2** **O** (l )  |

-   Traduction : 1 mole de propane réagit avec 5 moles de dioxygène pour donner 3 moles de dioxyde de carbone et 4 moles d’eau.

c- Avancement d’une réaction chimique : **x** (mol).

-   L’avancement **x** d’une transformation chimique est une grandeur exprimée en mole qui permet de décrire l’état du système au cours de la transformation.

-   Il permet d’exprimer les quantités de matière de réactifs et de produits présents dans le système chimique à chaque instant.

-   L’avancement **x** est une quantité de matière. Elle s’exprime en mol.

-   Dans l’état initial, **x =** 0,

-   au cours de la transformation, 0 **≤ x ≤ x max**

-   À l’état final : **x** **=** **x max** (ceci au niveau de la classe de seconde).

d- Tableau d’avancement de la réaction :

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Équation | **C** **3** **H** **8** (g)  | + **5 O** **2** (g)  | →  | **3**  **CO** **2** (g)  | + **4 H** **2** **O** (l )  |
| **État u système**  | **Avancement**  |  |  |  |  |  |
| **État initial (mol)**  | **x =** 0 | **n** **1** = 1,0 mol  | **n** **2** = 3,0 mol  | 0,0  | 0,0  |
| **Au cours de la** **transformation**  | **x**  | 1,0 **- x**  | 3,0 **–** 5 **x**  | 3 **x**  | 4 **x**  |
| **État final (mol)**  | **x = x max**  | 1,0 **– x max**  | 3,0 **–** 5 **x max**  |  | 3 **x max**  | 4 **x max**  |

e- Réactif limitant et avancement maximal.

-   L’avancement maximal **x max** s’obtient en écrivant que les quantités de matière des réactifs restent positives ou nulles.

-   Il permet de déterminer l’état final de la transformation.

-   En général, la réaction s’arrête lorsque l’un des réactifs a été totalement consommé.

-   À l’état final, la quantité de matière du réactif limitant est nulle.

-   Il se peut que lorsque la réaction s’arrête, tous les réactifs soient entièrement consommés.

-    On dit qu’initialement, les réactifs étaient dans les proportions stœchiométriques.

-   Comment peut-on déterminer la valeur maximale de **x** : **x max** ?

-   En fin de réaction, la quantité de matière de chaque réactif est soit positive, soit nulle.

-   En conséquence, on peut écrire deux inéquations :

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  1 **– x ≥** 0  |   | 1 **≥ x ≥** 0 |  |  |
|  **x** ≥ 0 | et  | 0,6 **≥ x ≥** 0  |
| 3 **–** 5 **x ≥** 0   | 3 **≥** 5 **x ≥** 0   |  |

-   En conséquence, l’avancement **x** peut varier entre 0 et 0,6 mol.

-   L’avancement maximal : **x max** **=** 0,6 mol.

-   Le réactif limitant est celui qui disparaît totalement c’est-à-dire celui dont la quantité de matière s’annule pour la plus faible valeur de **x**.

-   L’avancement est maximal lorsque le réactif limitant a totalement disparu : **x max** est la plus petite valeur de **x** pour laquelle la quantité de matière de l’un des réactifs devient nulle.

-   Lorsque la valeur de **x max** est connue, on peut déterminer les quantités de matière des différentes espèces chimiques dans l’état final du système.

-   Il suffit pour cela de rajouter une ligne au tableau.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Équation | **C** **3** **H** **8** (g)  | + **5 O** **2** (g)  | →  | **3**  **CO** **2** (g)  | + **4 H** **2** **O** (l )  |
| **État u système**  | **Avancement**  |  |  |  |  |  |
| **État initial (mol)**  | **x = 0**  | **n** **1** = 1 mol  | **n** **2** = 3 mol  | 0  | 0  |
| **Au cours de la** **transformation**  | **x**  | 1**,0 - x**  | 3**,0 –** 5 **x**  | 3 **x**  | 4 **x**  |
| **État final (mol)**  | **x = x max**  | 1**,0 – x max**  | 3**,0 –** 5 **x max**  |  | **3 x max**  | **4 x max**  |
| **x max** = 0,6 mol  | 0,40 mol  | 0,0 mol |  | 1,8 mol | 2,4 mol |

 f- État final du système :

|  |
| --- |
| **état Final (E.F)**  |
| **p** = 1013 hPa**** = 20 °C  |
| **n f (C** **3** **H** **8)**  = 0,40 mol |
| **n f (O** **2) =**  0,0 mol |
| **n f (CO** **2) =** 1,8 mol |
| **n f (H** **2** **O) =** 2,4 mol |

2- Autre méthode pour la détermination de la valeur de **x max**.

-  On peut déterminer **x max** en traçant les droites représentant les variations des quantités de matière des réactifs en fonction de l’avancement **x** de la réaction.

