

05 ماي 2024

المسيلة في :

رقم: 2024/GE/136

شهادة إدارية بخصوص مطبوعة الدروس الخاصة بالأستاذ قماش عبد الرزاق

بناءً على محضر اللجنة العلمية لقسم الهندسة الكهربائية رقم 2024/107 المنعقد بتاريخ 04 مارس 2024 والمتضمن تعيين الخبراء: الأستاذ كحول فارس أستاذ بجامعة المسيلة، الأستاذ حمزيوي لونس أستاذ بجامعة المسيلة والأستاذ شافعي نجيب أستاذ محاضر " أ " بجامعة سطيف 01 وذلك لتقييم مطبوعة الدروس الخاصة بالأستاذ قماش عبد الرزاق أستاذ محاضر " أ " بجامعة المسيلة تحت عنوان " *Système énergétique de chimie d'hydrogène* " وبعد إطلاع رئيس اللجنة العلمية ورئيس القسم على التقارير الواردة و التي كانت كلها ايجابية، وعليه فإن اللجنة لا ترى مانعا أن تتخذه سندا في تدريس طلبة السنة الأولى ماستر هيدروجين أخضر، شعبة طاقات متجددة ميدان علوم و تكنولوجيا و أن تعتمد في أي تقييم للمسار العلمي للأستاذ المعني.

رئيس القسم
أ. د. زغلاش سمير

رئيس اللجنة العلمية
أ. د. بوقرة عبد الرحمان



Avant-propos

Ce polycopié répond au canevas ministériel de cours Systèmes énergétiques et chimie de l'hydrogène enseigné en première année Master I Professionnalisant Semestre 1, filière énergies renouvelables en génie électrique, spécialité Master Hydrogène Vert Vecteur d'Energie. L'hydrogène vert est de l'hydrogène produit à partir d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne ou l'hydroélectricité. L'hydrogène vert est souvent présenté comme une alternative aux hydrocarbures fossiles, et comme un levier pour faire baisser les émissions de gaz à effet de serre de certains secteurs (industrie, transports, etc.). L'hydrogène ainsi produit peut alors être stocké et utilisé comme un « vecteur énergétique » dans différentes applications. On peut utiliser l'hydrogène dans une pile à combustible, on peut aussi utiliser l'hydrogène pour remplacer les énergies fossiles dans des applications industrielles. L'un des intérêts majeurs de l'hydrogène vert, c'est qu'il constitue un vecteur énergétique ou une source d'énergie relativement écologique. Dans les faits, l'impact écologique de l'hydrogène vert est encore largement controversé. En effet, le rendement de la production d'hydrogène étant très faible, il faut consommer énormément d'électricité pour produire de l'hydrogène par électrolyse.

Le but de ce polycopié est de fournir à l'étudiant l'ensemble des procédés visant à la production de l'hydrogène, dans ses aspects techniques, technologiques et économiques.

Dans la première partie de l'ouvrage, on y trouve les informations indispensables sur les systèmes énergétiques et les différentes formes d'énergies

Dans une deuxième partie, sont exposés des généralités sur la chimie de l'hydrogène et les différents procédés de production de l'hydrogène et les différentes formes de stockages d'énergies

Dans la troisième partie les différents réseaux de distribution d'énergie. Le quatrième et le cinquième sont réservés aux évaluations des systèmes énergétiques et aux intégrations des énergies renouvelables. Le dernier chapitre est concentré à la modélisation des systèmes énergétiques.

Mots-clés : Introduction aux systèmes énergétiques, Chimie de l'hydrogène, Les réseaux de distribution d'énergie, Évaluation des systèmes énergétiques, Intégration des énergies renouvelables, La modélisation des systèmes énergétiques

Matière d'enseignement

Unité d'enseignement : UEF 1.1.2

Matière : Systèmes énergétiques et chimie de l'hydrogène

VHS: 45h00 (Cours : 1h 30, TD : 1h 30)

Crédits : 4

Coefficient : 2

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie

Département Génie électrique



Polycopié de cours

En Hydrogène Vert Vecteur d'Energie

Systemes énergétiques et chimie de l'hydrogène

Unité : UEF 1.1.2

Niveau : Master I (S1)

Dr :Guemache Abderezak

Année Universitaire : 2023/2024

Avant-propos

Ce polycopié répond au canevas ministériel de cours Systèmes énergétiques et chimie de l'hydrogène enseigné en première année Master I Professionnalisant Semestre 1, filière énergies renouvelables en génie électrique, spécialité Master Hydrogène Vert Vecteur d'Energie. L'hydrogène vert est de l'hydrogène produit à partir d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne ou l'hydroélectricité. L'hydrogène vert est souvent présenté comme une alternative aux hydrocarbures fossiles, et comme un levier pour faire baisser les émissions de gaz à effet de serre de certains secteurs (industrie, transports, etc.). L'hydrogène ainsi produit peut alors être stocké et utilisé comme un « vecteur énergétique » dans différentes applications. On peut utiliser l'hydrogène dans une pile à combustible, on peut aussi utiliser l'hydrogène pour remplacer les énergies fossiles dans des applications industrielles. L'un des intérêts majeurs de l'hydrogène vert, c'est qu'il constitue un vecteur énergétique ou une source d'énergie relativement écologique. Dans les faits, l'impact écologique de l'hydrogène vert est encore largement controversé. En effet, le rendement de la production d'hydrogène étant très faible, il faut consommer énormément d'électricité pour produire de l'hydrogène par électrolyse.

Le but de ce polycopié est de fournir à l'étudiant l'ensemble des procédés visant à la production de l'hydrogène, dans ses aspects techniques, technologiques et économiques.

Dans la première partie de l'ouvrage, on y trouve les informations indispensables sur les systèmes énergétiques et les différentes formes d'énergies

Dans une deuxième partie, sont exposés des généralités sur la chimie de l'hydrogène et les différents procédés de production de l'hydrogène et les différentes formes de stockages d'énergies

Dans la troisième partie les différents réseaux de distribution d'énergie. Le quatrième et le cinquième sont réservés aux évaluations des systèmes énergétiques et aux intégrations des énergies renouvelables. Le dernier chapitre est concentré à la modélisation des systèmes énergétiques

Matière d'enseignement

Unité d'enseignement : UEF 1.1.2

Matière : Systèmes énergétiques et chimie de l'hydrogène

VHS: 45h00 (Cours : 1h 30, TD : 1h 30)

Crédits : 4

Coefficient : 2

Sommaire	i
Liste des abréviations	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv

Chapitre I. Introduction aux systèmes énergétiques

I.1.Définition / énergie.....	1
I.1.2.Les différentes formes d'énergies.....	2
I.1.3.Définitions – Conditions – Expressions.....	2
I.1.4.Variation de l'énergie potentielle.....	2
I.1.5.Mesure de l'énergie.....	3
I.1.5.1.Unité d'énergie.....	3
I.1.5.2.Principe de conservation.....	4
I.1.5.3.Principe de dégradation.....	4
I.1.6.Puissance	5
I.1.6.1.Unité de puissance.....	6
I.2.Les modes de production de l'énergie électrique.....	7
I.3 Les défis associés à la transition énergétique.....	8
I.4.Exercice d'application	9

Chapitre II : Chimie de l'hydrogène

II.1. Introduction sur l'hydrogène	11
II. 2.Caractéristiques d'hydrogène0.....	12
II. 3.Comment est stocké l'hydrogène.	14
II.4.La production de l'hydrogène.....	16
II.5.Les procédés de production de l'hydrogène par vaporeformage.....	20
II.6.Le stockage de l'énergie.....	25
II.7.Productions d'hydrogène, vertes	28
II.8.Application d'exercices.....	30

Chapitre III : Les réseaux de distribution d'énergie

III.1. Les réseaux de distribution d'énergie.....	37
III.2. Les modes de transfert de chaleur existants.....	38
III.3. Application d'exercices.....	40

Chapitre IV : Évaluation des systèmes énergétiques

IV .Les outils d'évaluation	42
IV.2. A quoi sert une ACV	42
IV.3. Les critères d'évaluation (coût, durabilité, impact environnemental).....	43
IV.4. Application d'exercices.....	45

Chapitre V : Intégration des énergies renouvelables

V.1. Les sources d'énergie renouvelable (solaire, éolien, hydraulique).....	47
V.1.1. Les différentes énergies renouvelables.....	47
V.1.1.2. L'énergie hydraulique.....	48
V.1.1.3. L'énergie éolienne.....	49
V.1.1.4. La biomasse.....	50
V.1.1.5. L'énergie de la Terre ou géothermie.....	51
IV.2. Application d'exercices	52

Chapitre VI : La modélisation des systèmes énergétiques

VI.1. Démarche de la modélisation et éléments structurants.....	54
VI.2. Méthode de résolution.....	55
VI.3. Les paradigmes de modélisation.....	56
VI.4. La modélisation des systèmes énergétiques	56
Références bibliographiques	

Liste des abréviations

Ec : potentiel d'hydrogène

Epp: Degré hydrotimétrique

Ep_A : Demande biologique en oxygène

W : Demande chimique en oxygène

Cal : Rayonnement ultra violet

BTU : British Thermal Unit

TNT : Temps

η : Le Rendement

P: la puissance

E₀ : le potentiel standard

ΔG : Enthalpie libre

ΔG[°] : Enthalpie libre molaire

ΔH : Enthalpie de formation

ΔS : Entropie

R : Constante des gaz parfait

UN =Numéros ONU

Liste des figures

Figure I.1 : Les différentes formes d'énergies	1
Figure I.2 Les différents types de centrales électriques	7
Figure II.1 : Hydrogène	11
Figure II.2 : L'hydrogène aux couleurs de l'arc-en-ciel	14
Figure II.3 : Le cycle d'hydrogène	16
Figure II.4 Sources primaires d'hydrogène et méthodes de production.....	17
Figure II.5 : Cellule d'électrolyse.....	18
Figure II.6 Schéma du montage expérimental utilisé pour l'électrolyse de l'eau.....	19
Figure II.7 : Vaporeformage de l'hydrogène.....	21
Figure II.8 : Procédés de production de l'hydrogène par pyrolyse.....	22
Figure II.9 : Production d'hydrogène refroidis à eau	23
Figure II.10 : Production d'hydrogène par procédés biologiques.....	24
Figure II.11 : Méthodes biologiques de production d'hydrogène.....	24
Figure II.12 : Le stockage et la distribution d'hydrogène.....	26
Figure II.13 : Procèdes de production et applications de l'hydrogène.....	27
Figure III .1 : Réseaux électriques.....	37
Figure III.2 : Réseaux de gaz naturel.....	38
Figure III.3 : Les installations géothermiques.....	39
Figure IV.1 : L'Analyse de cycle de vie d'un produit.....	42
Figure IV : 2 Les étapes d'une ACV.....	43
Figure V.1 : Panneaux solaire.....	47
Figure V.2 : Barrage Hydroélectrique.....	48
Figure V.3 : Energie éolienne.....	49
Figure V.4 : Energie biomasse.....	50

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Nature de l'énergie.....	3
Tableau I.2 : Unités usuelles des différentes énergies	4
Tableau II.1 : Comparaison des méthodes biologiques de production de l'hydrogène	25
Tableau II.2 : Stockage de l'énergie, aspect fondamentaux	26
Tableau II.3 - Sources, besoins énergétiques et émissions dans les différents procédés de production d'hydrogène.....	29
Tableau I.5 : Métaux de contaminations destinées à la consommation humaine.....	6
Tableau I.6 : Substances toxiques.....	7
Tableau IV.1 : Classement des paramètres de qualité d'une eau de consommation.....	32
Tableau IV.2 : Les taux relatifs aux normes de rejet des effluents.....	33
Tableau IV.3 : Valeurs limites des paramètres de rejets défluent liquides industriels	35
Tableau IV.4 : Normes Internationales OMS des rejets liquides.....	36

Chapitre I. Introduction aux systèmes énergétiques

I.1. Définition : énergie

Les physiciens adoptent le terme d'énergie pour indiquer une capacité à modifier un état ou à produire un travail entraînant un mouvement ou produisant un rayonnement électromagnétique - de la lumière, par exemple - ou de la chaleur. Le mot vient d'ailleurs du grec et signifie « force en action »

On appelle énergies primaires, les énergies directement accessibles dans la nature : énergies fossiles, énergie nucléaire et énergies renouvelables, ces énergies constituant le « mix énergétique ».

I.1.2. Les différentes formes d'énergies

- L'énergie mécanique;
- L'énergie thermique;
- L'énergie radiative ou lumineuse;
- L'énergie chimique;
- L'énergie électrique;
- L'énergie nucléaire;
- Les énergies primaires;
- Les énergies secondaires.

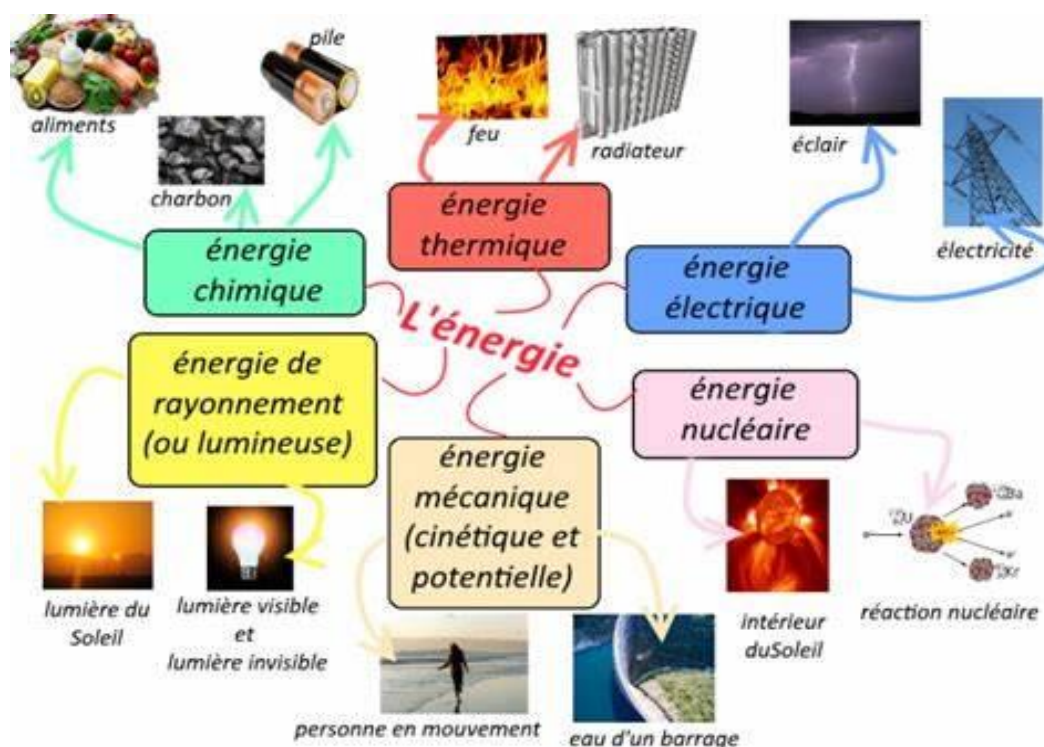


Figure I.1 : Les différentes formes d'énergies

I.1.3. Définitions – Conditions – Expressions

1/L'énergie mécanique: d'un solide est la somme de son énergie cinétique (due à sa vitesse et à sa masse) et son énergie potentielle (due à sa position en altitude, à la gravitation planétaire et à sa masse).

2/ L'énergie cinétique : est le demi-produit de sa masse M par le carré de sa vitesse v^2 à une date (instant) donnée et dans un référentiel galiléen préalablement choisi.

$$E_c = 1/2 M V^2$$

3/L'énergie potentielle de pesanteur : est le produit de sa masse M par l'intensité g de la pesanteur planétaire et par l'altitude h ou z définie sur l'axe vertical orienté vers le haut.

$$E_{pp} = M.g.h$$

$$\text{ou } E_{pp} = M.g.z$$

En général, $z = h + \text{constante}$ (altitude du sol).

$$\text{ou } E_{pA} = M.g.z_A$$

On dira que l'énergie potentielle est définie à une constante près.

A étant la position du centre d'inertie du solide étudié à un instant donné.

E_{pA} : L'énergie cinétique est une grandeur arithmétique (sans signe) alors que l'énergie potentielle est une grandeur algébrique (peut prendre des valeurs négatives)

I.5. Conservation de l'énergie mécanique

En chute libre verticale ou parabolique dans l'air, si les vitesses ne dépassent pas quelques mètres par seconde, l'énergie mécanique reste quasi-constante.

Si on constate une baisse de l'énergie mécanique, cette variation négative est due au travail des forces de frottement dans l'air qui ne sont plus négligeables pour des vitesses suffisamment élevées. Cette variation est négative car ces forces de frottement sont résistantes et effectuent par conséquent un travail négatif appelé aussi abusivement « travail résistant ».

Au contraire, si on constatait une augmentation d'énergie mécanique, cette variation positive serait due à l'apparition de nouvelles forces qui ne pourraient être que des forces motrices effectuant un travail positif appelée abusivement « travail moteur ».

E_{pA} : On constate donc une « logique » de correspondance de signe entre la variation d'énergie mécanique et le travail de toute force nouvelle apparaissant en plus du poids du solide chutant librement. En effet, la chute libre n'a de sens que si le solide est abandonné à lui-même en étant seulement en interaction à distance avec sa planète (la terre pour nous).

I.1.4. Variation de l'énergie potentielle

- ✓ Si un solide est mouvement dans un référentiel galiléen, à altitude constante, E_p ne varie pas.
- ✓ Si, des positions A en B, il s'élève en altitude, E_p augmente : $E_p^B - E_p^A > 0$ et $\Rightarrow W_{AB}(\mathbf{P}) < 0$
- ✓ Si, des positions A en B, il s'abaisse en altitude, E_p diminue : $E_p^B - E_p^A < 0$ et $W_{AB}(\mathbf{P}) > 0$

Travail du poids : $W_{AB}(\mathbf{P}) = M.g.(z_A - z_B)$ et $\Delta E_p = E_p^B - E_p^A = M.g.z_B - M.g.z_A =$

$M.g.(z_B - z_A)$. Pendant le mouvement du solide, le travail de son poids est opposé à sa variation d'énergie potentielle.

I.1.5.Mesure de l'énergie.

Nous pouvons mesurer une quantité d'énergie quelconque par la quantité de chaleur que l'on obtiendrait en la transformant intégralement en énergie thermique.

Cette quantité de chaleur sera exprimée en Calories (cal).

I.1.5.1.Unité d'énergie.

La calorie est une unité « hors système international » et doit être abandonnée au profit de l'unité légale .Cependant, elle est encore très utilisée pour les quantités de chaleur, il faut donc la connaître :

$$\text{cal} = 4,18 \text{ Joules}$$

- Électron-volt (eV) : $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- Erg (erg) : $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$
- British Thermal Unit (Btu ou BTU) : $1 \text{ BTU} = 1 055 \text{ J}$
- kilowattheure (kW.h ou kWh) : $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$
- Tonne de TNT : $1 \text{ tonne de TNT} = 4,184 \cdot 10^9 \text{ J}$
- Tonne d'équivalent pétrole (tep) : $1 \text{ tep} = 4,186 \cdot 10^{10} \text{ J}$

La valeur en est fixée de manière conventionnelle.

