

# L'Hydrogène

## Cours



## Chimie Minérale Descriptive



Saliha Guermouche - Chérifa Rabia

Editions Al-Djazair

Saliha Guermouche  
USTHB

Chérifa Rabia  
USTHB

# Hydrogène

## Chimie Minérale Descriptive

Cours

Editions Al-Djazair

# **SOMMAIRE**

## **Chapitre I : L'HYDROGENE**

### **I. Introduction**

#### **I.1 Isotopes**

#### **I.2 L'hydrogène solide**

### **II. Caractéristiques**

### **III. Composés chimiques**

#### **III.1 Hydrures ioniques**

#### **III.2 Composés d'insertion**

#### **III.3 Composés non métalliques**

### **IV. Propriétés acido-basiques et redox**

#### **IV. 1 Propriétés acido-basiques**

#### **IV.2 Propriétés redox**

### **V. Applications**

### **VI. Production**

# L'HYDROGENE

## I. Introduction

L'hydrogène, gaz inodore et incolore, a été découvert en 1671 par Boyle. Cavendish a étudié ses propriétés et Lavoisier lui a donné le nom hydrogène. C'est l'élément le plus abondant de l'Univers : 75 % en masse et 92 % en nombre d'atomes. Il est présent en grande quantité dans les étoiles, les planètes gazeuses. Il est également le principal composant des nébuleuses et du gaz interstellaire. Les nuages de dihydrogène sont à la base du processus de la formation des étoiles.

Dans la croûte terrestre, l'hydrogène ne représente que 0,22 % des atomes, loin derrière l'oxygène (47 %) et le silicium (27 %). Il est également rare dans l'atmosphère terrestre, ne représentant en volume que 0,55 ppm des gaz atmosphériques. Sur Terre, la source la plus connue d'hydrogène est l'eau dont la molécule est constituée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. L'hydrogène est surtout le principal constituant (en nombre d'atomes) de toute matière vivante et représente 63 % des atomes du corps humain. Il est associé au carbone dans tous les composés organiques.

### I.1 Isotopes

L'hydrogène possède plusieurs isotopes avec des noms spécifiques en raison de leur masse qui passe du simple ( $^1\text{H}$ ) au double ( $^2\text{H}$ ) ou au triple ( $^3\text{H}$ ) (figure 1):

- l'hydrogène léger ou protium ( $^1\text{H}$ ) est le plus abondant (~99,98 %). C'est un isotope stable constitué uniquement d'un proton,
- le deutérium ( $^2\text{H}$  ou D) est beaucoup moins abondant (~0,015 %) et représente 0,0184 à 0,0082 % de l'hydrogène naturel. C'est un isotope stable constitué d'un proton et d'un neutron. Il est essentiellement présent sur Terre sous forme d'eau deutérée HDO (eau demi-lourde).
- le tritium ( $^3\text{H}$  ou T), instable, est le seul isotope radioactif de l'hydrogène. Il est constitué d'un proton et de deux neutrons, et n'est présent qu'en infime quantité (un atome de tritium pour  $10^{18}$  atomes d'hydrogène). Il peut se transformer en  $^3\text{He}$  par

émission d'un électron (radioactivité  $\beta^-$ ).  $^2\text{H}$  et  $^3\text{H}$  peuvent participer à des réactions de fusion nucléaire.

- le quaternium ou le tétradium ( $^4\text{H}$  ou Q) est l'isotope le plus instable. Il émet des neutrons. Sa demi-vie est très courte ( $1,39 \cdot 10^{-22}$  secondes).
- l'hydrogène 7 est l'isotope le plus riche en neutrons. Sa demi-vie est de l'ordre de  $10^{-21}$  secondes.

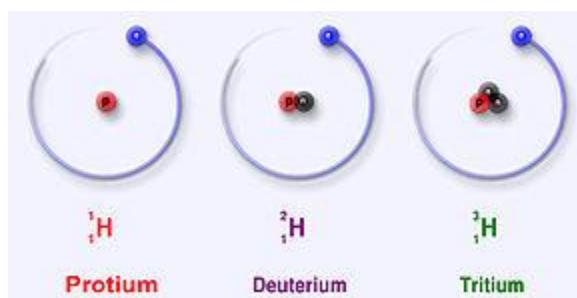


Figure 1 : Isotopes de l'hydrogène

## I.2 L'hydrogène solide

L'hydrogène solide est obtenu en diminuant la température en dessous du point de fusion de l'hydrogène ( $-259,14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). L'état solide a été obtenu pour la première fois en 1899 par J. Dewar.

L'hydrogène métallique est une phase de l'hydrogène qui survient lorsqu'il est soumis à une très forte pression (autour de 400 GPa) et à de très basses températures.