-  Dans le cas précédent :

|  |
| --- |
| **n**  **(C 3H** **8)**  = 1 **– x**   |
| **n f (O** **2) =**  3 **–** 5 **x**    |

-   Les deux droites coupent l’axe horizontal et **x max** est égal à la plus petite abscisse des deux points d’intersection.

-   Graphe : on peut montrer l’évolution du système grâce à un tableur : ici Excel.





3)- Cas particulier : Le mélange stœchiométrique.

-          Dans certains cas, à la fin de la réaction, tous les réactifs ont été entièrement consommés. On dit que dans l’état initial, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques : le mélange est stœchiométrique.

-          Mélange stœchiométrique de propane et de dioxygène : on parle de mélange détonant.

-          Graphe :



4)- Le bilan de matière.

-          Le bilan de matière d’une transformation chimique donne les quantités de matière des réactifs restants et des produits obtenus à l’état final.

-        À partir de ces quantités de matière, on peut calculer des masses, des concentrations des volumes, des pressions.

**III- Applications.**

1)- Bilan de matière et volume de gaz formé.

-          Énoncé : Le zinc réagit avec l’acide chlorhydrique pour donner un dégagement gazeux de dihydrogène et des ions **Zn 2+**(aq) en solution aqueuse.

-          On fait réagir un volume **V** **1** = 20,0 mL  d’acide chlorhydrique de concentration **C** **1**  = 5,00 mol / L  avec une masse **m** = 0,11 g    de zinc solide

-          On précise que les ions chlorure sont des ions spectateurs et que dans les conditions de l’expérience, le volume molaire **V** **m**  = 24 ,3 L / mol.

-          Données : masse molaire du zinc : **M**(**Zn**) = 65,4 g / mol.

-          Faire un bilan de matière et calculer le volume **V** de dihydrogène obtenu dans les conditions de l’expérience.

-          Comment aborder cet exercice ?

-          Les différentes étapes :

|  |
| --- |
| 1. Écrire l’équation de la réaction.2. Donner l’état initial du système et calculer les quantités de matière des différents réactifs.3. Dresser un tableau d’avancement de la réaction.4. Déterminer la valeur de **x max**.5. Faire le bilan de matière et calculer le volume de dihydrogène obtenu |

-          Résolution :

-          Équation de la réaction :

|  |
| --- |
| **Zn**(s)        +**2 H +**(aq)    →     **Zn  2+**(aq) +**H 2**(g) |

-          État initial et quantité de matière :

|  |
| --- |
| **État initial (E.I)** |
| **Les conditions ne sont pas précisées dans l’énoncé****p** = ?**θ** = ? |
| Quantité de matière de zinc |
| **n i (H +) = C1** .**V1****n i (H +) =**5,00 x 20,0 x 10– 3**n i (H +) =**0,10 mol |
| **n i (H2) =**0,0 mol |
| **n i (Zn 2+) =** 0,0 mol |

-          Tableau d’avancement de la réaction.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Équation | **Zn**(s) | +  **2 H +**(aq) | → | **Zn2+**(aq) | +**H 2**(g) |
| **État u système** | **Avancement** | mol | mol |  | mol | mol |
| **État initial (mol)** | **x = 0** | **ni**(**Zn**) = 1,7 x 10-3 | **ni**(**H +**) = 0,10 | 0 | 0 |
| **Au cours de la****transformation** | **x** | 1,7 x 10-3- **x** | 0,10**–**2**x** | **x** | **x** |
| **État final (mol)** | **x = xmax** | 1,7 x 10-3- **xmax** | 0,10**–**2**xmax** |   | **xmax** | **xmax** |
| **xmax**= |   |  |   |  |  |

-          Pour compléter le tableau, il faut déterminer la valeur de **x max**.

-          On peut calculer les deux valeurs de **x max** en résolvant les deux équations suivantes

|  |  |
| --- | --- |
| HYPOTHÈSE 1 :   | 1,7 x 10–3 **–  x max1**  = 0 |
|  | 0,10 **–** 2 **x max2** = 0 |

-          La valeur retenue pour **x max** est la plus faible des deux valeurs.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 1,7 x 10– 3**–  x max**  = 0 | **** | **x max1**  = 1,7 x 10– 3 mol | **** | **x max**  =**x max1**  = 1,7 x 10– 3 mol |
| 0,10**–**2**x max**  = 0 | **x max2**  = 0,050 mol |

-          Maintenant, on peut compléter le tableau et donner l’état final du système.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Équation | **Zn**(s)        | +**2 H +**(aq) | → | **Zn  2+**(aq)     | +**H 2**(g) |
| **État u système** | **Avancement** | mol | mol |  | mol | mol |
| **État initial (mol)** | **x = 0** | **n** **i** (**Zn**) = 1,7 x 10– 3 | **n** **i** (**H +**) = 0,10 | 0 | 0 |
| **Au cours de la****transformation** | **x** | 1,7 x 10– 3**–  x** | 0,10**–**2**x** | **x** | **x** |
| **État final (mol)** | **x = x max** | 1,7 x 10– 3**–  x max** | 0,10**–**2**x max** |   | **x max** | **x max** |
| **x max**= |   |  |   |  |  |

-          Le zinc métal est le réactif limitant. La réaction s’arrête lorsqu’il est totalement consommé.