1 tep = 7,33 barils de pétrole

Tableau I.1 : Nature de l'énergie

Nature de l'énergie	Composante d' «effort» (unité)	Composante de «flux» (unité)	Composante de «déplacement» (unité)
Mécanique de translation	Force (Newton N)	Vitesse (mètre par seconde m/s unité pratique : km/h $1 \text{ km/h} = 3.6 \text{ m/s}$)	Distance (mètre m)
Mécanique de rotation	Couple (Newton.mètre N.m)	Vitesse angulaire (radian par seconde rad/s)	Angle (radian rad)
Hydraulique	Pression (Pascal Pa Unité pratique : bar $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$)	Débit (mètre cube par seconde m ³ /s)	Volume (mètre cube m ³)
Électrique	Tension (Volt V)	Intensité (Ampère A)	Charge (coulomb C unité pratique : Ampère.heure $1 \text{ A.h} = 3 600 \text{ C}$)
Thermique	Température (Kelvin K)	Flux de chaleur (Watt par Kelvin W/K)	Quantité de chaleur (Joule par Kelvin J/K)

Tableau I.2 : Unités usuelles des différentes énergies

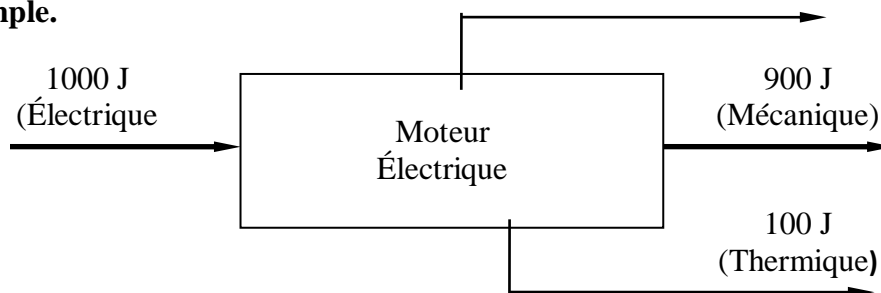
Unités usuelles	Valeur	Unités désuètes
Energie : Le joule (J)	1 J = 1 newton-mètre	1 calorie = 4,186 J
Travail mécanique Le kilowatt-heure (kWh)	3,6 MJ	
Energie thermique La tonne d'équivalent pétrole	1 TEP = 42 GJ = 1,6 TEC	1 thermie = 10 ⁶ calories
La tonne d'équivalent charbon	1 TEC = 26 GJ = 0,62 TEP	
1000 m ³ de gaz naturel	36 GJ = 0,857 TEP	
1 t d'uranium naturel	10 000 TEP	
L'électron-volt (eV) Énergie à l'échelle atomique	1 eV = 1,6 10 ⁻¹⁹ J	
Puissance Le watt (W)	1 W = 1 J/s	1 cheval-vapeur = 736 W

I.1.5.2.Principe de conservation.

Définition.

Lorsqu'une énergie est transformée d'une forme en une ou plusieurs autres formes, la somme des quantités d'énergies obtenus est égale à la quantité d'énergie initiale.

Exemple.



I.1.5.3.Principe de dégradation.

Définition.

Au cours d'une transformation d'énergie d'une forme en une autre il y a toujours apparition d'énergie thermique, même si cette forme d'énergie n'est pas celle désirée.

a) **Interprétation des 2 principes.**

Dans toute transformation d'énergie, on peut écrire :

$$\text{Energie absorbée} = \text{Energie utile} + \text{Energie perdue} \quad W_a = W_u + W_p$$

b) **Rendement.**

Définition.

Le rendement d'une machine est le rapport de l'énergie utile qu'elle restitue par l'énergie totale qu'elle absorbe.

$$\eta (\text{Rendement}) = W_u / W_a$$

Remarques.

- Le rendement un rapport de deux grandeurs physiques de même nature, c'est donc un nombre sans unité.
- L'énergie utile est plus petite que l'énergie absorbée, le rendement est donc toujours plus petit que 1.
- On exprime de préférence le rendement en pourcentage (%). Par exemple un rendement de 0,82 est un rendement de 82 %.
- Quelle que soit la formule employée, l'énergie utile et l'énergie absorbée doivent être exprimées avec la même unité.

c) **Autres unités d'énergie.**

- Le watt-heure qui est égal à 3600 Joules.
- La thermie : 1 th = $1 \cdot 10^6$ cal = $4,18 \cdot 10^6$ Joules.

I.1.6.Puissance

Définition.

La puissance d'une machine se mesure par l'énergie qu'elle absorbe dans l'unité de temps.

Calcul.

$$\text{Puissance} = \text{Energie} / \text{Temps} \quad P (w) = W (J) / T (s)$$

I.1.6.1.Unité de puissance

a) **Unité légale.**

C'est le Watt (w).

Le watt est la puissance d'une machine qui absorbe une énergie de 1 joule en 1 seconde.

a) **Autre unité.**

Le cheval vapeur (ch) : 1 ch = 736 W.

Puissance absorbée et une puissance utile.

Quelle que soit la durée de fonctionnement on a :

$$W_a = W_u + W_p$$

$$\text{donc : } P_a = P_u + P_p$$

Il y a conservation de la puissance comme il y a conservation de l'énergie.
Le rendement peut se calculer avec les puissances :

$$\eta \text{ (Rendement)} = P_u / P_a$$

I.2. Les modes de production de l'énergie électrique

L'alternateur est la partie commune à toutes les centrales électriques : l'énergie mécanique reçue par l'alternateur est convertie en partie en énergie électrique. Pour cela, l'alternateur est couplé à une turbine en rotation. Les centrales électriques produisent de l'énergie électrique en utilisant une source d'énergie dite primaire.

1) La centrale électrique hydraulique.

· Source primaire : eau

2) L'éolienne.

· Source primaire : vent

3) Les centrales thermiques.

Dans les centrales thermiques à flamme (pétrole, gaz, charbon) et les centrales nucléaires, c'est de la vapeur d'eau sous pression, envoyée sur les pales de la turbine, qui fait tourner l'alternateur. Ces centrales ne diffèrent que par le dispositif qui produit la vapeur.

4) Sources d'énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables proviennent de sources inépuisables (Soleil, vent, eau, géothermies, marées) ou renouvelables à l'échelle d'une vie (bois, plantes).

Le pétrole, le gaz, le charbon et l'uranium ne sont pas des énergies renouvelables car leurs réserves sont limitées et s'épuisent.

5 grandes catégories d'énergies renouvelables :

- ✓ L'énergie **hydraulique** (centrales hydrauliques ou marémotrices)
- ✓ L'énergie **éolienne** (énergie du vent)
- ✓ L'énergie **solaire** (énergie du rayonnement solaire convertie en chaleur ou en énergie électriques)
- ✓ L'énergie **géothermique** (on puise la chaleur dans le sol pour chauffer des habitations ou produire de l'électricité)
- ✓ L'énergie de la **biomasse** : c'est l'énergie que l'on peut extraire des végétaux comme le bois (centrale thermique) ou les plantes (carburant).



Figure I.2 : Les différents types de centrales électriques

I.3 Les défis associés à la transition énergétique

I.3.1 l'énergie dans la société

L'énergie est au cœur du développement. Elle ouvre la voie aux investissements, aux innovations et à des secteurs nouveaux qui sont autant de moteurs de création d'emplois, de croissance inclusive et de prospérité partagée. Pourtant, près de 733 millions d'habitants de la planète vivent encore sans électricité. L'énergie joue un rôle unique et crucial dans le monde. Sans transport ou sans conversion d'énergie, aucune activité (aucun « travail ») ne peut avoir lieu. L'utilisation de l'énergie permet de satisfaire des besoins humains appartenant in fine aux trois grandes catégories que sont la production de chaleur ou de froid (aussi appelée « usage fixe »), la mobilité et les usages couverts spécifiquement par l'électricité.

I.3.2.L'importance de l'efficacité énergétique dans l'industrie

L'efficacité énergétique est la tentative d'utiliser moins d'énergie sans sacrifier les activités quotidiennes de l'être humain a mise en œuvre de systèmes et de méthodologies permettant de mesurer et d'optimiser l'efficacité énergétique peut réduire cette consommation, en fournissant deux valeurs différenciées.

I.3.2. Avantages de l'efficacité énergétique dans l'industrie

Compte tenu des quatre clés de l'efficacité énergétique dans l'industrie, nous pouvons faire un dernier récapitulatif de ses avantages:

- ✓ Augmentation de la productivité: l'efficacité énergétique consiste à maintenir la productivité tout en réduisant l'énergie consommée pour réaliser les mêmes processus industriels.
- ✓ Engagement social et image de marque: au-delà de l'introduction de la transition énergétique et de l'engagement envers les objectifs
- ✓ Continuer à être compétitif sur le marché: une entreprise qui dépense moins pour sa facture d'électricité peut investir dans la production,, il est nécessaire d'atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO₂ des Nations unies, en évitant les pénalités financières.

- ✓ Gagner du temps et de l'argent: l'efficacité énergétique comprend également la gestion de l'énergie qui vous permet de contrôler tous les processus et solutions appliqués afin qu'ils atteignent leur potentiel maximal.

L'énergie, son importance pour l'économie

Tous les collaborateurs d'une entreprise sont concernés par l'énergie, ne serait-ce qu'en allumant ou en éteignant une lampe à leur place de travail. Mais la question énergétique ne relève du cahier des charges que d'un petit nombre de personnes. Gérer l'énergie c'est introduire les intérêts énergétiques dans la planification de l'exploitation. En mettant en évidence les questions suivantes:

- Comment diminuer les coûts de l'énergie?
- Qui peut influencer sa consommation, celle de l'électricité notamment?
- Quel système de surveillance et de commande convient-il le mieux au but recherché?
- Quels mécanismes fournissent les meilleurs projets de rendement énergétique?
- Quels instruments de contrôle introduire?

Les défis associés à la transition énergétique

Développer les énergies renouvelables électriques et réduire le taux d'émission de CO₂ des véhicules ne suffiront pas à limiter le réchauffement climatique. L'Europe doit réagir.

Cinq défis pour la transition énergétique

1. S'inscrire dans une trajectoire à 1,5 °C ;
2. Inventer une fiscalité climat juste;
3. Articuler les politiques énergétiques, industrielles et agricoles;
4. Développer les gaz renouvelables et le captage de CO₂;
5. Sortir du charbon.

Scénarios et perspectives.

- **Scénario énergétique transformateur** : il décrit une voie ambitieuse, mais réaliste, basée sur l'accroissement à grande échelle des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique avec la promptitude requise pour pouvoir réaliser les objectifs climatiques.
- **Perspective de décarbonisation approfondie** : elle examine les solutions destinées à réduire davantage, voire nullifier, les émissions de CO₂ liées aux processus énergétiques et industriels.
- **Analyse socio-économique** : elle associe les systèmes énergétiques aux économies dans un cadre cohérent, mondial et quantitatif utilisant un modèle macro-économétrique.

I.4.Exercice d'application

Qu'est ce que l'énoncé à problème ?

Un énoncé de problème est une courte rédaction qui introduit généralement un rapport ou une proposition pour développer le problème ou la question que le document souhaite adresser au lecteur

Exercice n°1

Calculer l'énergie cinétique d'une voiture de masse 1,25 tonne roulant à la vitesse de 50 km.h⁻¹
Calculer cette énergie si elle roule à 100 km.h⁻¹. Quel est le rapport des énergies si la vitesse est doublée ?

L'énergie cinétique d'une masse en translation est donnée par :

$$E_c = 1/2MV^2$$

Exercice n°2

L'expression littérale de l'énergie potentielle de pesanteur d'un objet est $E_{pp} = mgz$ Avec z = hauteur de l'objet par rapport à l'origine de mesure

1. Préciser la signification des termes et leur unité.
2. Lors d'une figure de freestyle, une kitesurfeuse de masse $m = 50$ kg réussit à s'élever à 7,0 m au-dessus de la mer. En prenant le niveau de la mer comme référence des énergies potentielles, calculer son énergie potentielle de pesanteur au point le plus haut de son saut.

Exercice n°3

- 1) Une étudiante passe un aspirateur de puissance 1300 W dans sa chambre, pendant 8 minutes. Calculer, en joules, l'énergie transférée à cet appareil pendant la durée du nettoyage. Exprimer ensuite ce résultat en kWh.
- 2) Cette même étudiante révise son chapitre de Système énergétiques de chimie d'hydrogène pour le prochain contrôle pendant 1 heure et 30 minutes. Pour cela, elle s'éclaire avec une lampe de bureau de 60 W. Calculer, en kWh, l'énergie transférée à cette lampe pendant cette révision. Exprimer ensuite ce résultat en joules.
- 3) Calculer le prix de cette séance de nettoyage et de révisions sachant que le prix d'un kilowattheure est de 0,0926 Da.

Exercice n°4

Pour décorer sa maison à l'approche du nouvel an, une famille a décoré l'extérieur de sa maison avec deux guirlandes de 160 ampoules chacune. Cela lui coûte environ 3 Da par jour pour 4 heures de fonctionnement quotidien.

- 1) Calculer l'énergie transformée par les lampes chaque jour, sachant que le prix du kilowattheure est de 0,0926 Da.
- 2) En déduire la puissance transformée par l'ensemble des lampes.
- 3) Calculer la puissance d'une lampe en supposant qu'elles sont toutes identiques.
- 4) Quelle somme aura déboursé cette famille pour cet éclairage si celui-ci décore sa maison durant 3 semaines ?

Solution d'exercices

Solution de l'exercice n°1

Réponse:

A 50 km/h on a : $E_c = 1/2 * 1250 * (50 * 1000 / 3600)^2 = 120563 \text{ J}$

A 100 km/h on a $1/2 * 1250 * (100 * 1000 / 3600)^2 = 482253 \text{ J}$

Le rapport des énergies vaut $120563 / 482253 = 4$, c'est-à-dire que l'énergie est quadruplée lorsque la vitesse est doublée.

De même elle serait multipliée par 9 lorsque la vitesse est triplée $(3V)^2$

Solution de l'exercice n°2

Réponses : 1. m = masse en kg

g = accélération de la pesanteur

z = hauteur de l'objet en m

2. $E_{pp} = mgz = 7 \times 81,9 \times 50 = 3468.5 \text{ J}$

Solution de l'exercice n°3

- 1) Une étudiante passe un aspirateur de puissance 1300 W dans sa chambre, pendant 8 minutes. Calculer, en joules, l'énergie transférée à cet appareil pendant la durée du nettoyage. Exprimer ensuite ce résultat en kWh

$$8 \text{ minutes} = 8 \times 60 \text{ s} = 480 \text{ s}$$

$$E = P \cdot t = 1300 \times 480 = 624\,000 \text{ J}$$

$$E = 624\,000 / 3,6 \times 10^6 \approx 0,17 \text{ kWh}$$

Cette même étudiante révise son chapitre de Système énergétiques de chimie d'hydrogène

- 2) pour le prochain contrôle pendant 1 heure et 30 minutes. Pour cela, elle s'éclaire avec une lampe de bureau de 60 W. Calculer, en kWh, l'énergie transférée à cette lampe pendant cette révision. Exprimer ensuite ce résultat en joules

$$1 \text{ h } 30 \text{ min} = 1,5 \text{ h}$$

$$60 \text{ W} = 0,06 \text{ kW}$$

$$E = P \cdot t = 0,06 \text{ kW} \times 1,5 \text{ h} = 0,09 \text{ kWh}$$

$$E = 0,09 \times 3,6 \times 10^6 = 324\,000 \text{ J}$$

- 3) Calculer le prix de cette séance de nettoyage et de révisions sachant que le prix d'un kilowattheure est de 0,0926 Da.

$$\text{Le coût sera de } (0,17 + 0,09) \text{ kWh} \times 0,0926 \text{ Da} \approx 0,024 \text{ Da} = 2,4 \text{ cts}$$

Solution de l'exercice n°4

- 1) Pour décorer sa maison à l'approche du nouvel an, une famille a décoré l'extérieur de sa maison avec deux guirlandes de 160 ampoules chacune. Cela lui coûte environ 3 Da par jour pour 4 heures de fonctionnement quotidien. 1) Calculer l'énergie transformée par les lampes chaque jour, sachant que le prix du kilowattheure est de 0,0926 Da.

$$E = 3 \text{ Da} / 0,0926 \text{ Da} \approx 32,40 \text{ kWh}$$

- 2) En déduire la puissance transformée par l'ensemble des lampes.

$$E = P \cdot t \text{ donc } P = E / t = 32,40 \text{ kWh} / 4 \text{ h} = 8,1 \text{ kW} = 8100 \text{ W}$$

- 3) Calculer la puissance d'une lampe en supposant qu'elles sont toutes identiques.

$$\text{On a en tout } 2 \times 160 = 320 \text{ lampes}$$

$$\text{La puissance d'une lampe est de } 8100 / 320 \approx 25,31 \text{ W} \approx 25 \text{ W}$$

- 4) Quelle somme aura déboursé cette famille pour cet éclairage si celui-ci décore sa maison durant 3 semaines ?

$$3 \text{ semaines} = 21 \text{ jours } 3 \text{ Da} \times 21 \text{ jr} = 63 \text{ Da de dépensés}$$

Chapitre II. Chimie de l'hydrogène

II.1. Introduction

L'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'Univers. Sur Terre, à l'état naturel, il n'est pas présent sous forme de corps pur mais se retrouve principalement sous forme d'oxyde (eau) et d'hydrocarbures. Il est envisagé d'utiliser le dihydrogène comme molécule pour le stockage de l'énergie.

II. 1.1. Qu'est-ce que l'hydrogène ?

Comme l'électricité, le dihydrogène H_2 (hydrogène) est essentiellement un vecteur énergétique et non une énergie en tant que telle, car il est produit au moyen d'une réaction chimique ou électrochimique à partir d'une ressource primaire.

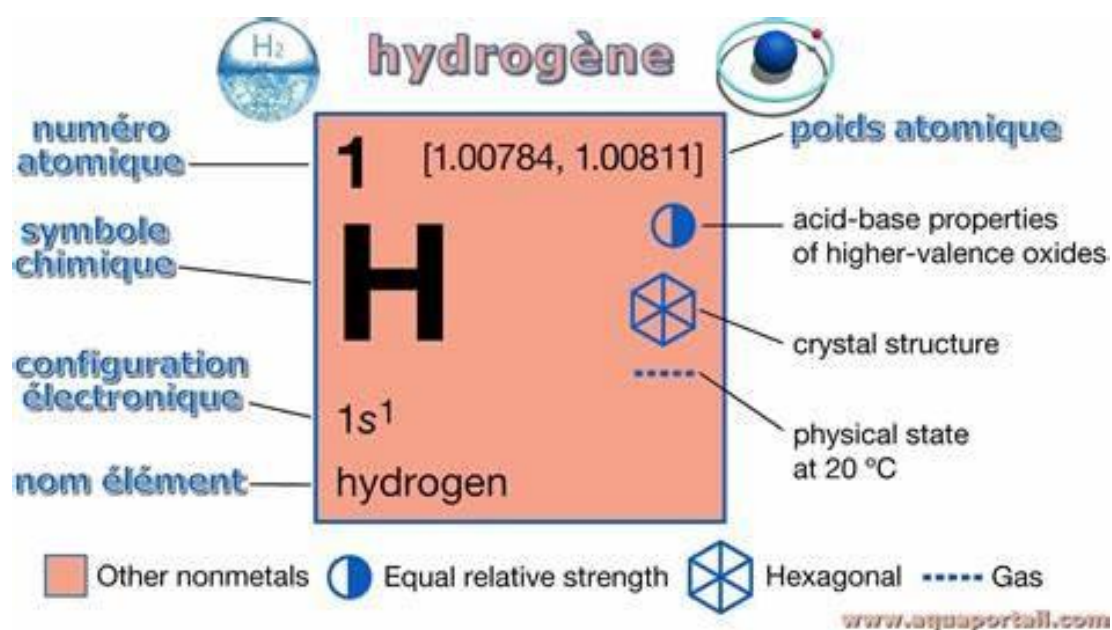


Figure II.1 : Hydrogène

II. 1.2. Où se trouve l'hydrogène ?

Les ressources nécessaires acceptant de produire le dihydrogène H_2 sont l'eau et les hydrocarbures (le charbon, le pétrole ou le gaz). En effet, chaque molécule d'eau est le fruit de la combinaison entre un atome d'oxygène et deux atomes d'hydrogène, suivant la formule H_2O . Les hydrocarbures sont issus de la combinaison d'atomes de carbone et d'hydrogène. C'est par exemple le cas du méthane, constituant principal du gaz naturel dont la formule est CH_4 , l'une des combinaisons les plus simples pour les hydrocarbures.

II. 1.3. L'hydrogène existe aussi à l'état naturel.

Les premières sources naturelles d'hydrogène ont été découvertes au fond des mers dans les années 70 et plus récemment à terre. Mais la route est longue avant d'envisager une

exploitation rentable. Les connaissances sur l'origine de la formation de cet hydrogène et les recherches sur des techniques de production rentables doivent encore progresser.