## II. Caractéristiques

L'hydrogène, de symbole H et de numéro atomique 1 ( $1s^1$ ) appartient au sous-groupe IA (ou 1<sup>er</sup> groupe). C'est l'élément chimique le plus simple, avec un proton et un électron. Le tableau 1 présente certaines caractéristiques de l'atome d'hydrogène.

Tableau 1 : Caractéristiques de l'atome d'hydrogène

Numéro atomique	1
Masse atomique	1,00794
R covalent (Å)	0,37
Electronégativité de Pauling	2,2
Energie d'ionisation (kJ.mol <sup>-1</sup> )	1311
Affinité électronique (kJ.mol <sup>-1</sup> )	72,8
Température de Fusion (°C)	-259,2
Température d'ébullition (°C)	-252,8
Longueur de liaison (Å) (H <sub>2</sub> )	0,74
Energie de Liaison (H <sub>2</sub> ) (kJ.mol <sup>-1</sup> )	435
Solubilité dans l'eau (l/l)	0,0185

### III. Composés chimiques

A la température ambiante, l'hydrogène n'est pas très réactif, à moins qu'il ne soit activé, par un catalyseur approprié. A des températures élevées, il est fortement réactif. Trois processus électroniques contrôlent la chimie de l'hydrogène : l'ionisation (H<sup>+</sup>), la réduction (H<sup>-</sup>) et la formation d'une seule liaison covalente due à la présence d'un seul électron.

L'hydrogène avec une électronégativité moyenne de 2,2 peut se combiner avec les métaux pour donner des hydrures, les métaux de transition pour donner des composés d'insertion et les non-métalliques pour former des composés covalents.

### III.1 Hydrures ioniques

L'ion  $H^-$  donne des hydrures ioniques de formule  $MH$  avec les alcalins et de formule  $MH_2$  avec les alcalino-terreux. Les hydrures sont des solides cristallisés blancs de structure type  $NaCl$ . Ils sont obtenus par synthèse directe à hautes températures (200-500°C).

### III.2 Composés d'insertion

Avec les éléments de transition, les atomes d'hydrogène s'insèrent dans les sites interstitiels tétraédriques et/ou octaédriques de la structure de l'élément métallique. On obtient ainsi des solutions solides (alliages). Le palladium peut absorber de l'hydrogène jusqu'à 900 fois son propre volume à température ambiante. C'est un réservoir d'hydrogène qui peut être utilisé comme une pile.

### III.3 Composés non métalliques

Dans les composés covalents, l'hydrogène forme une seule liaison avec les non-métaux. Les composés les plus abondants sont la molécule d'hydrogène ( $H_2$ ), la molécule d'eau ( $H_2O$ ) et les composés organiques (l'hydrogène est lié aux atomes de carbone, oxygène et azote). Avec les halogènes ( $X$ ), l'hydrogène forme des hydracides de formule  $HF$ ,  $HCl$ ,  $HBr$  et  $HI$ . Avec certains non-métaux (éléments du bloc p) et l'oxygène, il forme des oxoacides de formule  $X(OH)_mO_n$  (formules usuelles :  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ,  $H_3PO_4$ ,  $HClO_4$ ...).

L'hydrogène lié à un atome électronégatif A peut être également lié à un autre atome électronégatif B par l'intermédiaire d'une liaison appelée liaison hydrogène (A et B appartenant à la deuxième période peuvent être l'oxygène, l'azote ou le fluor). La liaison hydrogène est une interaction électrostatique secondaire (figure 2). L'atome B doit posséder au moins une paire d'électrons libres pouvant agir comme une base :  $A^{\delta-} - H^{\delta+} \cdots :B$ . Cette liaison joue un rôle important en chimie organique.

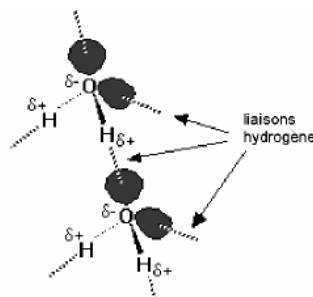


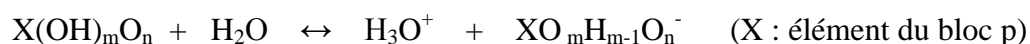
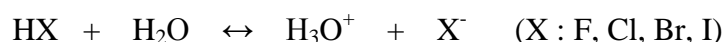
Figure 2 : Liaisons hydrogène entre les molécules d'eau

## IV. Propriétés acido-basiques et redox

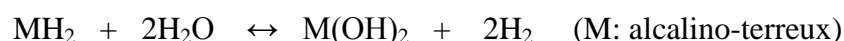
### IV.1 Propriétés acido-basiques

L'atome d'hydrogène peut perdre son unique électron pour donner l'ion hydrogène  $H^+$ . Ce dernier représente le noyau de l'atome d'hydrogène d'où l'appellation « proton » pour désigner l'ion hydrogène  $H^+$ . Son rayon est très petit, environ  $1,5 \cdot 10^{-15}$  m contre  $5,0 \cdot 10^{-11}$  m pour l'atome. L'ion  $H^+$  n'existe pas à l'état libre. Il est toujours lié au nuage électronique d'une molécule possédant des doublets d'électrons libres. En solution aqueuse, il est solvaté sous forme  $H_3O^+$  (ion oxonium).