-          Volume de dihydrogène obtenu en fin de réaction :

|  |
| --- |
| **V** = **x max** . **V m****V** = 1,7 x 10– 3x 24 ,3**V** **≈** 4,1 x 10– 2 L**V** **≈** 41  mL |

2)- Bilan de matière et pression du gaz formé.

-          Énoncé : L’acide chlorhydrique réagit avec le carbonate de calcium (**Ca CO 3**) pour donner du dioxyde de carbone, de l’eau et des ions calcium (**Ca 2+**) en solution aqueuse. Les ions chlorure sont des ions spectateur et l’eau est le solvant. La réaction se fait à température constante. On donne les caractéristiques de l’état initial du système.

-          On donne : **M** (**C**) = 12,0 g / mol ; **M** (**O**) = 16,0 g / mol ; **M** (**Ca**) = 40,1 g / mol

|  |  |
| --- | --- |
|   | **État initial (E.I)** |
| **Espèces****chimiques** | **p** = 1020 hPa**θ** = 20 °C |
| **H +**(aq)      | **[ H +] i =  0,50 mol / L****V = 40 mL** |
| **Ca CO3**(s)      | **m i (Ca CO 3) = 0,80 g** |
| **Cl -**(aq)      | **Ions spectateur** |
| **H 2O** (ℓ) | Large excès : Solvant |

-          On recueille dans un récipient de volume **V’** = 1,1 L le dioxyde de carbone par déplacement de liquide sur la cuve à eau.

-          Déterminer la valeur de la pression **p’** du dioxyde de carbone dans le récipient.

-          Équation de la réaction :

|  |
| --- |
| **Ca CO 3**(s)  +**2 H +**(aq)    →     **Ca  2+**(aq) +**CO 2**(g) **+ H 2O** (ℓ) |

-          Quantités de matière :

|  |
| --- |
| **Quantité de matière de carbonate de calcium :**1s03ch6 |
| **Quantité de matière d’ions hydrogène****n i (H +) = C** **1**  .**V** **1**  **n i (H +) =**0,50 x 40,0 x 10– 3**n i (H +) =**2,0 x 10– 2 mol |

-          Tableau d’avancement de la réaction.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Équation | **Ca CO 3**(s) | +**2 H +**(aq) | → | **Ca  2+**(aq)   | +**CO 2**(g)  | **+ H 2O** (ℓ) |
| **État du système** | **Avanc.** |  |  |  |  |  |  |
| **État initial (mol)** | **x = 0** |  8,0 x 10– 3 | 2,0 x 10– 2 | 0 | 0 | Excès |
| **Au cours de la****Trans.** | **x** | 8,0 x 10– 3**–  x** | 2,0 x 10– 2**–**2**x** | **x** | **x** | Excès |
| **État final (mol)** | **x = x max** | 8,0 x 10– 3**–  x max** | 2,0 x 10– 2**–**2**x max** |   | **x max** | **x max** | Excès |
| **x max** = |   |  |   |  |  | Excès |

-          La valeur retenue pour **x max** est la plus faible des deux valeurs.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 8,0 x 10– 3**–  x max**  = 0 | **** | **x max1**  = 8,0 x 10– 3mol | **** | **x max**  =**x max1**  = 8,0 x 10– 3mol |
| 2,0 x 10– 2**–**2**x max**  = 0 | **x max2**  = 1,0 x 10– 2mol |

-          Conclusion le carbonate de calcium est le réactif limitant. Les ions hydrogène ont été introduit en excès.

-          Tableau final :

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Équation | **Ca CO 3**(s) | +**2 H +**(aq) | → | **Ca  2+**(aq) | +**CO 2**(g) **+ H 2O** (ℓ) |
| **État du système** | **Avanc.** |  |  |  |  |  |  |
| **État initial (mol)** | **x = 0** |  8,0 x 10– 3 | 2,0 x 10– 2 | 0 | 0 | Excès |
| **Au cours de la****Trans.** | **x** | 8,0 x 10– 3**–  x** | 2,0 x 10– 2**–**2**x** | **x** | **x** | Excès |
| **État final (mol)** | **x = x max** | 8,0 x 10– 3**–  x max** | 2,0 x 10– 2**–**2**x max** |   | **x max** | **x max** | Excès |
| **x max** = | 0 | 4,0 x 10– 3 |   | 8,0 x 10– 3 | 8,0 x 10– 3 | Excès |

-          Pression du dioxyde de carbone.

-          On peut considérer que le dioxyde de carbone se comporte comme un gaz parfait.

-          On peut utiliser la relation suivante : **p** **V** = **n** **R** **T**

- 