II. 2. Caractéristiques d'hydrogène

L'hydrogène comme vecteur énergétique représente aujourd'hui un enjeu majeur, tant scientifique, qu'environnemental et économique. Léger, abondant et énergétique

II. 2.1. Propriétés physique de l'hydrogène

Point de fusion	-259.1°C (14.01 K)
Point d'ébullition	-252.9°C (20.28 K)
Température de solidification	-262 °C (14 K)
Masse Molaire	1,007 94 ± 0,000 07 u
Masse volumique (20°C)	0.09 g/cm ³
Densité relative (à l'air)	0.07
Rayon atomique	25 pm
Distance interatomique	74 pm

L'hydrogène forme une molécule diatomique H₂. C'est un gaz incolore, inodore, non toxique, hautement inflammable et très léger. Sa très petite taille lui permet une grande facilité de diffusion et d'effusion. L'hydrogène est aussi un bon conducteur calorifique, utilisé, par exemple pour le refroidissement des gros alternateurs.

II. 2.2. Propriétés chimique de l'hydrogène

L'élément hydrogène n'appartient à aucun groupe. L'hydrogène peut comme les alcalins perdre un électron pour donner le cation H⁺. Il peut également, comme les halogènes compléter son niveau de valence par capture d'un électron pour donner l'anion hydruide H⁻ de même structure que l'He.

Nom	Hydrogène
Nombre atomique	1
Groupe	1
Période	1 ^e période
Bloc	Bloc s
Famille d'élément	Non-métal
Configuration électronique	1S ¹
Electron par niveau d'énergie	1
Energie d'ionisation	1 ^e : 13.598eV

II. 2.3. Pénitentiel d'oxydoréduction

Le couple $2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_2$ est caractérisé par un potentiel normal d'oxydo-réduction E_0 égal à :

$$-\frac{RT}{F} (\text{pH} + \frac{1}{2} \lg p_{\text{H}_2})$$

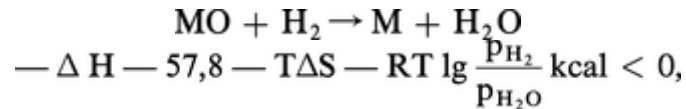
S'il est déterminé par rapport à une électrode normale à hydrogène. Tous les systèmes pour lesquels E_0 est nettement inférieur à cette valeur sont oxydés avec dégagement.

II. 2.4. Electropositivité

Correspondant aux éléments les plus électropositifs – essentiellement les alcalins et les alcalinoterreux –, les hydrures ioniques ou salins sont caractérisés par l'ion H⁻. L'électrolyse en milieu sel fondu donne en effet un dégagement d'hydrogène à l'anode. La forte polarisabilité.

II. 2.5. Hydrogène liquide

Le pouvoir réducteur de l'hydrogène vis-à-vis des oxydes dépend du taux de vapeur d'eau présente et de la température. Comme l'énergie libre de la réaction : Doit être négative :



ΔH étant l'enthalpie de formation de l'oxyde MO, - 241,9 kJ celle de la vapeur d'eau et ΔS la variation...

ΔG Enthalpie libre étant l'enthalpie de formation de l'oxyde MO, -520 kJ

ΔG° (Enthalpie libre molaire) = $\sum n\Delta G^\circ_{\text{produits}} - \sum nG^\circ_{\text{réactifs}}$



$$\text{alors } \Delta_R G' = \Delta_R G^{0'} + RT \ln \left(\frac{[\text{C}]^c \times [\text{D}]^d}{[\text{A}]^a \times [\text{B}]^b} \right)$$

$$\text{ou encore } \Delta_R G' = \Delta_R G^{0'} + RT \ln (Q_R')$$

Avec :

- [A], [B], [C] et [D] : concentration en réactifs et produits, dans les conditions biologiques, en mol/L ;
- a, b, c et d : coefficients stœchiométriques ;
- R : constante des gaz parfaits = 8,31 J/(mol·K) ;
- T : température en K (273 + température en °C) ;
- Q_R' : quotient réactionnel (sans unité) à pH = 7.

La relación entre la variación de entalpía de un proceso y la variación de entropía que tiene lugar en él se establece mediante la energía libre de Gibbs (G_{sistema}).

$$\Delta S_{\text{universo}} = \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{entorno}} \quad \Delta S_{\text{entorno}} = -\frac{\Delta H_{\text{sistema}}}{T}$$

$$\Delta S_{\text{entorno}} = \Delta S_{\text{sistema}} - \frac{\Delta H_{\text{sistema}}}{T}$$

$$T\Delta S_{\text{entorno}} = T\Delta S_{\text{sistema}} - \Delta H_{\text{sistema}}$$

$$-T\Delta S_{\text{entorno}} = \Delta H_{\text{sistema}} - T\Delta S_{\text{sistema}}$$

$$G = -T\Delta S_{\text{entorno}}$$

$$\boxed{\Delta G = \Delta H - T\Delta S}$$

II. 2.6. L'hydrogène aux couleurs de l'arc-en-ciel

L'hydrogène a le vent en poupe. Cette énergie devrait jouer un rôle clé majeur dans la transition énergétique en permettant de rendre plus verts certains secteurs comme l'industrie ou la mobilité lourde. Il existe quatre couleurs :

- ✓ **L'hydrogène vert** est fabriqué par électrolyse de l'eau à partir d'électricité provenant uniquement d'énergie renouvelable ;
- ✓ **L'hydrogène gris** est fabriqué par procédés thermochimiques avec comme matières premières des sources fossiles (charbon ou gaz naturel) ;
- ✓ **L'hydrogène bleu** est fabriqué de la même manière que l'hydrogène gris, à la différence que le CO₂ émis lors de la fabrication sera capté pour être réutilisé ou stocké ;
- ✓ **L'hydrogène jaune**, plus spécifique à la France, est fabriqué par électrolyse comme l'hydrogène vert mais l'électricité provient essentiellement de l'énergie nucléaire.

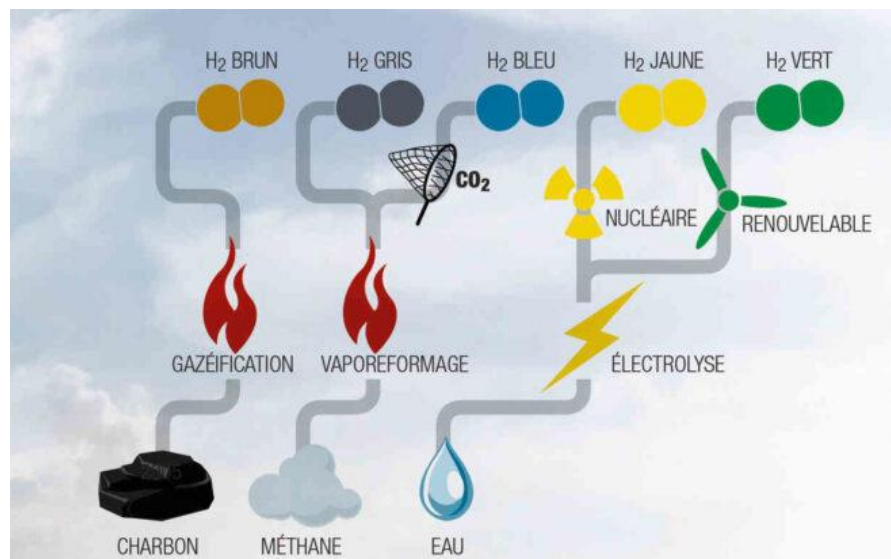


Figure II.2 : L'hydrogène aux couleurs de l'arc-en-ciel

II. 3. Comment est stocké l'hydrogène ?

Le dihydrogène possède une très grande densité massique d'énergie (1 kg d'hydrogène contient autant d'énergie qu'environ 3 kg de pétrole) mais une très faible densité volumique. Il faut le transformer pour pouvoir le stocker dans un volume utilisable.

- ✓ En le comprimant à 700 bar : 7 litres d'hydrogène peuvent contenir ainsi autant d'énergie qu'1 litre d'essence ;
- ✓ En le liquéfiant pour le comprimer davantage à une température de - 253 °C : 4 litres d'hydrogène liquide équivalent alors à 1 litre d'essence ;

II. 3.1. Comment s'utilise l'hydrogène aujourd'hui ?

Actuellement, l'hydrogène a deux utilisations principales : d'une part, il sert de matière de base pour la production d'ammoniac (engrais) et de méthanol ; d'autre part, il est utilisé

comme réactif dans les procédés de raffinage des bruts en produits pétroliers, carburants et biocarburants. .

II. 3.2.L'hydrogène dans la transition énergétique

Récupérer de l'énergie à partir du dihydrogène renouvelable ou bas-carbone préalablement stocké se fait de deux façons :

- Soit sous forme de chaleur via sa combustion directe avec le dioxygène ;
- Soit sous forme d'électricité via une pile à combustible (PAC, SOFC).

Dans les deux cas la réaction globale ne produit que de l'eau et l'énergie produite peut être diversement valorisée. L'hydrogène se voit assigner trois objectifs essentiels pour réussir la transition énergétique.

L'hydrogène pour décarbonner les transports. Les enjeux sur la mobilité sont donc considérables, car la solution hydrogène appliquée à la mobilité propre (power-to-mobility), en utilisant la combustion directe ou la pile à combustible, permet de réduire considérablement les émissions.

II. 3. 3. L'hydrogène dans les transports : quelques chiffres

Un véhicule diesel produit entre 40 et 45 tonnes de CO₂ sur l'ensemble de sa durée de vie, un véhicule hydrogène produit par reformage un peu plus de 35 tonnes, et un véhicule hydrogène produit par électrolyse renouvelable moins de 15 tonnes. Les voitures alimentées en hydrogène ont au mieux un impact carbone 74 % moindre que les véhicules thermiques traditionnels.

II. 3.4.La voiture à hydrogène

II. 3.4.1.Le moteur à hydrogène

Les caractéristiques physico-chimiques de l'hydrogène en font un bon candidat pour une utilisation comme carburant dans un moteur à allumage commandé de type « essence ». Le principal avantage réside dans le bilan environnemental : combinée à l'oxygène, la combustion de l'hydrogène produit essentiellement de l'eau et de la chaleur et ne rejette que des oxydes d'azote (NO_x). Cependant, cette solution nécessite des adaptations spécifiques pour obtenir un très haut rendement et de très faibles émissions de NO_x. L'utilisation de l'hydrogène dans un moteur à combustion interne peut bénéficier des dernières avancées du moteur thermique et du couplage avec une chaîne de traction hybride. Ce pourrait être une solution de transition vers la pile à combustible puisqu'elle permet de commencer la validation de toute la filière de production et de distribution de l'hydrogène en utilisant les outils industriels de production existants.

II. 3.4.2.La pile à combustible dans les voitures électriques

A longue échéance, les constructeurs automobiles s'intéressent aussi aux piles à combustible (ou Fuel Cell), comme générateurs d'électricité pour les véhicules électriques. Ceci afin d'achever les solutions de véhicules électriques à batteries, fatigué aujourd'hui de la limitation en autonomie et du temps de recharge de ces batteries. L'hydrogène sert alors à alimenter une pile à combustible — laquelle produit de l'électricité — pour permettre le fonctionnement du moteur électrique qui fait avancer le véhicule. L'hydrogène est un des meilleurs vecteurs d'énergie pour les piles à combustible aujourd'hui en termes de performances énergétiques et d'émissions.

II. 3.5. Le train et l'avion à hydrogène

Le plan français en faveur de l'hydrogène compte parmi ses objectifs la mise en service d'un premier train à hydrogène en France en 2022. À la suite de l'Allemagne, la France fait ses premiers pas dans la mobilité ferroviaire à hydrogène, SNCF .

L'hydrogène peut être également injecté directement dans les réseaux de gaz (power-to-gaz):

- Par injection directe dans les réseaux gaziers pour combustion ;
- Par production de méthane de synthèse (selon le principe de méthanation) : conversion du monoxyde (CO) ou du dioxyde de carbone (CO₂) en présence d'hydrogène, qui peut ensuite être transformé en chaleur, électricité ou carburant.

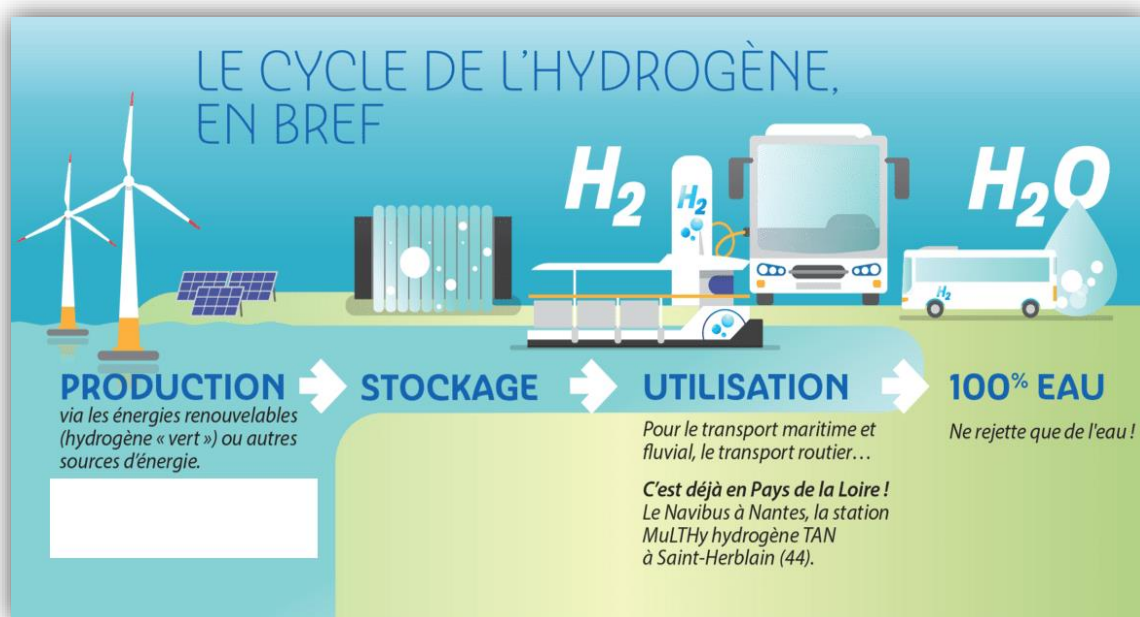


Figure II.3 : Le cycle d'hydrogène

II.4. La production de l'hydrogène

II.4.1. Introduction

La production de l'hydrogène, dans ses aspects techniques, technologiques et économiques, est brièvement abordée parmi un très grand nombre de sociétés. L'hydrogène est produit à partir de ressources fossiles (charbon et pétrole), gaz naturel (composé essentiellement de méthane), biomasse (résidus de matières végétales et cultures spécifiquement consacrées à l'énergie) ou eau. Les procédés de production de l'hydrogène à partir de ces sources peuvent être différenciés selon que la méthode soit thermique, électrochimique ou. On peut distinguer dix procédés principaux : vapore-formage, oxydation partielle, thermolyse/ gazéification, dissociation de l'eau par cycle thermochimique, électrolyse, électrolyse à haute température, photolyse, phytobiologique, digestion anaérobie et micro-organismes photosynthétiques.

Chacun de ces procédés est caractérisé par une source spécifique d'hydrogène, un besoin énergétique et une émission de sous-produits.

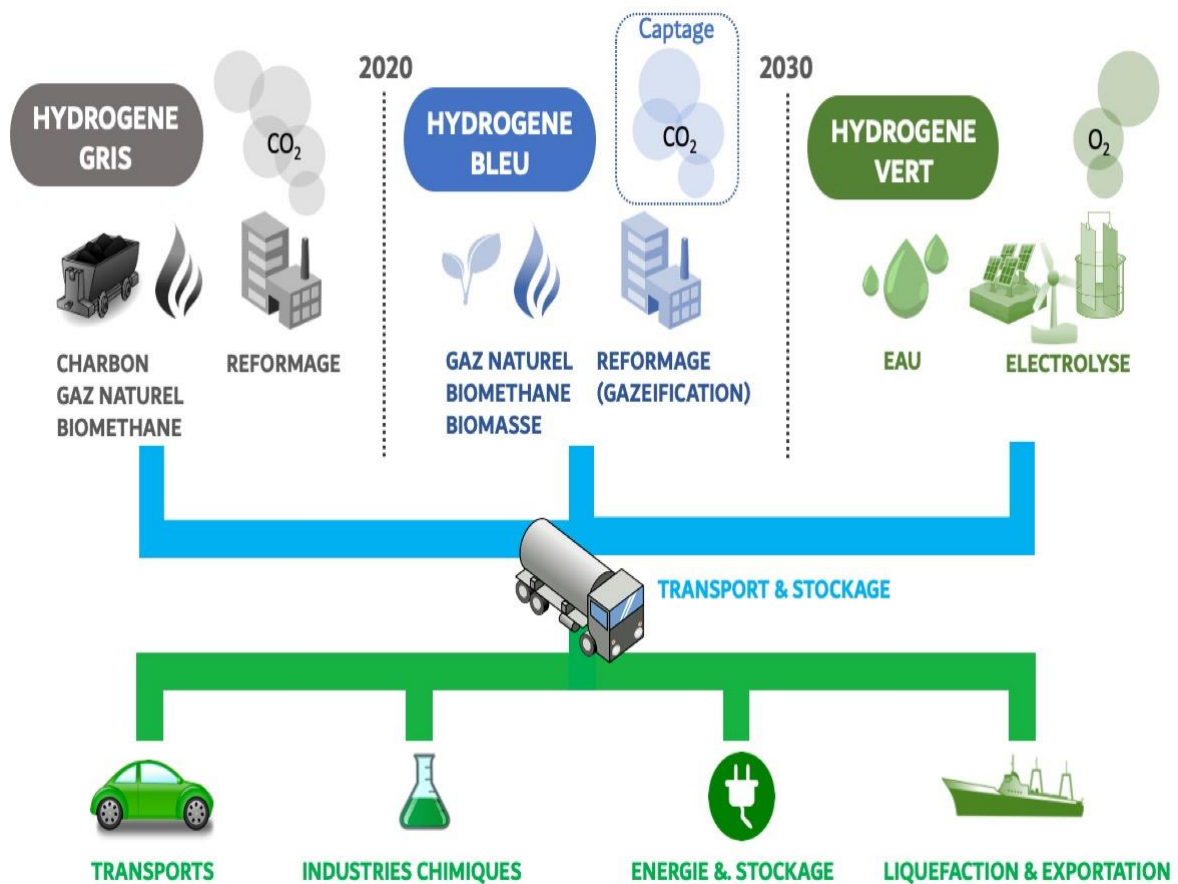


Figure II.4 : Sources primaires d'hydrogène et méthodes de production

II.4.2. Les procédés de production de l'hydrogène par électrolyse

L'électrolyse est très importante de nos jours, surtout pour les ressources concernant l'énergie et la fabrication de matériaux. Depuis les bases de l'électrolyse, comme l'hydrolyse de l'eau pour produire des gaz, jusqu'à l'électrolyse de divers sels fondus pour produire des métaux et la récupération de métaux précieux. Mais sais-tu comment nous utilisons l'électrolyse pour différentes applications. Dans ce résumé de cours, tu apprendras ce qu'est l'électrolyse et quelles sont ses utilisations. Plus important encore, tu vas acquérir une compréhension globale de la façon dont l'électrolyse est capable de nous aider dans des réactions qui ne sont pas thermodynamiquement possibles dans des conditions standards. Tu comprendras également comment l'électrolyse peut être appliquée pour de nombreuses utilisations industrielles.

L'électrolyse est une réaction électrochimique qui permet de réaliser des réactions non spontanées grâce à l'apport d'énergie sous forme d'électricité. L'électrolyse est l'un des deux environnements de cellule électrochimique qui peuvent être produits. Les cellules électrochimiques peuvent être divisées en cellules voltaïques (galvaniques) et en cellules électrochimiques. Consulte notre résumé sur l'électrochimie. L'électrolyse, dans sa forme la plus simple, est une réaction redox qui est contrôlée. Les réactions redox sont des réactions chimiques qui impliquent une réduction et une oxydation. Dans le contexte des électrons, la réduction est le gain d'électrons, tandis que l'oxydation est la perte d'électrons. La réduction et l'oxydation se produisent toujours simultanément dans un système et la séparation des deux

demi-réactions nous aidera à créer une réaction d'oxydoréduction contrôlée pour les réactions électrochimiques.