En solution aqueuse, les halogénures d'hydrogène et les oxoacides ont des propriétés acides :



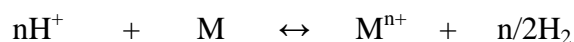
En solution aqueuse, les hydrures ont des propriétés basiques :





## IV.2 Propriétés redox

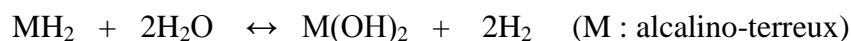
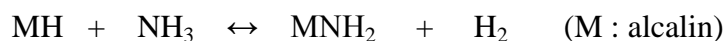
L'ion hydrogène  $H^+$  a des propriétés oxydantes. En solution, il peut oxyder certains métaux M (zinc, fer) en ion métallique  $M^{n+}$ :



L'hydrogène a des propriétés réductrices, à haute température, il peut réduire les oxydes métalliques, MO en métal M :



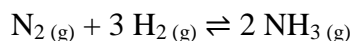
Les hydrures ont des propriétés basique et réductrice :



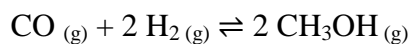
## V. Applications

L'hydrogène est utilisé dans plusieurs procédés :

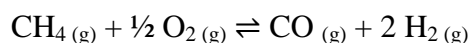
synthèse de l'ammoniac : « procédé *Haber* (1909) ». En pratique, la réaction est effectuée à une température élevée ( $\sim 450^\circ\text{C}$ ) et haute pression (250 atm) pour permettre d'obtenir une quantité appréciable d'ammoniac dans un temps satisfaisant.



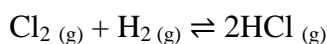
- synthèse du méthanol : la réaction est réalisée en présence de catalyseur Cu-Zn-O/ $Al_2O_3$  à une pression de 5 à 10 MPa (50 à 100 atmosphères) et une température de  $250^\circ\text{C}$ .



Le mélange gazeux CO et H<sub>2</sub> appelé « gaz de synthèse » est produit à partir de l'oxydation du méthane:



- synthèse de l'acide chlorhydrique : l'hydrogène et le chlore sont mis dans une chambre de combustion où ils réagissent en présence d'une flamme qui permet d'atteindre une température supérieure à 2000°C. L'absence d'humidité dans les réactifs est primordiale, pour éviter la corrosion de l'installation. Par précaution, on utilise une installation en silice ou en graphite. Un léger excès d'hydrogène (1-2%) est utilisé pour éliminer toute trace de chlore. HCl(g) est ensuite barboté dans l'eau.



- pile à combustible : elle est constituée de deux électrodes (figure 3), à l'anode (pôle négatif de la pile) l'hydrogène subit une oxydation ( $\text{H}_2 \leftrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ ) et l'oxygène intervenant au niveau de la cathode (pôle positif de la pile), subit une réduction ( $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{O}^{2-}$ ). Cette réaction nécessite un catalyseur, en général du platine. La réaction chimique ( $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$ ) produit de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. L'eau est évacuée sous forme de vapeur avec l'excès de l'oxygène moléculaire. La molécule d'hydrogène, combustible propre, est une source d'énergie d'avenir

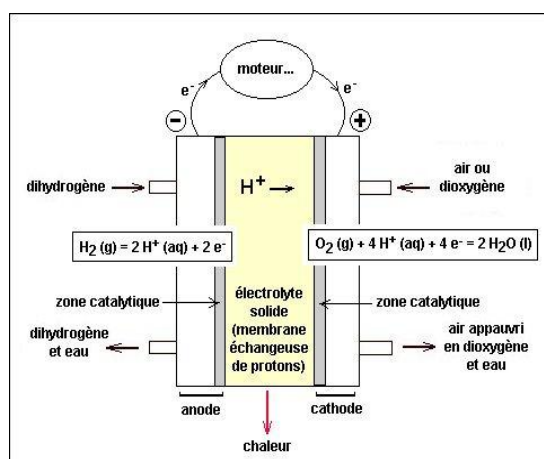


Figure 3 : Schéma d'une pile à combustible

On peut utiliser un électrolyte alcalin (M<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ou NaOH), acide (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) ou une membrane protonique (H<sup>+</sup>) ou anionique (OH<sup>-</sup>). La membrane échangeuse de protons bloque le passage

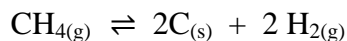
des électrons et laisse passer les ions  $H^+$ . La puissance dans ces piles varie entre 10 et 250MW. On peut également utiliser un réservoir d'hydrogène, constitué de MH (M : élément de transition) qui fournit l'hydrogène moléculaire stocké dans les interstices du réseau.  $H_2$  subit une oxydation à l'anode et  $O_2$  intervenant au niveau de la cathode subit une réduction, il y a ainsi formation d'eau.