Telles que l'électrolyse. L'électrolyse exploite une réaction d'oxydoréduction non spontanée. Cela signifie qu'en général, il s'agit d'une réaction qui ne se produit pas ou ne fabrique pas de produits à partir des réactifs, dans des conditions standards. Dans l'électrolyse, cette énergie se présente sous la forme d'un courant (électricité). Si tu divises une certaine réaction d'oxydoréduction en ses deux demi-réactions, comme les réactions d'oxydation et de réduction qui composent la réaction complète.

On va faire passer un courant électrique entre deux électrodes: une anode et une cathode. Au niveau de la première, l'électricité dégage de l'oxygène ($4 \text{ OH}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4 \text{ e}^-$) et, au niveau de la seconde, se dégage l'hydrogène ($2 \text{ H}_2\text{O} + 2 \text{ e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2 \text{ OH}^-$).

II.4.2.1. Cellule d'électrolyse

Les cellules électrolytiques ou d'électrolyse sont des cellules électrochimiques qui peuvent être utilisées pour l'électrolyse de certains composés. Par exemple, l'eau peut être soumise à une électrolyse à l'aide d'une cellule électrolytique pour former de l'oxygène gazeux et de l'hydrogène gazeux. Cela se fait en utilisant le flux d'électrons dans l'environnement de réaction pour surmonter la barrière d'énergie d'activation de la réaction redox non spontanée .

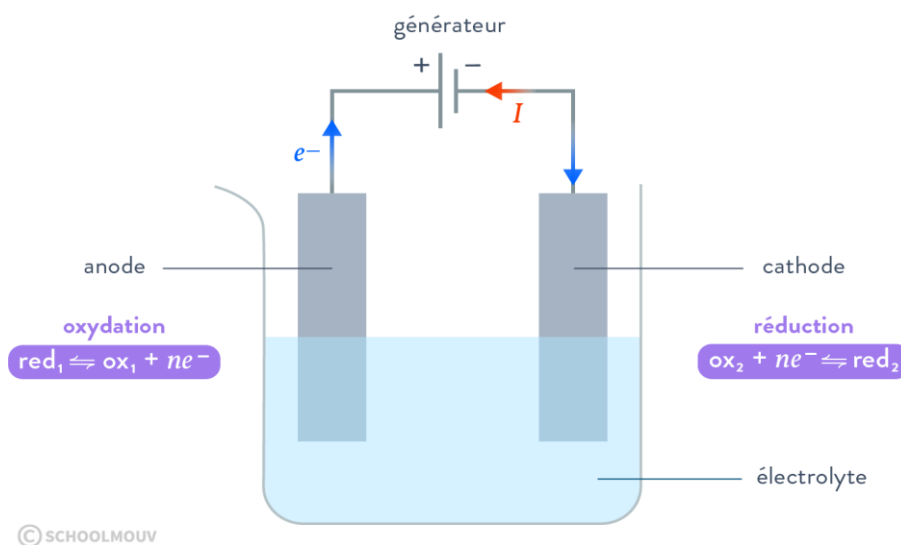
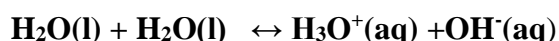


Figure II.5 : Cellule d'électrolyse

II.4.2.2. Qu'est-ce que l'électrolyse de l'eau ?

Que se passe-t-il si tu effectues une électrolyse de l'eau. L'électrolyse de l'eau produit de l'oxygène et de l'hydrogène à partir des molécules d'eau. Il est essentiel de mentionner que l'eau subit une auto-ionisation. L'auto-ionisation signifie qu'un composé réagit avec lui-même (dans une réaction d'équilibre) pour former des ions.

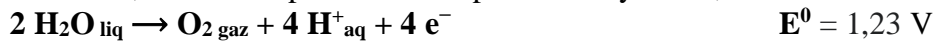
Tu trouveras ci-dessous l'équation de l'auto-ionisation de l'eau :



Cette réaction est importante car l'eau la subit spontanément, et la production d'ions, notamment d'ions hydroxyde, est très importante pour les réactions d'oxydoréduction en

électrochimie. En particulier, la décharge d'oxygène qui se produit à l'anode. Nous allons examiner ici les deux réactions qui se produisent à chaque électrode pendant l'**électrolyse de l'eau** pour découvrir comment la division d'une molécule d'eau par un courant peut aboutir à la production d'oxygène et d'hydrogène.

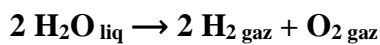
À l'anode, l'électrode positive où se produit l'oxydation, la réaction suivante a lieu :



Pendant ce temps, à la cathode, l'électrode négative où se produit la réduction, la réaction suivante a lieu :



En mettant les deux réactions ensemble, la réaction globale de l'électrolyse de l'eau est la suivante :



Dans cette réaction, l'eau sous forme liquide est divisée pour produire des gaz d'oxygène et d'hydrogène. Cette réaction permet de dégager ces gaz à partir de l'eau simple, qui peut ensuite être utilisée à d'autres fins industrielles. Tu peux voir ci-dessous un schéma du montage expérimental utilisé pour l'électrolyse de l'eau. Remarque les demi-réactions qui se produisent à chaque électrode, ainsi que les gaz qui sont dégagés.

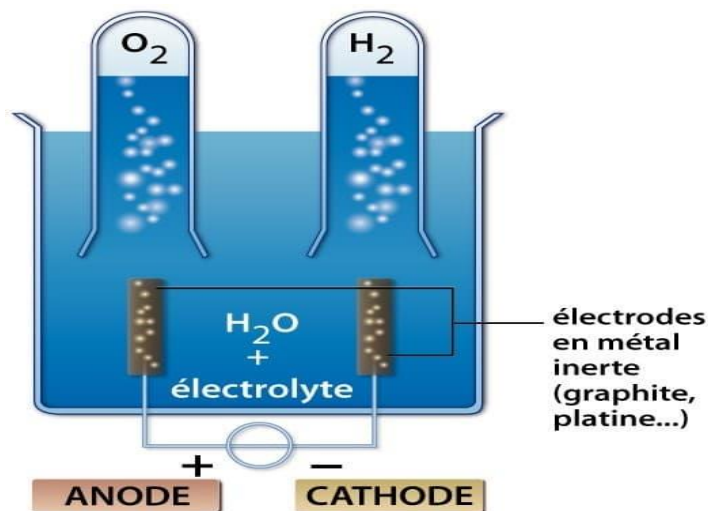


Figure II.6 : Schéma du montage expérimental utilisé pour l'électrolyse de l'eau

Electrolyse de l'eau : procédé qui nécessite de l'électricité (rentable si la production d'électricité présente elle-même un coût peu élevé). Le courant électrique décompose la molécule d'eau en hydrogène et en dioxygène (O₂)



Ce procédé correspond à la réaction inverse de celle se produisant dans une pile à combustible. Il permet de produire un hydrogène très « propre » (si l'électricité est produite en utilisant des sources renouvelables) mais n'est pas encore viable économiquement (2 à 3

fois plus coûteux que le procédé de vaporeformage). Le rendement de cette technique est de 40% sur toute la chaîne mais peut atteindre 80% en récupérant la chaleur.

Cette électrolyse possède différentes variantes, à différentes températures :

- **Electrolyse basse température (< 200°C) alcaline** utilisant une solution aqueuse d'acide sulfurique (H₂SO₄) ou d'hydroxyde de potassium (KOH) ;
- **Electrolyse basse température (< 200°C) utilisant un électrolyte solide** : membrane polymère PEMFC conductrice de protons (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) ;
- **Electrolyse à haute température (> 400°C)** utilisant une membrane céramique conductrice d'ions oxygène *SOFC* (*Solid Oxide Fuel Cell*) *SOFC*, qui doit être couplée à un système solaire à concentration à un réacteur nucléaire à haute température pour profiter d'une source de vapeur bas coût ;
- **Gazéification et pyrolyse de biomasse (en particulier de charbon de bois)** : procédé en cours de recherche et développement qui permet par exemple d'obtenir de l'hydrogène par transformation chimique du bois à très haute température (entre 1 200°C et 1 500°C). On obtient un mélange de gaz contenant de l'hydrogène (H₂) et du monoxyde de carbone (CO). Après purification de ce mélange, on obtient de l'hydrogène.
- **Autres procédés à l'état de recherche** : d'autres techniques de production d'hydrogène sont actuellement à l'étude comme la photoélectrolyse (cellule photoélectrochimique décomposant l'eau sous l'effet de la lumière), la décomposition thermochimique de l'eau (l'eau est chauffé à 800/1 000°C grâce à l'énergie nucléaire) ou encore des microorganismes (production d'hydrogène par des bactéries modifiées sous l'effet de la lumière du soleil).

II.5. Les procédés de production de l'hydrogène par vaporeformage

II.5.1. Le vaporeformage d'hydrocarbures (méthane en principe)

Le vaporeformage permet de produire de l'hydrogène à partir d'hydrocarbures. On utilise surtout du méthane. On parle alors de SMR (Steam Methan Reforming). Il y a deux réactions, d'abord celle de vaporéformage proprement dite ($H_2O + CH_4 \rightarrow CO + 3H_2$), qui produit un mélange de monoxyde de carbone et de dihydrogène, aussi appelé gaz de synthèse ou « *Syngas* », puis ce qu'on appelle la « Conversion catalytique » ($CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$). Ces procédés supposent de chauffer le gaz à une température extrêmement élevée (700-1100°C) et libèrent 10 fois plus de CO₂ que cela ne produit d'hydrogène (en poids).

II.5.1. La production d'hydrogène par gazéification

La gazéification de charbon est le deuxième principal procédé de production d'hydrogène actuellement. C'est une combinaison de plusieurs réactions se déroulant à des températures et des pressions élevées (500-1400°C ; >33 bars).

Il existe deux procédés de gazéification d'hydrogène

- Le procédé de fabrication de l'hydrogène brun ou noir consiste à transformer du charbon ou de la matière fossile ou organique en gaz par traitement thermique. La molécule d'hydrogène est ensuite isolée par vaporeformage.
- Le procédé de gazéification du bois consiste à brûler le bois dans un réacteur à très haute température (entre 1200 et 1500°C). Le bois libère des gaz qui vont alors se séparer et se reformer pour obtenir, d'un côté du dihydrogène (H₂) et, de l'autre, du (CO).

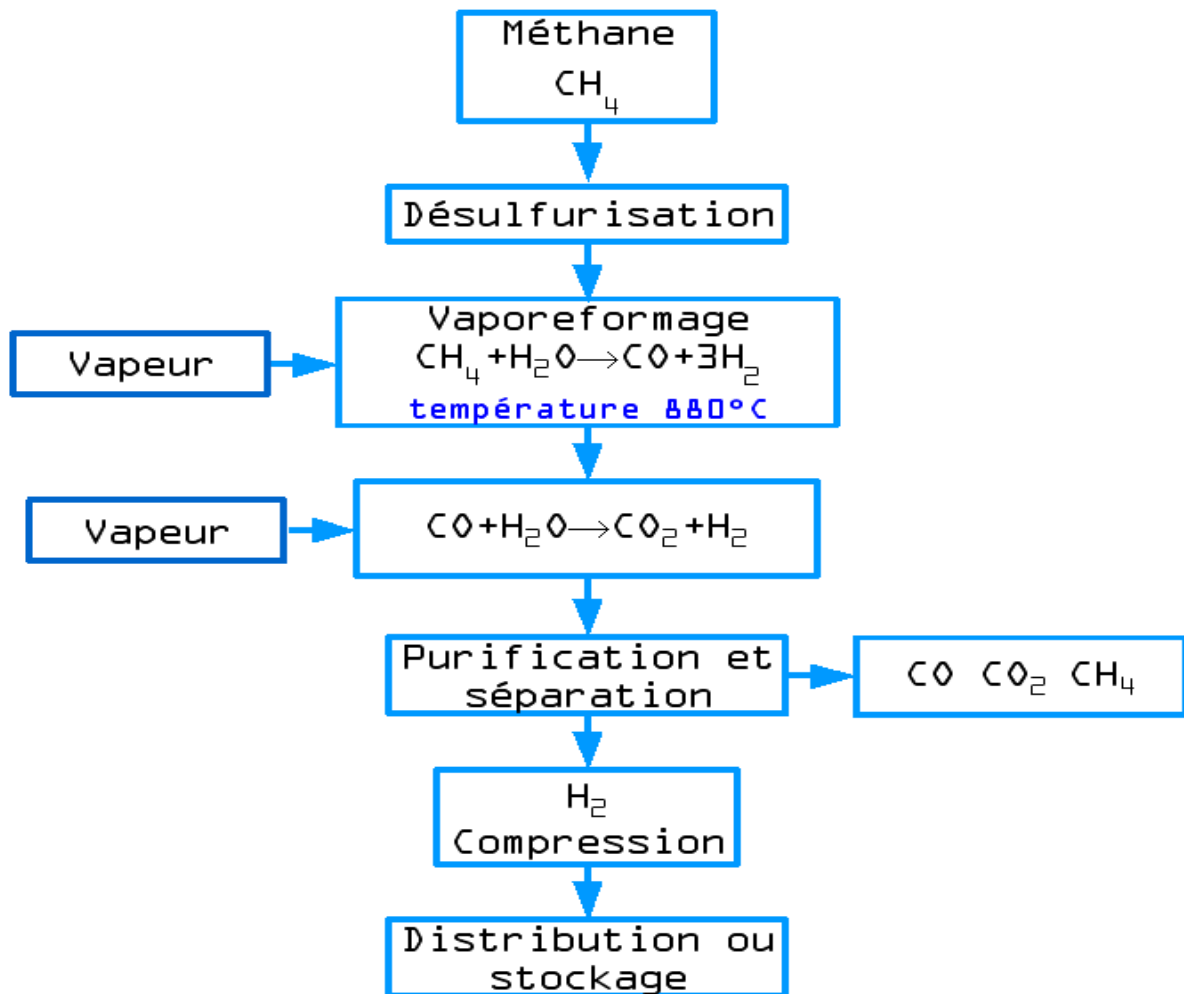
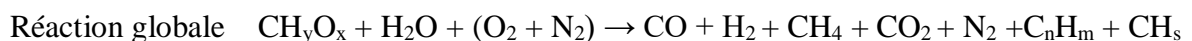


Figure II.7 : Vaporeformage de l'hydrogène

II.5.2. Les procédés de production de l'hydrogène par pyrolyse

La pyrolyse permet de produire de l'hydrogène sans émission de CO₂, y compris si le gaz intrant est d'origine fossile, car le carbone est rejeté sous la forme solide. Cet hydrogène est qualifié de « gris » car sa production émet des quantités importantes de CO₂. Cette phase est encore appelée carbonisation ou dé volatilisatation. Sous l'effet du chauffage entre 300 et 700°C, les matières volatiles se forment à l'intérieur de la particule à partir de l'hydrogène, de l'oxygène et du carbone présents, puis sont évacuées. On aboutit ainsi à une matrice fortement carbonée et très poreuse.



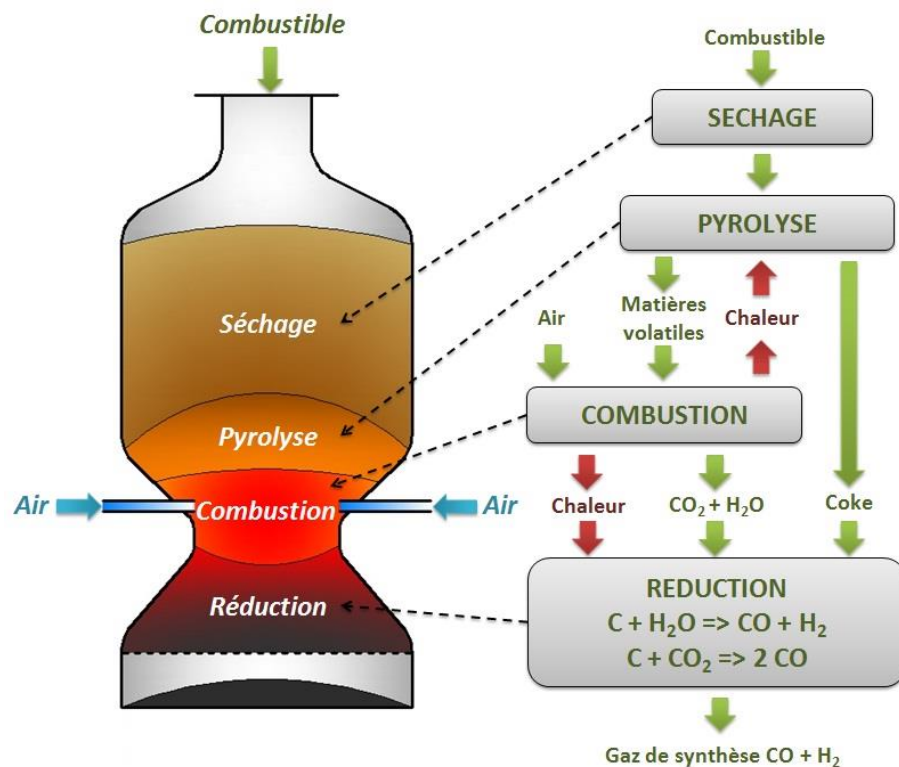


Figure II.8 : Procédés de production de l'hydrogène par pyrolyse

II.5.3. Les procédés de production de l'hydrogène par biomasse

Le monde de la biomasse est extrêmement vaste et il est difficile d'en faire une présentation à la fois rapide et complète. Le terme de biomasse désigne la masse de matière vivante végétale, présente à la surface du globe. Une partie de ce gisement, constituée principalement des plantes et des arbres, peut être exploitée à des fins énergétiques. La biomasse est produite par les organismes vivants principalement par l'activité photosynthétique des plantes, mais aussi des animaux, des insectes, des micro-organismes...

II.5.3.1. Types de la biomasse

La biomasse est donc partout et disponible en grande quantité. Plus précisément, la biomasse exploitable par l'homme peut être classée suivant cinq origines différentes :

- **La biomasse d'origine agricole** qui regroupe les cultures alimentaires et énergétiques mais également les résidus, par exemple les tiges non consommables, et les déchets de l'agriculture tels que les surplus et produits non-calibrés pour la consommation et, finalement, les effluents d'élevage comme les déjections et litières animales qui forment les fumiers et les lisiers.
- **La biomasse d'origine forestière** qui englobe les forêts soit le bois comme matière première de même que les résidus et déchets issus de l'activité forestière lors de la première transformation du bois.
- **La biomasse d'origine aquatique**, soit les résidus des activités de pêche et d'aquaculture ainsi que les cultures d'algues et de micro-algues.
- **La biomasse d'origine industrielle** regroupe principalement tous les produits connexes de l'industrie agroalimentaire et de l'industrie du bois de deuxième transformation.
- **La biomasse d'origine collective** qui comprend l'ensemble des déchets produit par l'homme et notre société, soit les déchets.

II.5.3.2. Les avantages de l'utilisation de biomasse : On peut utiliser la biomasse comme source d'énergie, Tout simplement pour les raisons suivantes :

- ✓ Elle est neutre en CO₂ ;
- ✓ Elle est disponible partout et souvent en grande quantité;
- ✓ Elle aide à la gestion des déchets solides ;
- ✓ Elle est inoffensive et sûre;
- ✓ Elle est écologique ;
- ✓ Elle est renouvelable;
- ✓ Elle peut être transformée en différentes sources d'énergie.

II.5.4. Production d'hydrogène par voie nucléaire

Les deux procédés de production massive d'hydrogène « vert », l'électrolyse (HT) et la thermochimie, nécessitent de disposer de chaleur décarbonnée à haute température congénère avec de l'électricité elle-aussi décarbonnée. Les réacteurs nucléaires électrogènes refroidis à eau fonctionnent à des températures insuffisantes (300°C) pour obtenir (sauf électrolyse à moyenne température) des rendements compétitifs. Les réacteurs à très haute température ont été d'emblée destinés à la cogénération d'électricité et d'hydrogène.

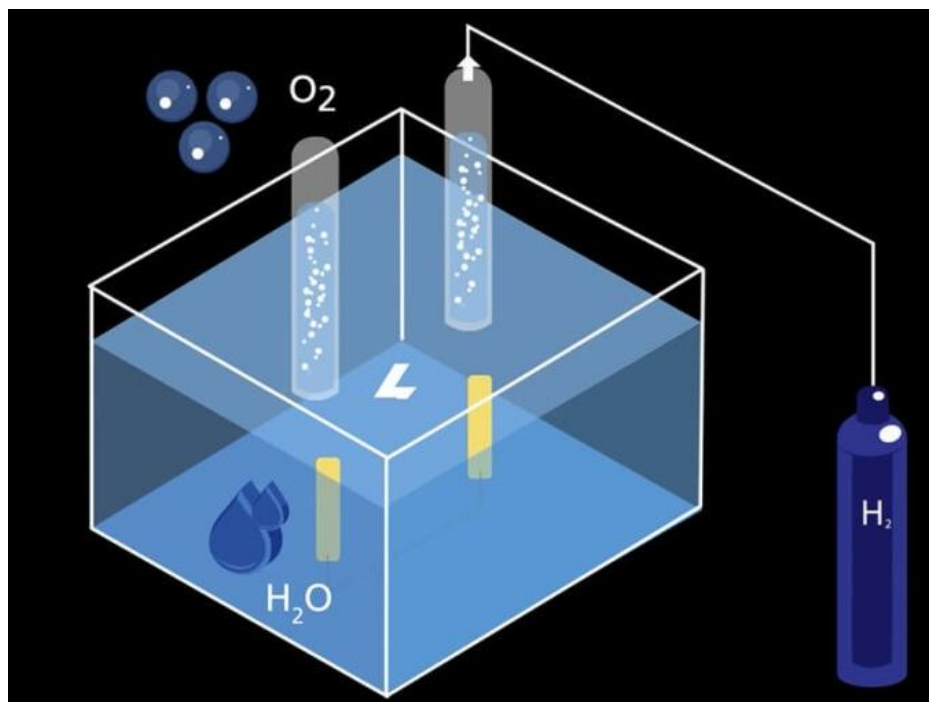


Figure II.9 : Production d'hydrogène refroidis à eau

II.5.5. Les procédés de production de l'hydrogène par voie biologique

Les méthodes biologiques de production d'hydrogène se révèlent être des procédés idéaux car respectueux de l'environnement avec des rendements limités certes mais intéressants. Pour améliorer ces rendements, il est possible d'envisager l'association des procédés biologiques comme le couplage de la fermentation sombre, de la photo-fermentation et de la bio photolyse

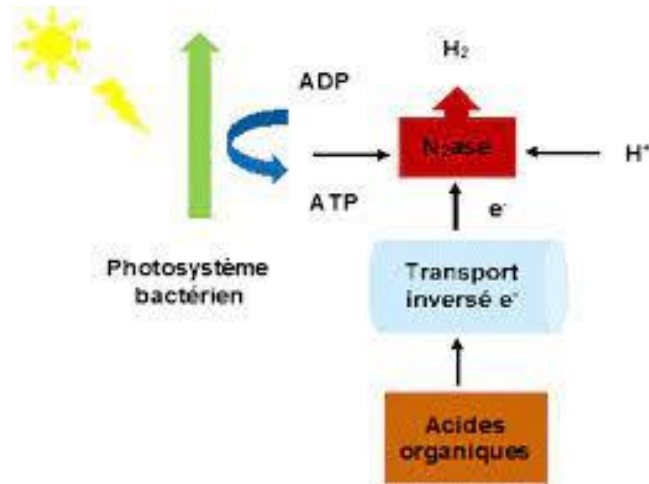


Figure II.10 : Production d'hydrogène par procédés biologiques

II.5.5.1. Méthodes biologiques de production d'hydrogène

La production d'hydrogène biologique implique l'utilisation de microbes spécialisés (Clostridium et Rhodobacter) dans un bioréacteur. Les méthodes courantes pour la production de bio-hydrogène comprennent la fermentation sombre, la photo-fermentation, la photolyse directe, la photolyse indirecte et la fermentation séquentielle (Fig 11).

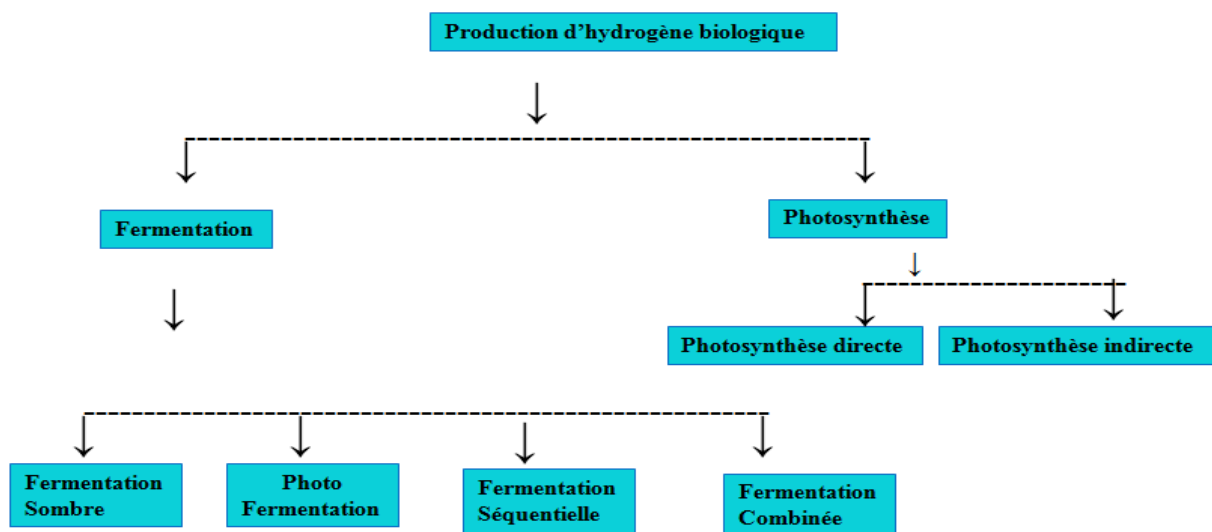


Figure II.11 : Méthodes biologiques de production d'hydrogène

Certaines enzymes de ces micro-organismes sont très importantes pour leur permettre de produire du bio hydrogène. Des études récentes du potentiel enzymatique de la production d'hydrogène montrent qu'elles possèdent des groupes de métaux complexes entant que sites actifs. L'inhibition incomplète de PSII peut générer des conditions anaérobies pour les cellules dans le photo-bioréacteur, car il ya moins d'activités d'oxydation de l'eau pour faire évoluer l'O₂ et les résidus utilisés par la respiration.

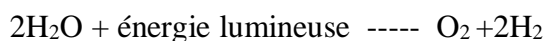


Tableau II.1 : Comparaison des méthodes biologiques de production de l'hydrogène

Avantages	Inconvénients
1. Photo synthèse de l'hydrogène (photolyse directe et indirecte) •Substrat bon marché •Processus simple •Réduction des émissions de gaz a effet de serre	Faible taux de conversion a bioréacteurs couteux sont dans photosynthèse de l'hydrogène
2.Photo-fermentation •Taux de conversion élevés de s acides organiques •Peut être appliquée après une fermentation sombre	Lumière exigée a `concurrence des méthanogènes sont dans photo-fermentation
3. Fermentation sombre •Substrats bon marché •Technologie de réacteur simple •Large gamme de spécialistes microbiens •Grande productivité	Rendements faibles et faible élimination de la DCO sont dans fermentation sombre
4. Fermentation séquentielle •Taux de production d'hydrogène élevé •Rendement supérieur au processus en une seule Etape •Elimination élevée de la DCO des eaux usées •Moins d'acides organiques dans les effluents que dans une seule e `tape de fermentation	Coûts d'investissement élevés` à `des coûts de production plus élevés dans fermentation séquentielle

II.6.Le stockage de l'énergie

Consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour une utilisation c'est-à-dire stocker des calories ou de l'électricité permet de stabiliser les réseaux énergétiques. Ce stockage peut se décliner sous diverses formes. L'énergie peut être stockée sous forme mécanique (dans le cas d'une retenue d'eau d'un barrage), électrochimique (piles et accumulateurs) par exemple. La gestion de l'énergie est donc un art subtil qui associe production, transformation, transport et stockage

II.6.1.Les différentes formes de stockages d'énergies

Il existe plusieurs formes de stockage à savoir

- ✓ Stockage de combustible ;
- ✓ Stockage électrochimique;
- ✓ Stockage de calories;
- ✓ Stockage mécanique;
- ✓ Stockage sous forme d'énergie potentielle de pesanteur;
- ✓ Stockage sous forme d'énergie chimique;
- ✓ Stockage sous forme d'énergie mécanique;
- ✓ Stockage de l'énergie thermique.

Tableau. II.2 : Stockage de l'énergie, aspect fondamentaux

Type de technologie	Pompage d'eau	Compression d'air	Volants inertiels	Procédés électrochimiques	Production d'hydrogène
Mode de stockage	Élévation d'eau	Compression d'air	Entraînement d'un disque par un moteur	Réaction électrochimique	Électrolyse de l'eau
Nature du stockage	Énergie potentielle de pesanteur	Air comprimé	Énergie cinétique de rotation	Énergie chimique	Hydrogène
Mode de restitution électrique	Turbinage d'eau	Turbinage d'air	Entraînement d'un alternateur	Réaction électrochimique	Combustion d'hydrogène dans une pile à combustible

II.6.2. Le stockage et la distribution d'hydrogène

Le concept de « **stockage de l'hydrogène** » désigne toutes les formes de mise en réserve de l'hydrogène en vue de sa mise à disposition ultérieure comme produit chimique ou vecteur énergétique. Cette étape est nécessaire car sous forme de gaz, l'hydrogène est peu dense et donc peu pratique à transporter. À titre illustratif, il faut un volume d'environ 11 m³, c'est-à-dire le volume du coffre d'un grand utilitaire, pour seulement stocker 1 kg d'hydrogène, soit la quantité nécessaire pour parcourir 100 km. Il est donc indispensable d'augmenter sa densité et plusieurs techniques existent pour cela :

- Le stockage sous forme de gaz pressurisé ;
- Le stockage sous forme cryogénique ou liquéfiée ;
- Le stockage dans des solides.

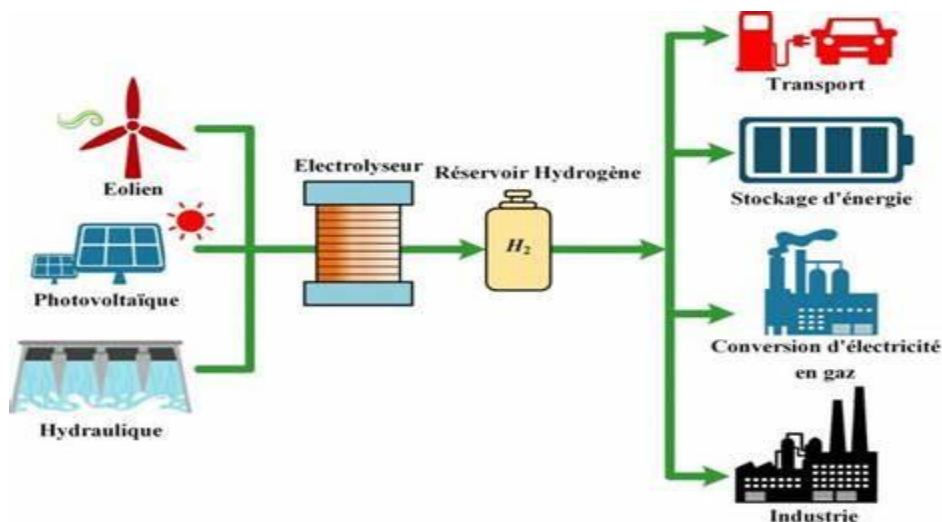


Figure II.12 : Le stockage et la distribution d'hydrogène

Le stockage sous pression est une technologie relativement simple à mettre en œuvre mais s'avère assez coûteux en énergie de compression. C'est une pratique standard depuis de très nombreuses années. En pratique, l'hydrogène est stocké dans des bouteilles ou assemblages de bouteilles cylindriques, en acier à basse ou moyenne pression (20 ou 25 MPa). L'inconvénient de ce mode de stockage reste l'encombrement, puisque la densité de l'hydrogène est de 14 kg/m³ à 20 MPa et à température ordinaire (21 °C) contre 100 kg/m³ pour le méthane.

II.6.3.Applications

L'hydrogène peut être converti en électricité, en chaleur ou en force motrice selon l'usage final. Il a l'avantage de présenter une capacité de stockage (problématique avec l'électricité) et de pouvoir être produit sans émission de CO₂. En tant que vecteur énergétique, il trouve ainsi :

- ✓ **Des applications stationnaires** : stockage d'énergie dans les bâtiments en assurant une fourniture d'électricité et de chaleur grâce à la cogénération, ce qui permettrait le développement des bâtiments à énergie positive ;
- ✓ **Des applications mobiles** : l'hydrogène peut alimenter des véhicules équipés de moteurs à combustion fonctionnant au gaz. Par ailleurs, un réservoir d'hydrogène peut-être associé à une pile combustible pour améliorer l'autonomie de véhicules électriques (électro-mobilité de 2^e génération, dite 2G, la première correspondant aux véhicules électriques) ;
- ✓ **Des applications industrielles** : l'hydrogène est un composant chimique très employé dans l'industrie.

Notons que l'hydrogène est déjà largement utilisé dans le domaine de l'aérospatial comme combustible pour la propulsion des fusées.

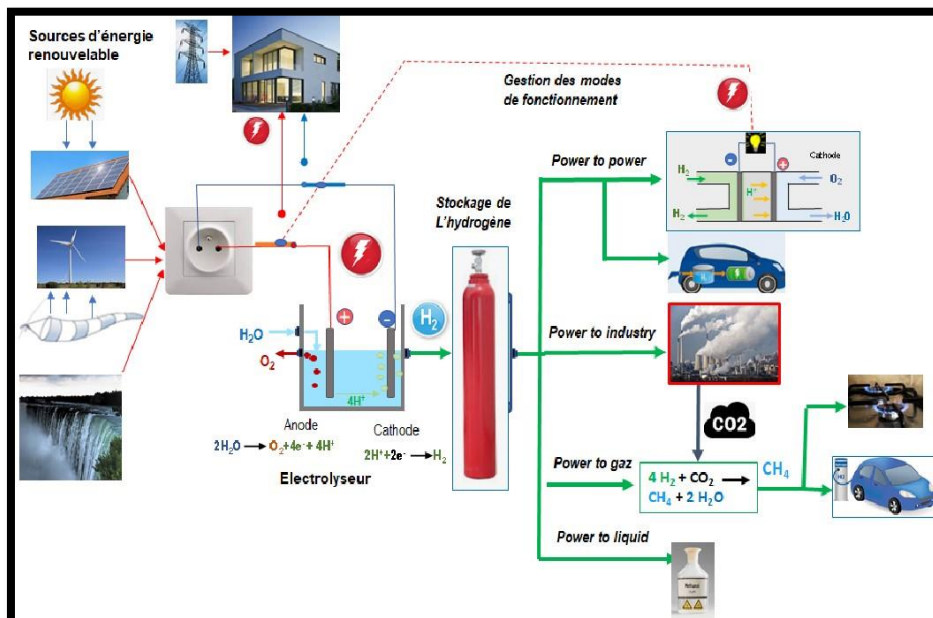


Figure II.13: Procédés de production et applications de l'hydrogène

II.7.Productions d'hydrogène, vertes

L'hydrogène répond parfaitement aux critères définis par la chimie verte, comme étant un vecteur d'énergie particulièrement efficace et un gaz non toxique. Au sujet de caractère dangereux lié à son inflammabilité et à son explosivité, pour de nombreux acteurs compromis dans la production d'hydrogène, celui-ci ne serait pas plus dangereux que les hydrocarbures (gaz ou liquides) mais serait différent, et en cela son utilisation requerrait une éducation C'est donc la production de l'hydrogène qui est un des facteurs clés du développement de l'hydrogène vecteur d'énergie. Faire l'hydrogène est une chose mais produire l'hydrogène selon un procédé vert en est une autre. Dès lors, pour trancher du caractère vert de l'hydrogène vecteur d'énergie, il semble naturel de se baser sur les principes de la chimie verte qui conviennent toutes les étapes de production d'un produit chimique.

II.7.1.Les principes de la chimie verte

La chimie verte se décline en 12 principes. Si le but est que chacun d'entre nous s'approprie les bonnes intentions de cette verte chimie, il serait peut-être souhaitable de rendre à l'avenir l'emballage un peu plus attractif. L'économie d'atomes et d'étapes qui permet de réaliser, à moindre coût, l'incorporation de fonctionnalités dans les produits recherchés tout en limitant les problèmes de séparation et de purification.

1. La prévention de la pollution à la source en évitant la production de résidus.
2. L'économie d'atomes et d'étapes qui permet de réaliser, à moindre coût, l'incorporation de fonctionnalités dans les produits recherchés tout en limitant les problèmes de séparation et de purification.
3. La conception de synthèses moins dangereuses grâce à l'utilisation de conditions douces et la préparation de produits peu ou pas toxiques pour l'homme et l'environnement.
4. La conception de produits chimiques moins toxiques avec la mise au point de molécules plus sélectives et non toxiques impliquant des progrès dans les domaines de la formulation et de la vectorisation des principes actifs et des études toxicologiques à l'échelle cellulaire et au niveau de l'organisme.
5. Réduction des solvants polluants.
6. La limitation des dépenses énergétiques avec la mise au point de nouveaux matériaux pour le stockage de l'énergie et la recherche de nouvelles sources d'énergie à faible teneur en carbone.
7. L'utilisation de ressources renouvelables à la place des produits fossiles. Les analyses économiques montrent que les produits issus de la biomasse représentent 5 % des ventes globales de produits chimiques et pourraient atteindre 10 à 20 % en 2010. Plus de 75% de l'industrie chimique globale aurait alors pour origine des ressources renouvelables.
8. La réduction du nombre de dérivés pouvant générer des déchets.
9. L'utilisation des procédés catalytiques de préférence aux procédés stoechiométriques avec la recherche de nouveaux réactifs plus efficaces et minimisant les risques en terme de manipulation et de toxicité.
10. La conception des produits/substances non persistantes en vue de leur dégradation finale dans des conditions naturelles ou forcées de manière à minimiser l'incidence sur l'environnement.

11. La mise au point des méthodologies d'analyses en temps réel pour prévenir la pollution, en contrôlant le suivi des réactions chimiques. Le maintien de la qualité de l'environnement implique une capacité à détecter et si possible à quantifier, la présence d'agents chimiques et biologiques réputés toxiques à l'état de traces (échantillonnage, traitement et séparation, détection, quantification).

12. Le développement d'une chimie fondamentalement plus sûre pour prévenir les accidents, explosions, incendies et émissions de composés dangereux.

Tableau II. 3 - Sources, besoins énergétiques et émissions dans les différents procédés de production d'hydrogène

HT : hautes températures ; HP : hautes pressions. Les émissions de produits connus pour être sains (comme O₂, H₂O...) ne sont pas indiqués.