- hydrogénation des composés organiques : alcènes et alcynes
- carburant pour fusées, utilisé dans les ballons, il est 14 fois plus léger que l'air,
- le deutérium (D) est utilisé comme modérateur dans les centrales nucléaires pour ralentir les neutrons, dans les études mécanistiques de réactions (traceur isotopique, la présence de D ralentit la vitesse de réaction), comme solvants en spectroscopie de résonance magnétique nucléaire, RMN (les atomes de deutérium ne sont pas détectés en RMN) et dans les études spectroscopiques, en Infra-rouge (IR), les H n'ont pas la même fréquence de vibration que les D.
- le tritium ( $^3H$ ) est utilisé dans la construction de bombes atomiques, comme traceur radioactif (métabolisme de médicaments), dans les études hydrologiques (mouvements des eaux souterraines).

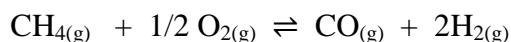
## VI. Production

L'hydrogène peut être produit à partir de :

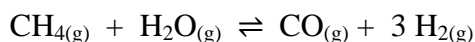
- la décomposition thermique du méthane :



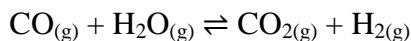
- l'oxydation ménagée du méthane par l'oxygène moléculaire:



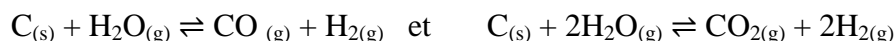
- l'oxydation ménagée du méthane par l'eau :



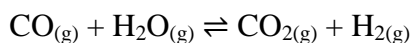
Entre 900 et 1000 °C, la réaction est rapide et pratiquement totale. Dans une seconde étape, on obtient encore plus d'hydrogène en faisant réagir le CO formé avec l'eau (réaction de Water Gas Shift) :



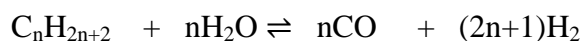
- l'oxydation du coke par l'eau :



- l'oxydation de l'oxyde de carbone par l'eau :



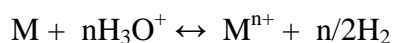
- l'oxydation des alcanes par l'eau :



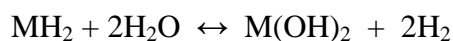
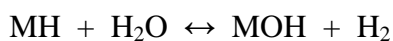
Toutes ces réactions nécessitent la présence d'un catalyseur, généralement à base de nickel, et une température élevée (500-900°C).

L'hydrogène peut être également produit par :

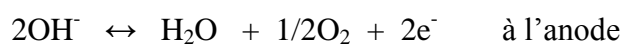
- action d'un acide sur un métal:



- action de l'eau sur un hydrure métallique:



- électrolyse de l'eau :



La réaction globale est la suivante :  $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$

L'électrode utilisée est généralement en nickel.

Titres du même auteur :

Chimie Minérale Descriptive :

- L'hydrogène ~ Editions Al-Djazair Octobre 2013
- Les alcalins et les alcalino-terreux ~ Editions Al-Djazair Octobre 2013
- Les halogènes ~ Editions Al-Djazair Octobre 2013
- L'oxygène, l'ozone, et les peroxydes ~ Editions Al-Djazair Octobre 2013
- Le soufre et l'acide sulfurique ~ Editions Al-Djazair Octobre 2013
- L'azote et l'acide nitrique ~ Editions Al-Djazair Octobre 2013
- Le silicium ~ Editions Al-Djazair Octobre 2013

Copyright Editions El-Djazair — Octobre 2013  
13, rue des frères Boulahdour  
16000 Alger-Algérie

---

---

Cet ouvrage est soumis au copyright. Le présent ouvrage présent sur le site web et à son contenu appartient aux Editions El-Djazair.  
Le présent site web et son contenu, que ce soit en tout ou en partie, ne peuvent être reproduits, publiés, affichés, téléchargés, modifiés, utilisés en vue de créer des œuvres dérivées ou reproduits ou transmis de toute autre façon par tout moyen électronique connu ou inconnu à la date des présentes sans l'autorisation écrite expresse des Editions El-Djazair  
Les actes ci-dessus sont des infractions sanctionnées par le Code de la propriété intellectuelle Algérienne.