Méthodes	Procédés de production	Sources d'hydrogène	Contraintes énergétiques et/ou chimiques ^a	Émissions secondaires ^b
Thermique	Vaporeformage	Gaz naturel (méthane)	HT et HP	CO ₂ , CO
	Oxydation partielle	Hydrocarbures	HT et HP	CO ₂ , CO, CH ₄ , C
	Thermolyse et gazéification	Biomasse, charbon	HT et HP	CO ₂ , CO, CH ₄ , C
	Dissociation de l'eau par cycle thermochimique	Eau	Chaleur (HT) de réacteurs nucléaires Auxiliaires de réaction (H ₂ SO ₄ , I ₂ , Br ₂ ...)	
Électrochimique	Électrolyse	Eau	Électricité	
	Électrolyse à haute température associée à un réacteur nucléaire	Eau	Électricité et chaleur (HT) de réacteurs nucléaires	
	Photolyse	Eau	Énergie solaire	
Biologique	Photobiologique	Eau	Algues sous l'action de la lumière solaire	
	Digestion anaérobie	Biomasse	HT	CO ₂ , CO
	Micro-organismes photosynthétiques	Biomasse	HT	CO ₂ , CO

II.8. Application d'exercices

A) Structure de matière pour l'hydrogène

Exercice N°1

Combien y a-t-il d'atomes et de molécules dans 2g de dihydrogène (H₂) à la température ambiante.

Exercice N°2

On dispose de 0,4 moles de H₂S, combien y a-t-il :

- De grammes de H₂S.
- De moles de H et de moles de S.
- De grammes de H et de grammes de S.
- De molécules de H₂S.
- D'atomes de H et de S. *Données: ${}^1_1\text{H}$ et ${}^{32}_{16}\text{S}$*

Exercice N°3

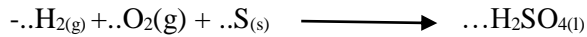
Lequel des échantillons suivants contiennent le plus de fer ?

- 1) 0.2 moles de Fe₂(SO₄)₃. 2) 20g de fer. 3) 0.3 atome-gramme de fer 4) 2.5x10²³ atomes de fer

Données : M_{Fe}=56g.mol⁻¹ M_S=32g.mol⁻¹- Nombre d'Avogadro N =6,023. 10²³

Exercice N°4

Equilibrer puis indiquer pour chacune des réactions suivantes ; le nombre de phases (homogène, hétérogène) et les corps simples ou composés :



Calculer les densités pour les gaz, par rapport à l'air dans les conditions normales (CNTP), sachant que la masse volumique de l'air est $\rho = 1.293 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$.

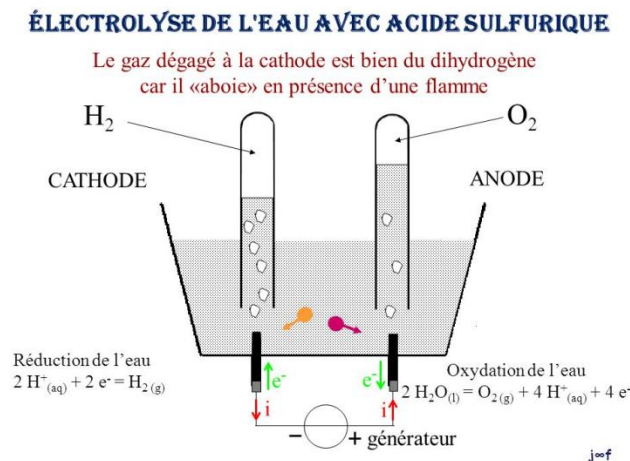
Exercice n°5

L'analyse élémentaire d'un composé a donné les résultats suivants : 71,65% en masse de Cl, 24,27% en masse de C et 4,07% en masse de H. Déterminer les formules empirique et moléculaire de ce composé sachant que sa masse molaire est de 98,96 g/mol.

Données : $M(\text{Cl}) = 35,453 \text{ g/mol}$, $M(\text{C}) = 12,011 \text{ g/mol}$, $M(\text{H}) = 1,008 \text{ g/mol}$.

B) Electrolyse de l'eau

1) Expérience



Une électrode est un conducteur plongé dans une solution conductrice.

L'anode est l'électrode reliée à la borne positive du générateur.

La cathode est l'électrode reliée à la borne négative du générateur.

L'eau pure ne conduit pas le courant électrique. Pour la rendre conductrice, on verse dans l'électrolyseur une solution de soude.

2) Observations

Des bulles de gaz se dégagent au niveau des électrodes.

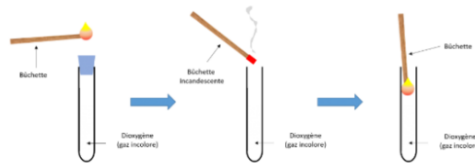
Le volume de gaz recueilli à la cathode est le double du volume de gaz recueilli à l'anode.

3) Identification des produits formés

a) **A l'anode** : Le gaz recueilli à l'anode rallume une bûchette incandescente : c'est le dioxygène.

II. Test d'identification du dioxygène

Expérience : on allume une bûchette puis on souffle dessus pour éteindre la flamme et laisser seulement un **point incandescent**. On plonge ensuite cette bûchette incandescente dans le tube à essai contenant du **dioxygène**.



Conclusion : la flamme de la bûchette incandescente se **ravive** au contact du **dioxygène**.

III. Test d'identification du dihydrogène

Expérience : on allume une allumette que l'on plonge dans un tube à essai contenant du **dihydrogène**.



Conclusion : on entend une **détonation** (« pop ») lorsque la flamme entre en contact du **dihydrogène**.

b) A la cathode : Le gaz recueilli à la cathode produit une petite détonation à l'approche d'une flamme (on dit que le gaz "aboie") : c'est le dihydrogène.

4) Conclusion

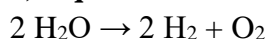
L'électrolyse de l'eau est la décomposition de l'eau par le courant électrique en dioxygène et en dihydrogène.

Le volume du dihydrogène est le double du volume du dioxygène.

$$V(\text{H}_2) = 2 \times V(\text{O}_2)$$

Le rôle de la soude est d'apporter les ions nécessaires pour rendre l'eau pure conductrice.

5) Equation-bilan



Identification des gaz

- Dihydrogène : petite explosion lors de la présentation d'une flamme.
- Dioxygène : rallume une bûchette incandescente
- Dioxyde de carbone : éteint une flamme

Exercice N°1

A. Lors d'une électrolyse de l'eau, on a recueilli 250 cm^3 d'un gaz à la cathode.

1. Qu'est-ce que l'électrolyse de l'eau ?
 2. Donner le nom de ce gaz. Comment le reconnaît-on ?
 3. Quel est le nom du gaz recueilli dans le même temps à l'anode ? Comment l'identifie-t-on ?
 4. Ecrire l'équation bilan de l'électrolyse de l'eau.
 5. Calculer son volume.
- B. On réalise l'électrolyse de l'eau additionnée de quelques gouttes de soude.
1. Faire le schéma de l'expérience
 2. Le volume de gaz recueilli à l'anode est 0,112 L
 3. Calculer le volume de gaz recueilli à la cathode.
 4. Calculer la masse d'eau décomposée.
- On donne : $V = 24\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M_{\text{O}} = 16\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M_{\text{H}} = 1\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$

Exercice N°2

Une éprouvette contient 120 cm^3 de dihydrogène et 50 cm^3 de dioxygène : on approche à son ouverture, une flamme d'un briquet dans le but de déclencher une réaction chimique.

- Donner le nom de la réaction.
- Écrire l'équation-bilan de la réaction.
- Quel est le gaz restant à la fin de la réaction ? Justifier.
- Calculer le volume du gaz restant.

Exercice N°3


Répondre par vraie ou fausse aux affirmations suivantes

- a- La soude dans la solution permet d'accélérer la réaction d'électrolyse.
 - b- Le dihydrogène se dégage à l'anode.
 - c- Le dioxygène recueilli à la cathode rallume une flamme presque éteinte.
 - d- Le volume de dihydrogène recueilli est égal au volume de dioxygène obtenu lors d'une électrolyse.
 - e- L'équation – bilan de l'électrolyse de l'eau est : $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$
2. Complète le texte avec les mots ou expressions qui conviennent :
 L'eau est un corps qui peut se présenter sous trois états. Au cours de de l'eau, deux gaz se forment : le à la cathode et le à l'anode.
 Le volume du dioxygène est la de celui du dihydrogène.

Exercice N°4

1. Parmi les quatre méthodes de production du dihydrogène présentées, quelle est la méthode la plus économique en énergie? Est-ce la plus écologique

Document 1 **Électrolyse de l'eau**



■ Lors de l'électrolyse de l'eau, comme lors de sa dissociation thermique, il faut fournir une énergie $\Delta = 282$ kJ pour dissocier une mole d'eau en dihydrogène et dioxygène.

■ Un électrolyseur.

Document 2 **Conversion du méthane**

■ Elle se fait en deux étapes :

- **étape 1** : réaction entre le méthane, CH_4 , et l'eau, H_2O , avec formation de dihydrogène et de monoxyde de carbone, CO ; elle nécessite l'apport de 244 kJ par mole de méthane consommée;
- **étape 2** : réaction entre le monoxyde de carbone formé lors de l'étape 1 et l'eau avec formation de dihydrogène et de dioxyde de carbone. Cette réaction libère de l'énergie.

Document 3 **Réaction dite du gaz à l'eau**

■ Le charbon est traité en deux étapes :

- **étape 1** : réaction entre le carbone constituant le charbon et l'eau, H_2O , avec formation de dihydrogène et de monoxyde de carbone, CO ; elle nécessite 170 kJ par mole de carbone consommée;
- **étape 2** : identique à la seconde étape de la conversion du méthane.

Document 4 **Transformation de la biomasse**

■ La cellulose ou la lignine des végétaux ont la même composition que celle d'une molécule A de formule $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_4$. Le traitement thermochimique de la biomasse se fait en deux étapes :

- **étape 1** : réaction entre A et l'eau avec formation de dihydrogène et de monoxyde de carbone, CO ; elle nécessite l'apport de 880 kJ par mole de A consommée;
- **étape 2** : identique à la seconde étape de la conversion du méthane.

D'après G. CLAUDET, « Mémento de l'Hydrogène », fiche 3.3.1, site AFH2, 2003.

2. Écrire l'équation correspondant à la réaction d'électrolyse
 3. Écrire l'équation correspondant à la réaction de vaporeformage
 4. Écrire l'équation correspondant à la réaction de pyrolyse
- Quels sont les différents procédés de fabrication de dihydrogène ?
 - Quel est celui qui est le plus utilisé ? En quoi consiste-t-il ?
 - Selon ce procédé, quel(s) avantage(s) et quel(s) inconvénient(s) y a-t-il à produire du dihydrogène avec ou sans catalyseur ?
 - Quel intérêt écologique présente l'utilisation de la biomasse en comparaison au procédé précédent ?
 - Quels seront les problèmes rencontrés après la production de dihydrogène ?
 - En considérant la production de dihydrogène par électrolyse, quelle est l'énergie électrique produite par un litre d'eau ?

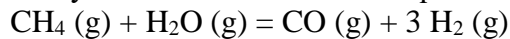
Exercice N°5

Données spécifiques • Tous les composés seront assimilés à des gaz parfaits.

- Pression standard : $P^\circ = 1$ bar.
- Données thermodynamiques

Composé	H_2O (g)	CH_4 (g)	CO (g)	CO_2 (g)	H_2 (g)
$G^\circ(1100\text{K})$ (Jmol^{-1})	- 472,020	- 309,280	- 347,000	- 162,300	- 656,650
$H^\circ(1100\text{K})$ (Jmol^{-1})	- 211,630	- 28 5,80	- 85 5,00	+ 237,10	- 354,680

Le vaporeformage du méthane issu du gaz naturel est réalisé à $T_1 = 1100 \text{ K}$ sous une pression égale à 5 bar en faisant réagir le méthane avec de la vapeur d'eau en présence d'un catalyseur à base de nickel. L'équation bilan de la réaction équilibrée mise en jeu est :



1. Calculer l'enthalpie libre standard à T_1 de la réaction.
2. Dédurre de la question précédente sa constante d'équilibre : $K_1^\circ(T_1)$.
3. Calculer l'enthalpie standard de la réaction à la température T_1 .
5. Cette réaction est-elle exothermique ou endothermique ?

Exercice N°6

1/Définir clairement les couples, écrire les demi-équations électroniques, donner les expressions littérales puis calculer les potentiels E , à 25°C , pour les systèmes suivants:

1. Dihydrogène à la pression $p = 1 \text{ bar}$ et solution acide à $\text{pH} = 3$

2/Lame de fer plongeant dans une solution de sulfate de fer II de concentration : $[\text{Fe}^{2+}] = 0,1 \text{ mol.L}^{-1}$

Solution d'exercices

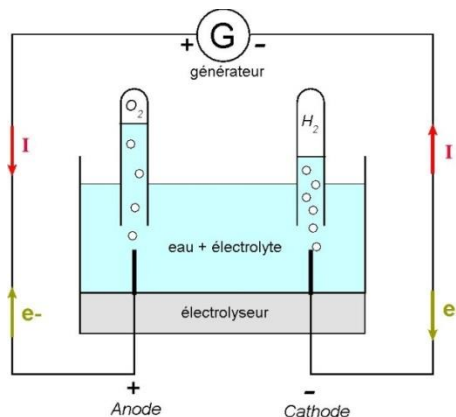
Solution de l'exercice n°1

A. Lors d'une électrolyse de l'eau, on a recueilli 250 cm^3 d'un gaz à la cathode.

- 1 L'électrolyse de l'eau est la décomposition de l'eau par le courant électrique en dioxygène et en dihydrogène
- 2 Dihydrogène : petite explosion lors de la présentation d'une flamme
- 3 Dioxygène : rallume une bûchette incandescente
- 4 $2 \text{ H}_2\text{O}_{\text{liq}} \rightarrow 2 \text{ H}_2_{\text{gaz}} + \text{O}_2_{\text{gaz}}$
- 5 $V(\text{H}_2) = 2 \times V(\text{O}_2)$ d'où $V(\text{O}_2) = 1/2 V(\text{H}_2) = 150/2 = 125 \text{ cm}^3$

B. On réalise l'électrolyse de l'eau additionnée de quelques gouttes de soude.

1 le schéma de l'expérience



2 le volume de gaz recueilli à la cathode :

$$V(\text{H}_2) = 2 \times V(\text{O}_2) \text{ d'où } V(\text{H}_2) = 0,112 \times 2 = 0,224 \text{ cm}^3$$

3 la masse d'eau décomposée. :

Dans C.N.T.P à 25°C 1Mole occupe un volume de 24l donc le nombre de mole dans l'eau est $224+112/24000 = 0,224 \text{ mol}$ d'où la masse (H_2O) de l'est $m(\text{O}_2) + m(\text{H}_2) = 18\text{g/mol}$

Donc la masse (H_2O) est $0,224 \text{ mol} \times 18 = 4,03\text{g}$

Solution de l'exercice n°2

1. le nom de la réaction : **est électrolyse**

2. À l'anode, : $2 \underline{\text{H}_2\text{O}_{\text{liq}}} \rightarrow \underline{\text{O}_2_{\text{gaz}}} + 4 \underline{\text{H}^+_{\text{aq}}} + 4 \underline{\text{e}^-}$

A la cathode, : $4 \underline{\text{H}^+_{\text{aq}}} + 4 \underline{\text{e}^-} \rightarrow 2 \underline{\text{H}_2_{\text{gaz}}}$

La réaction globale de l'électrolyse de l'eau est la suivante : $2 \underline{\text{H}_2\text{O}_{\text{liq}}} \rightarrow 2 \underline{\text{H}_2_{\text{gaz}}} + \underline{\text{O}_2_{\text{gaz}}}$

3. Le gaz restant à la fin de la réaction **V restant = 100-50 = 50cm³V(H₂)**

car le **V(H₂) = 2 x V(O₂)**

Solution de l'exercice n°3

Répondre par vraie ou fausse aux affirmations suivantes

a- La soude dans la solution permet d'accélérer la réaction d'électrolyse. **Oui**

b- Le dihydrogène se dégage à l'anode. **Non, il se dégage à la cathode**

c- Le dioxygène recueilli à la cathode rallume une flamme presque éteinte. **Oui**

d- Le volume de dihydrogène recueilli est égal au volume de dioxygène obtenu lors d'une électrolyse. **Non, il est deux fois**

e- L'équation – bilan de l'électrolyse de l'eau est : $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$. **Oui**

2. Complète le texte avec les mots ou expressions qui conviennent :

L'eau est un corps qui peut se présenter sous trois états. Au cours de **l'électrolyse** de l'eau, deux gaz se forment : **l'hydrogène** à la cathode et **l'oxygène** à l'anode.

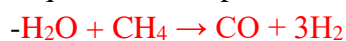
Le volume du dioxygène est **la moitié** de celui du dihydrogène.

Solution de l'exercice n°4

1. la méthode la plus économique en énergie? Est-ce la plus écologique **est l'électrolyse elle est moins couteuse et écologique parce que les sous produits sont renouvelables.**

2. L'équation correspondant à la réaction d'électrolyse : $2 \underline{\text{H}_2\text{O}_{\text{liq}}} \rightarrow 2 \underline{\text{H}_2_{\text{gaz}}} + \underline{\text{O}_2_{\text{gaz}}}$

3. l'équation correspondant à la réaction de vaporeformage



4 L'équation correspondant à la réaction de pyrolyse



- les différents procédés de fabrication de dihydrogène sont : **électrolyse, vaporeformage, pyrolyse, biomasse, biologique, nucléaire**
- La plus utilisé **est la vaporeformage, elle permet de produire de l'hydrogène à partir d'hydrocarbures**
- Selon ce procédé, les avantage(s) : **économique,**
- Les inconvénient(s) : **la pollution**
- L'intérêt écologique présente l'utilisation de la biomasse en comparaison au procédé précédent, **les deux procédés sont polluants**
- les problèmes rencontrés après la production de dihydrogène sont **économiques et écologiques**

Solution de l'exercice n°5

1 l'enthalpie libre standard à T1 de la réaction : $\text{CH}_4 (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} (\text{g}) = \text{CO} (\text{g}) + 3 \text{H}_2 (\text{g})$

$\Delta G^\circ = \sum nV_i \text{ produits} - \sum nV_i \text{ réactifs}$

AN : $\Delta G^\circ = (\Delta G^\circ \text{CO} (\text{g}) + 3\Delta G^\circ \text{H}_2 (\text{g})) - (\Delta G^\circ \text{CH}_4 (\text{g}) + \Delta G^\circ \text{H}_2\text{O} (\text{g}))$

$\Delta G^\circ = (-347 + 3(-656.65)) - (-309.28 + (-472.02)) = -2313.58 + 781.83 = -1532.28 \text{ Jmol}^{-1}$

2. Déduire de la question précédente sa constante d'équilibre : **K¹(T1).**

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \text{ d'ou } \ln K = \Delta G^\circ / RT$$

Calculer l'enthalpie standard de la réaction à la température T1

$$\Delta H^\circ = \sum n V_i \text{ produits} - \sum n V_i \text{ réactifs}$$

$$\Delta H^\circ = (\Delta H^\circ \text{ CO (g)} + 3\Delta H^\circ \text{ H}_2 \text{ (g)}) - (\Delta H^\circ \text{ CH}_4 \text{ (g)} + \Delta H^\circ \text{ H}_2\text{O (g)})$$

$$\text{AN } \Delta H^\circ = (-855 + 3(-354.68)) - (-285.8 + (-211.63)) = -1432.61 \text{ Jmol}^{-1}$$

5 Cette réaction est-elle exothermique car $\Delta H^\circ < 0$ et $\Delta G^\circ < 0$

Solution de l'exercice n°6

Equation de Nernst $E = E^\circ - 0.06 / n \log [\text{ox}]/[\text{Red}]$

1. Couple H^+/H_2 $2 \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$ $E^\circ = 0\text{V}$

$$E = E^\circ - 0.06 / 2 \log [\text{P}_{\text{H}_2}] / [\text{H}^+]^2 = \log [\text{P}_{\text{H}_2}] - 0.030 * 2 \log [\text{H}^+]$$

$$E = -0.06\text{pH} - \log [\text{P}_{\text{H}_2}]$$

$$\text{AN : } E = 0.06 * 3.2 - \log 1 = -0.18\text{v}$$

2/Lame de fer plongeant dans une solution de sulfate de fer II de concentration : $[\text{Fe}^{2+}] = 0,1 \text{ mol.L}^{-1}$

Couple Fe/Fe^{2+} $\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}$ $E^\circ = -0.44 \text{ V}$

$$E = E^\circ - 0.06 / 2 \log [\text{Fe}^{2+}] / [\text{Fe}]$$

$$\text{AN : } E = -0.44 - 0.06 / 2 \log 10^{-1} = -0.47\text{V}$$

Chapitre III. Les réseaux de distribution d'énergie

III.1. Les réseaux de distribution d'énergie

L'hydrogène est considéré par les spécialistes comme l'une des solutions potentielles face aux enjeux énergétiques et environnementaux à venir, mais son développement nécessitera certainement d'importants moyens de transport entre les sites de production et les consommateurs. Un réseau de canalisations de transport/distribution pourrait assurer ce rôle. L'hydrogène est généralement transporté sous forme comprimée via un réseau de pipelines relativement étendu, avec un total de plus de 4500 km dans le monde, dont 1 600 km en Europe et 2500 km aux États-Unis.

III.1.1. Les réseaux électriques

L'électricité circule depuis le lieu où elle est fabriquée jusqu'à l'endroit où elle est consommée, par l'intermédiaire d'un réseau de lignes électriques aériennes ou souterraines. Il permet de transporter et de distribuer l'énergie électrique sur l'ensemble du territoire. Chaque centrale électrique est raccordée au réseau électrique. Selon les distances à parcourir et la puissance à transmettre, la tension du réseau évolue d'une tension moyenne à la haute tension¹ et du courant alternatif au courant continu haute tension pour le transport sur de longues distances ou si les réseaux ont des caractéristiques (tension, fréquence, etc.) différentes. Le réseau de distribution permet d'adapter la tension et la puissance distribuées aux besoins de chaque utilisateur grâce à des réseaux de distribution moyenne et basse tension, à des transformateurs et à des postes de distribution¹. Dans la plupart des cas, les petites unités de productions (centrale au fil de l'eau, éolienne, panneaux solaires, etc.) sont directement reliées aux réseaux de distribution

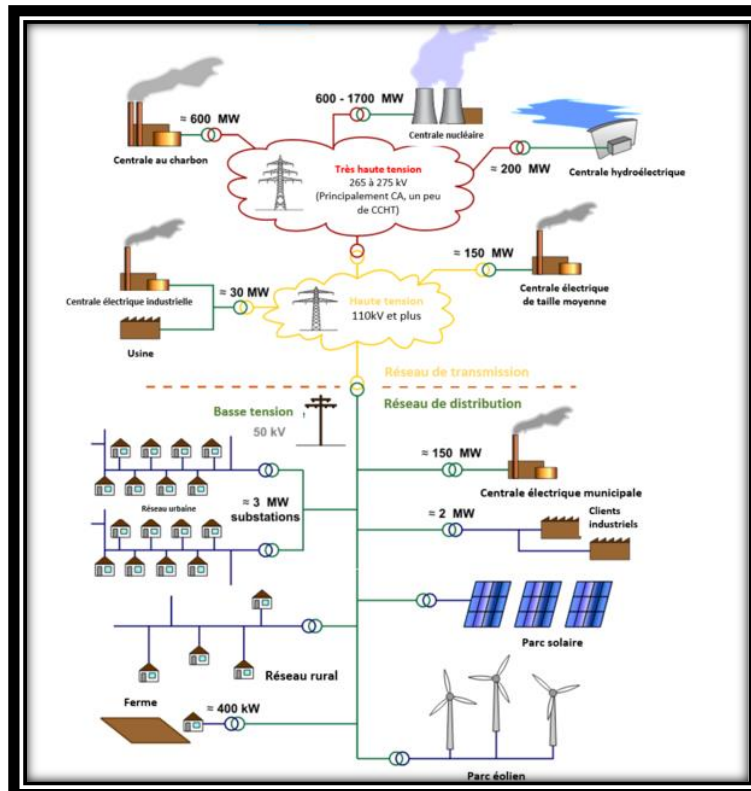


Figure III .1: Réseaux électriques

III.1.2. Les réseaux de gaz naturel

Le gaz naturel est un mélange dont le constituant principal est le méthane, CH_4 , avec une teneur comprise entre 70 et 100 %, en présence d'autres hydrocarbures (propane, butane, éthane...), de diazote, de dioxyde de carbone, de sulfure d'hydrogène. Les réseaux de transport de gaz naturel un réseau principal, ensemble des canalisations à haute pression et de grand diamètre qui relient les points d'interconnexion avec les réseaux voisins, les stockages souterrains et les terminaux méthaniens. Le gaz naturel est surtout composé de méthane mais aussi de composés comme l'éthane, le propane, le butane et les pentanes – on appelle ceux-ci les liquides de gaz naturel (LGN). Le gaz naturel peut aussi contenir des composés de soufre, de l'azote, du dioxyde de carbone, de l'eau et d'autres substances. Le gaz naturel est transporté par gazoduc ou méthanier. Il est stocké dans des sites aériens ou souterrains. Basé sur la même logique que celle du réseau de l'électricité, le réseau de transport de gaz, géré par GRT gaz ou TIGF, permet de transporter le gaz sur l'ensemble du territoire.



Figure III.2 : Réseaux de gaz naturel

III.1.3. Les réseaux de chaleur et de froid

Les réseaux de chaleur produisent et acheminent de la chaleur sous forme d'eau chaude ou de vapeur pour le chauffage ou le sanitaire (eau chaude). Les réseaux de froid produisent et distribuent de l'énergie frigorifique grâce à un réseau d'eau glacée pour rafraîchir des bâtiments. Un réseau de chaleur ou de froid est en effet un système de distribution d'énergie calorifique produite de façon centralisée, permettant de desservir plusieurs usagers.

III.2. Les modes de transfert de chaleur existants

Il existe trois modes essentiels de transferts de chaleur: la conduction, le rayonnement et la convection. On sait que la température est une fonction croissante de l'agitation moléculaire dans un corps, qu'il soit solide, liquide ou gazeux.

- ✓ La conduction thermique. La conduction thermique est le transfert de l'énergie thermique d'un atome vers un atome voisin ;
- ✓ La radiation thermique. Dans la radiation thermique, l'énergie est transportée sous forme d'ondes;
- ✓ La convection.

Les installations géothermiques peuvent fonctionner de façon réversible :

- En hiver, elles fournissent au réseau la chaleur qu'il livre aux bâtiments ;
- En été, elles stockent la chaleur prélevée dans les bâtiments climatisés, la chaleur fatale des usines ou encore les excédents de production des panneaux solaires.

Du fait de sa très basse température, le réseau peut servir de source chaude en hiver (température du réseau supérieure aux températures extérieures) et de source froide en été (température du réseau inférieure aux températures extérieures).

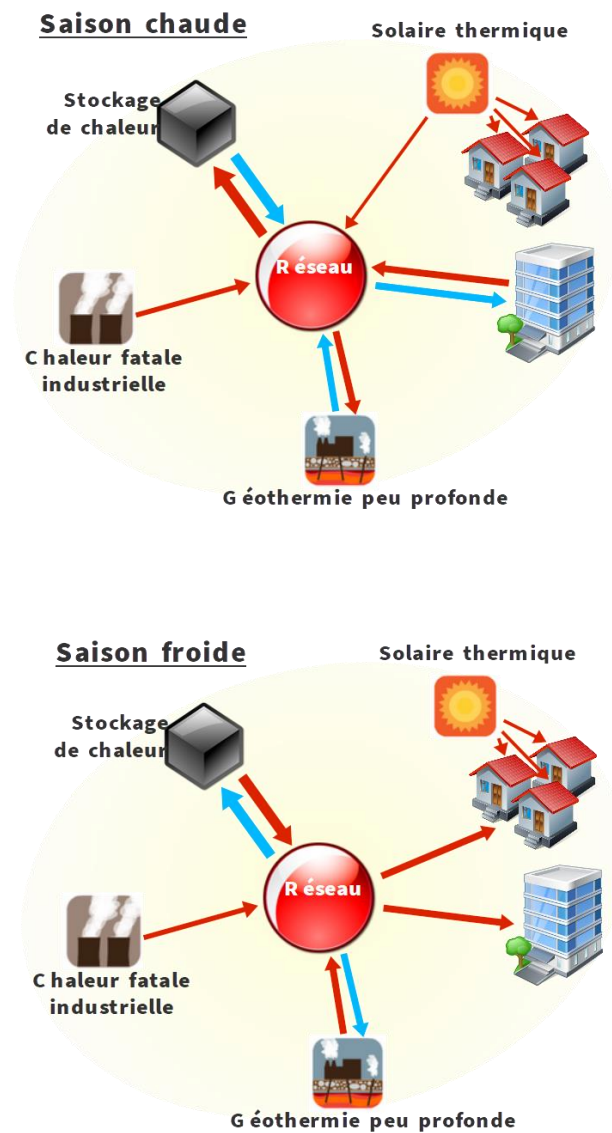


Figure III.3 : Les installations géothermiques

III.3.Application d'exercices

Exercice N°1

1. Quels sont les différents types d'hydrogène ?
2. Comment l'énergie hydrogène est-elle distribuée ?
3. Quelles sont les 4 méthodes de base pour produire de l'hydrogène ?
4. Comment se fait le transport de l'hydrogène ?
5. Comment transporter l'hydrogène dans des pipelines ?
6. A quelle pression hydrogène est –il transporté ?

Exercice N°2

1. Quels sont les textes réglementant les transports de marchandises dangereuses ?
2. Quelles sont les marchandises dangereuses en matière d'hydrogène ?
3. Quelles sont les règles d'étiquetage des marchandises dangereuses ?
4. Quelles sont les règles de marquage des récipients à pression ?

Solution d'exercices

Exercice n°1

1 les différents types d'hydrogène

- L'hydrogène gris
- L'hydrogène bleu
- L'hydrogène vert,
- L'hydrogène jaune
- L'hydrogène brun ou noir,
- L'hydrogène blanc

2. L'énergie hydrogène est distribuée par :

- les différents types d'hydrogène
- le transport par canalisations d pipelines,
- le transport routier ou ferroviaire dans des bouteilles en acier (rack) ou par tube trailer,
- le transport maritime.

3.Les 4 méthodes de base pour produire de l'hydrogène

- Le gaz naturel,
- Le pétrole,
- Le charbon
- L'électrolyse de l'eau

4. le transport de l'hydrogène se fait par : Le transport de l'hydrogène sur de longues distances se fait généralement par gazoducs

5. Transporter l'hydrogène dans des pipelines par : Un système de transport par pipeline comprend des boosters installés avec l'équipement de production d'hydrogène, des équipements pour éliminer les impuretés de l'hydrogène gazeux qui pourraient provoquer le blocage du pipeline pendant le transport de l'hydrogène.

6. La pression du transport de l'hydrogène : L'hydrogène comprimé peut être transporté par camions dans des bouteilles de gaz ou des tubes à gaz avec des pressions comprises entre 200 et 500 bars .

Solution d'exercice Exercice n°2

1. Les textes réglementant les transports de marchandises dangereuses au niveau international

Le transport de marchandises dangereuses est réglementé au niveau international par des règlements internationaux établis sur une même base appelée livre orange. Il s'agit des Recommandations relatives au transport de marchandises dangereuses édictées (vol. I & vol. II) par l'ONU.

2. les marchandises dangereuses en matière d'hydrogène

Les principales marchandises considérées comme dangereuses en matière d'hydrogène par les conventions sur le transport de marchandises dangereuses sont les suivantes :

- UN 1049 Hydrogène comprimé ;
- UN 1966 Hydrogène liquide réfrigéré ;
- UN 3166 Véhicule à propulsion par pile à combustible contenant du gaz ou du liquide inflammable ;
- UN 3468 Hydrogène dans un dispositif de stockage à hydrure métallique ;
- UN 3478 cartouches pour pile à combustible ou cartouches pour pile à combustible contenues dans un équipement ou cartouches pour pile à combustible emballée avec un équipement contenant de l'hydrogène dans un hydrure métallique.

*UN =Numéros ONU utilisés dans le transport de matières dangereuses.

3. Les règles d'étiquetage des marchandises dangereuses

- Etiquetage des colis ;
- Flèches d'orientation ;
- Signalisation orange ;
- Signification des numéros d'identification du danger
 - 23 : gaz inflammable ;
 - 223 : gaz liquéfié réfrigéré, inflammable.

4. Les règles de marquage des récipients à pression

Le numéro ONU de la marchandise précédé des lettres UN doit figurer sur chaque colis. Ce marquage doit mesurer :

- au moins 6 mm de haut sur les bouteilles ayant une contenance en eau ne dépassant pas 60L
- au moins 12 mm de haut pour les autres colis
- pour les bouteilles ayant une contenance en eau ne dépassant pas 5L le marquage doit avoir une dimension appropriée
- Les récipients rechargeables doivent porter en caractères bien lisibles et durables les indications suivantes : - numéro ONU et désignation officielle de transport du gaz contenu ;
- pour les gaz comprimés qui sont chargés en masse et pour les gaz liquéfiés, soit la masse de remplissage maximale et la tare du récipient avec les organes et accessoires en place au moment du remplissage, soit la masse brute ;
- l'année du prochain contrôle périodique

Chapitre IV : Évaluation des systèmes énergétiques

IV .Les outils d'évaluation

Avec la prise de conscience des problématiques environnementales, durant cette dernière décennie, les plans de gestion de déchets intègrent de plus en plus souvent des orientations environnementales parmi leurs axes principaux d'élaboration. Ces évaluations environnementales ont donc une importance croissante dans la mise en place de ces plans.

IV.1.Analyse de cycle de vie

Analyse de cycle de vie (ACV) permet de quantifier les impacts d'un « produit, depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par les phases de distribution et d'utilisation, , les flux de matières et d'énergies entrants et sortants à chaque étape du cycle de vie sont inventoriés (inventaire du cycle de vie : ICV) puis on procède à une évaluation des impacts environnementaux à partir de ces données grâce à des coefficients préétablis permettant de calculer la contribution de chaque flux aux divers impacts environnementaux.

Les résultats d'une ACV sont ainsi exprimés sous forme d'une série de résultats qui présente à la fois des impacts potentiels (du type « X kg de d'équivalents CO₂ pour l'effet de serre », « Y kg d'équivalents H⁺ pour l'acidification », ...) et des flux physiques (« Z MJ d'énergies non renouvelables », « W kg de déchets banals », ...)

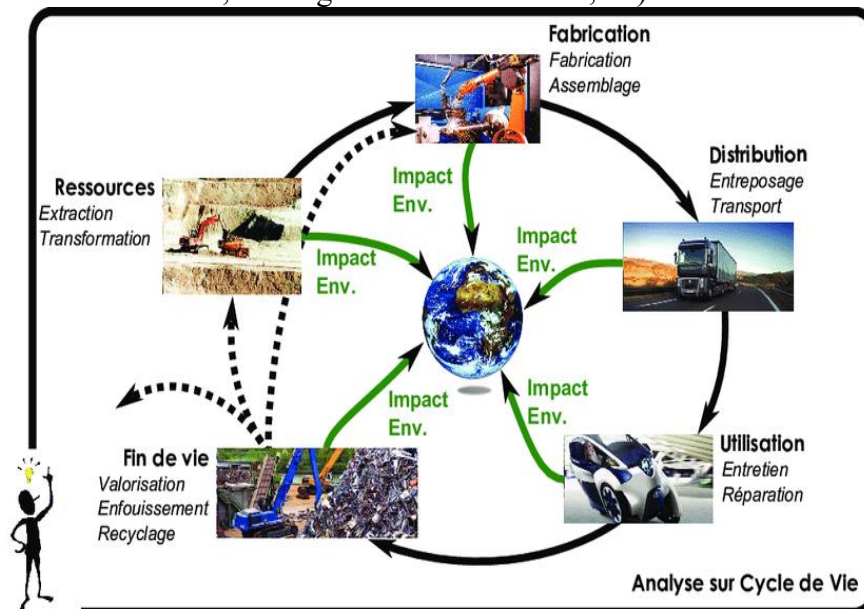


Figure IV.1 : L'Analyse de cycle de vie d'un produit

IV.2. A quoi sert une ACV

L'enjeu majeur de l'utilisation de l'ACV est d'identifier les principales sources d'impacts environnementaux et d'éviter ou, le cas échéant, d'arbitrer les déplacements de pollutions liés aux différentes alternatives envisagées. Le schéma ci-dessous illustre cette notion de transfert de pollution d'une étape du cycle de vie à une autre, transfert qui peut être révélé par une telle analyse.

IV.1. 1.Les étapes d'une ACV

Le cycle de vie du produit est généralement segmenté en cinq phases distinctes, représentées sur la figure 1

- ✓ La phase d'extraction des matières premières. Cette phase comprend les étapes depuis l'extraction et le raffinage des différents minerais jusqu'à la fabrication des matériaux et des produits semi-finis.
- ✓ La phase de fabrication du produit. Cette phase comprend tous les procédés de fabrication des pièces et composants du produit, aussi bien chez les différents fournisseurs que chez le fabricant du produit.
- ✓ La phase d'utilisation du produit par le client. Cette phase comprend, les cas échéants, la consommation d'énergie pour utiliser le produit, l'entretien, la réparation, l'utilisation de produits consommables nécessaires au bon fonctionnement du produit.
- ✓ La fin de vie du produit. Cette phase comprend les moyens d'élimination du produit usagé : recyclage, incinération, mise en décharge.
- ✓ La phase de transport. Cette phase comprend l'ensemble des moyens de transports qui ont été nécessaires pour réaliser le cycle de vie complet du produit: transport des matières premières, approvisionnement par les fournisseurs, expéditions vers les clients, collecte des produits en fin de vie.

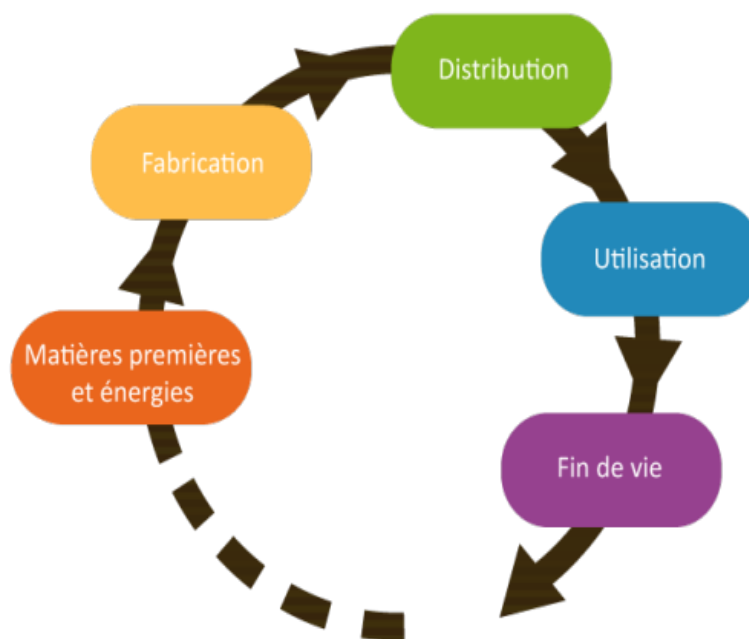


Figure IV : 2 Les étapes d'une ACV

IV.3. Les critères d'évaluation (coût, durabilité, impact environnemental)

L'Objet des critères d'évaluation est lié à la finalité de l'évaluation, laquelle vise à déterminer l'intérêt, la valeur ou l'importance d'une intervention. Les critères jouent un rôle normatif. Collectivement, ils décrivent les caractéristiques attendues de toutes les interventions, à savoir : être adaptées au contexte, être cohérentes avec les autres interventions, atteindre leurs objectifs, produire des résultats de manière efficiente et se traduire par des effets positifs durables.

❖ Le coût

Les éléments indispensables à l'estimation des coûts d'un projet

- Le planning initial du projet. ;
- La durée de chaque tâche;
- La durée totale du projet,;
- La quantité de ressources humaines nécessaire;
- La quantité de ressources matérielles nécessaire.

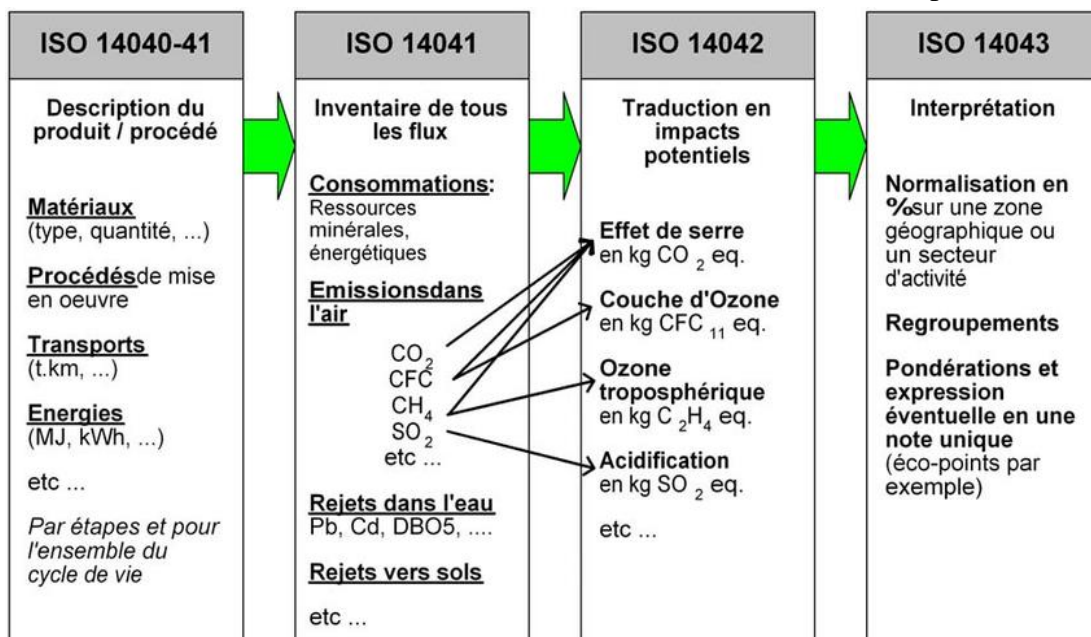
❖ La durabilité

Les indicateurs de durabilité concernent des investissements à impact désignés qui sont alignés sur les six thèmes suivants :

- Solutions environnementales ;
- Action climatique;
- Économie circulaire;
- Meilleure santé et sauvetage de vies;
- Meilleur travail et meilleure éducation;
- Inclusion sociale.

❖ Impact environnemental

L'importance de l'impact résiduel d'un projet d'équipement de transport sur les éléments des milieux naturel et humain ainsi que sur les composantes du paysage est la résultante de l'évaluation de trois critères distincts : l'intensité, l'étendue et la durée de l'impact.



IV.4. Application d'exercices

Exercice N°1

1. Quels sont les 4 types d'énergie ?
2. C'est quoi le système énergétique ?
3. Comment faire une évaluation énergétique ?
4. Comment évaluer l'efficacité énergétique d'un système ?
5. Quels sont les indicateurs de performance énergétique ?

Exercice N°2

1. Comment calculer le bilan énergétique ?
2. Comment calculer le bilan énergétique global ?

Solution d'exercices

Solution d'exercice n°1

1. les 4 types d'énergie sont :

1. l'énergie radiative ou lumineuse ;
2. l'énergie chimique ;
3. l'énergie électrique ;
4. l'énergie nucléaire.

2. **Le système énergétique est :** C'est un dispositif électrique qui génère de l'énergie pour alimenter des appareils ou toute autre application. **Système solaire :** C'est un dispositif qui permet de transformer l'énergie lumineuse solaire en énergie thermique ou électrique

3. Une évaluation énergétique c'est :

- Le niveau de consommation d'énergie des appareils ;
- La portion estimée d'énergie renouvelable dans la consommation énergétique totale ;
- L'estimation des dépenses annuelles liées à l'usage de ces équipements ;
- L'estimation de leurs émissions de gaz à effet de serre à l'année.

4. Évaluer l'efficacité énergétique d'un système

Pour déterminer le rendement énergétique d'un appareil, il faut diviser la quantité d'énergie fournie par la quantité d'énergie consommée. Il faut ensuite multiplier le résultat par 100 pour obtenir le pourcentage de rendement.

5. Les indicateurs de performance énergétique sont :

Un indicateur de performance énergétique (IPÉ) est un ratio (kWh/TEE, kWh/Tonne produite ...) qui vous permettra de comparer et de suivre la performance énergétique dans le temps des usages énergétiques auxquels elle est associée.

Solution d'exercice n°2

1. **Calculer le bilan énergétique :** Le bilan énergétique vous fournit la carte des déperditions thermiques de vos équipements, ainsi que toutes les solutions d'isolation pour y remédier. Le bilan énergétique n'est pas obligatoire mais il est fortement recommandé avant le lancement de travaux de rénovation

2. **Calculer le bilan énergétique global:** À l'énergie interne d'un système s'ajoute son énergie mécanique macroscopique $E_m = E_c + E_p$. Il en résulte que l'énergie globale d'un système vaut : $E_{totale} = U + E_m = E_c + e_c + E_p + e_p$.

3. calculer sa classe énergétique

Chapitre V : Intégration des énergies renouvelables

V.1. Les sources d'énergie renouvelable (solaire, éolien, hydraulique)

Les énergies renouvelables proviennent de sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain.

IV.1.1. Les différentes énergies renouvelables

V.1.1.1. L'énergie solaire

Le soleil possède une température de surface de 6000°C, maintenue par de la fusion nucléaire qui s'opère en son sein. Une grande partie de cette énergie est perdue dans l'espace, mais les radiations qui parviennent sur Terre représentent une source constante d'énergie. Ajoutons que l'énergie solaire est l'énergie renouvelable la plus importante.

A. Elle peut être convertie en chaleur ou en électricité.

L'énergie solaire convertie en chaleur pour la production d'eau chaude, à usage sanitaire ou pour le chauffage :

B. L'énergie solaire convertie en électricité.

a) Indirectement après conversion en chaleur puis en énergie mécanique dans les centrales thermiques solaires.

b) La chaleur solaire est concentrée, par focalisation des rayons solaires, pour atteindre une température de plusieurs centaines de degrés. Elle est ensuite convertie en énergie mécanique,

c) Directement par effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque, découvert par le physicien Becquerel en 1839, permet la conversion directe du rayonnement solaire en électricité. Lorsque les photons (particules de lumière) frappent certains matériaux, ils délogent et mettent en mouvement les électrons des atomes de ces matériaux. Or le courant électrique n'est rien d'autre qu'un mouvement d'électrons. Des cellules photovoltaïques ou photopiles transforment directement la lumière du soleil en électricité. Elles sont composées de matériaux semi-conducteurs (généralement du silicium) qui ont la propriété de convertir la lumière qu'ils reçoivent en charges électriques.



Figure V.1 : Panneaux solaire

Des photopiles sont connectées en série. Ces séries de cellules sont montées en parallèle et intégrées entre deux feuilles de verre serties sur leur pourtour dans un cadre en aluminium ou en acier. Le tout forme un panneau rectangulaire : un module photovoltaïque.

Une installation peut en comprendre plusieurs.

Ces modules photovoltaïques doivent être installés dans des endroits où il n'y aura pas d'ombre.

L'énergie solaire étant intermittente, il faut pouvoir stocker l'énergie produite dans des batteries, ou être relié à un réseau de distribution électrique.

C. Avantage :

- ✓ Énergie disponible partout à la surface de la Terre.
- ✓ Usage non polluant.
- ✓ Les cellules n'ont pas de partie mécanique et ne nécessitent guère d'entretien.

F) Inconvénients :

- ✓ Le soleil est intermittent et on ne peut pas le stocker.
- ✓ Le coût de production des cellules photovoltaïques est très élevé. (En effet, le silicium est cher (et l'est de plus en plus en raison d'une forte augmentation de la demande)).
- ✓ La fabrication des cellules dégage du CO₂.

V.1.1.2. L'énergie hydraulique

- L'énergie hydraulique est indirectement d'origine solaire, le soleil, responsable de l'évaporation, étant à l'origine du cycle de l'eau.
- L'énergie des rivières et des fleuves.
- L'énergie potentielle de l'eau (son énergie de chute) va être captée et transformée en énergie mécanique (par une turbine) qui sera elle-même transformée en énergie électrique (par un générateur). Cela nécessite :
 - un cours d'eau ;
 - un barrage qui créera ;
 - une hauteur de chute;
 - un réservoir.



Figure V.2 : Barrage Hydroélectrique

B) Avantages :

- ✓ Énergie non polluante.
- ✓ L'eau peut être stockée dans des réservoirs (ce qui n'est pas le cas du soleil et du vent)
- ✓ les centrales munies d'un réservoir peuvent s'adapter rapidement aux variations (pics horaires) de la demande en électricité : on ouvre les vannes quand il y a une pointe dans la demande en électricité. (Les centrales thermiques, classiques ou nucléaires, n'ont ni cette rapidité, ni cette souplesse.)
- ✓ Grande longévité des équipements.
- ✓ Haut rendement : 90%

C) Inconvénients :

- ✓ La construction d'un grand réservoir en amont d'un barrage nécessite parfois le déplacement de populations (occupant les terres à submerger). Ex. : barrage chinois des Trois Gorges : déplacement d'environ un million de personnes.
- ✓ Risque pour la population vivant en aval du réservoir, en cas de rupture du barrage (pouvant survenir lors d'un séisme, de trop grandes crues, ou par vieillissement).
- ✓ Au point de vue environnemental :
- ✓ Perturbation, de la faune et de la flore présente dans le cours d'eau à l'endroit transformé en réservoir.
- ✓ Le barrage est un obstacle à la migration des poissons (descente ou remontée).

V.1.1.3. L'énergie éolienne

Le vent est en fait une énergie d'origine solaire. En effet, le rayonnement solaire réchauffe inégalement la surface de la terre et crée ainsi des zones de températures, de densités et de pressions différentes. Les vents sont des déplacements d'air entre ces différentes zones.

L'énergie cinétique du vent va être convertie en énergie mécanique, elle même généralement transformée en énergie électrique au moyen d'une éolienne.

Une éolienne est composée d'une tour (hauteur de 40 à 120m) surmontée d'un rotor constitué d'un axe horizontal portant (2 ou) 3 pales et actionnant un générateur par le biais d'un multiplicateur de vitesse. La vitesse du vent est plus élevée en hauteur, puisqu'elle n'est alors plus freinée par les rugosités (arbres, bâtiments,...) du sol.



Figure V.3 : Energie éolienne

C'est ce qui explique la hauteur de la tour. Entre l'hélice et le générateur électrique se trouve un multiplicateur de vitesse, car l'hélice tourne à des vitesses d'environ 10 à 60 tours/minute alors qu'un générateur électrique doit être entraîné à environ 1000 à 1500 tours/minute.

La puissance d'une éolienne : $P=1/2\rho SV^3$

(ρ étant la densité de l'air, S étant la surface et V étant la vitesse) étant proportionnelle à la surface balayée par l'hélice, le diamètre de l'hélice peut atteindre de 80 à 90 mètres.

A/ Avantages :

- ✓ Énergie non polluante.
- ✓ Son coût devient compétitif.
- ✓ La période de haute productivité (vents plus forts), en hiver, correspond à la période pendant laquelle la demande est plus forte.
- ✓ Une éolienne est entièrement démontable et remplaçable.

B/ Inconvénients :

- ✓ Le vent est intermittent et on ne peut pas le stocker.
- ✓ Des vents trop faibles ou trop forts ne sont pas exploitables.
- ✓ Les sites les plus venteux sont souvent éloignés des endroits où l'électricité doit être consommée.
- ✓ Les éoliennes sont souvent jugées inesthétiques.
- ✓ Les éoliennes génèrent du bruit.
- ✓ Les pales des éoliennes sont dangereuses pour les oiseaux, surtout migrateurs.

V.1.1.4. La biomasse

On entend par biomasse toute matière organique contenant de l'énergie emmagasinée sous forme d'énergie chimique, généralement au sein de composés de carbone. Elle s'obtient généralement à partir de bois, de fumier, de résidus de récoltes et d'ordures ménagères.

La biomasse est l'énergie renouvelable la plus développée dans le monde, représentant 11% de la production énergétique totale.

A) Utilisation du bois comme combustible

Le bois est le principal combustible végétal.

Il peut être transformé en énergie par :

- Carbonisation : on obtient du charbon de bois, qui présente 2 avantages :
- Il est plus concentré en énergie que le bois et est donc plus économique à transporter.
- Il dégage moins de fumées que le bois. Son utilisation est donc plus commode.

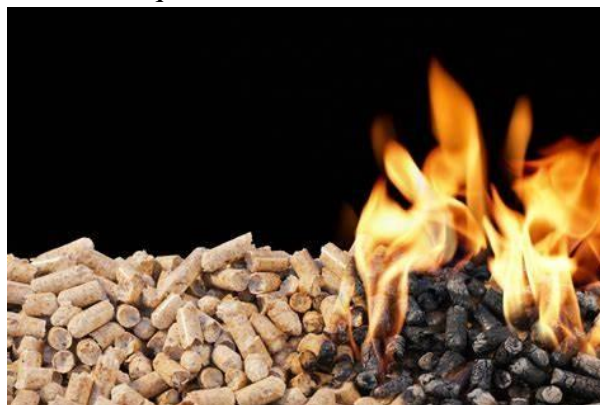


Figure V.4 : Energie biomasse

B) Avantage :

- ✓ Le prix du bois est inférieur à celui du fioul ou du gaz.
- ✓ Quand on cumule les coûts du combustible, d'installation et de fonctionnement, le chauffage au bois est intéressant.
- ✓ Valorisation des déchets de bois.
- ✓ Utilisation de terres en friche pour de nouvelles cultures spécifiques :

C) Inconvénients :

- ✓ Le prix de l'installation d'une chaudière à bois est de 2 à 3 fois plus cher que celui d'une chaudière à fioul.
- ✓ Pour être efficace, le bois doit être sec : pour cela, il faut attendre 1,5 à 2 ans (après la coupe).
- ✓ Le pouvoir calorifique du bois (sec) est nettement inférieur à celui du charbon ou du fioul.
- ✓ Le bois pollue (particules de fumées, hydrocarbures, autres gaz contribuant à l'effet de serre).

Le chauffage au bois pollue cependant nettement moins que celui au charbon, au fioul ou même au gaz.

Quant au CO₂ qu'il dégage, il est réabsorbé par la végétation qui repousse, du moins pour autant que celle-ci soit reconstituée dans les mêmes proportions que la végétation utilisée.

- ✓ Consommation de bois de feu qui détruit la forêt mais plutôt sa conversion en terres de culture ou de pâturage.

V.1.1.5. L'énergie de la Terre ou géothermie

La chaleur de la Terre provient de sa radioactivité naturelle (désintégration de l'uranium, du thorium ou du potassium) qui maintient le magma à haute température. La température du sous-sol à 1000 mètres est en général de 30°C

- La géothermie « basse énergie » (→chauffage)
- Les ressources géothermales dites de « basse énergie » se caractérisent par une température comprise entre 30 et 100°C.
- Elles se rencontrent à une profondeur moyenne de 1000 à 2500 mètres, dans des formations rocheuses et perméables remplies d'eau, situées principalement dans des bassins sédimentaires de très grandes dimensions.

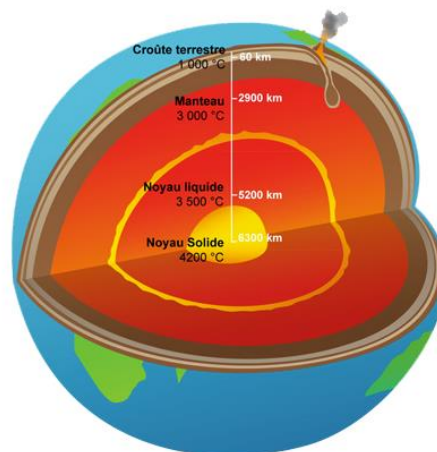


Figure V.5 : Energie de la Terre

B) la géothermie « moyenne et haute énergie » (→électricité).

La géothermie « moyenne énergie » exploite des gisements d'eau chaude sous pression dont la température est comprise entre 90°C et 180°C.

C) Avantages.

- ✓ Énergie peu polluante.
- ✓ Coûts de fonctionnement bas.

D) Inconvénients.

- ✓ Coût d'investissement important.
- ✓ Les gaz (souvent) contenus dans l'eau ou la vapeur géothermales peuvent polluer l'atmosphère.
- ✓ L'eau géothermale, rejetée dans la nature après avoir cédé sa chaleur, peut polluer les rivières en raison des sels et métaux qu'elle contient.

V.2. Application d'exercices

Exercice N°1

1. Quelle est l'utilité des énergies renouvelables ?
2. Comment produire de l'énergie à partir d'énergie renouvelables ?
3. Quelles sont les sources d'énergie renouvelable utilisée pour produire de l'énergie électrique ?
4. Quel est l'impact des énergies renouvelables sur la société ?
5. Quelle est la source d'énergie renouvelable la plus efficace ?
6. Quels sont les avantages de l'énergie verte ?

Exercice N°2

1. Quelles sont Les défis à relever?
2. Quelles sont Les implications de l'avenir des énergies renouvelables
3. Quelles sont Les perspectives d'avenir?

Solution d'exercices

Solution d'exercice n°1

1. **L'utilité des énergies renouvelables est** : Elles permettent de produire de l'électricité, de la chaleur, du froid, du gaz, du carburant, du combustible. Ces sources d'énergie, considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain, n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes.
2. **Produire de l'énergie à partir d'énergie renouvelables** : L'électricité renouvelable peut être produite à partir de l'éolien, du solaire photovoltaïque, du bois, de la biomasse, de la géothermie, des énergies marines, de l'hydroélectricité et du solaire Thermodynamique
3. **Les sources d'énergie renouvelable utilisée pour produire de l'énergie électrique** :

On compte cinq sources d'énergie renouvelable principales :

- ✓ L'énergie solaire : les rayons du soleil ;
- ✓ L'énergie éolienne : la force du vent ;
- ✓ L'énergie hydraulique : la puissance de l'eau ;
- ✓ L'énergie biomasse : l'utilisation des matières organiques ;
- ✓ L'énergie géothermique : la chaleur de la terre.

4. l'impact des énergies renouvelables sur la société : Les énergies renouvelables peuvent jouer un rôle plus important dans l'approvisionnement en énergie primaire lorsque la fourniture de des services énergétiques est plus efficace.

5. la source d'énergie renouvelable la plus efficace est : le soleil est notre source d'énergie renouvelable la plus fiable et prévisible

6. Les avantages de l'énergie verte sont :

- ✓ Stabilité climatique et environnementale ;
- ✓ Démarches simplifiées ;
- ✓ Production d'électricité sans émission de CO₂ ;
- ✓ Accessibilité et disponibilité de l'énergie ;
- ✓ Impact faible sur l'environnement.

Solution d'exercice n°1

1. Les défis à relever sont :

- ✓ Coûts de production et de stockage ;
- ✓ Les obstacles techniques ;
- ✓ Les obstacles politiques et sociaux.

2. Les implications de l'avenir des énergies renouvelables sont :

- ✓ Impacts environnementaux et climatiques (ex. réduction des émissions de gaz à effet de serre) ;
- ✓ Impacts économiques (ex. création d'emplois, baisse des coûts de production) ;
- ✓ Impacts sociaux et politiques (ex. accès à l'énergie pour les populations mal desservies).

3. Les perspectives d'avenir sont :

- ✓ Les objectifs et les engagements internationaux en matière d'énergies renouvelables ;
- ✓ Les scénarios de croissance futurs pour les énergies renouvelables (ex. 100 % d'énergie renouvelable, atteindre les objectifs climatiques, etc.) ;
- ✓ Les technologies émergentes et les avancées attendues dans les prochaines années.

VI. La modélisation des systèmes énergétiques

VI. Introduction

La modélisation énergétique est un outil qui permet de comprendre les équipements qui consomment moins ou trop d'énergie dans les processus de production. Elle permet également de comprendre comment ce mode d'utilisation évolue dans le temps. La modélisation des systèmes énergétiques a pour but de faire pour chaque système énergétique, une présentation du principe générale du système, une analyse thermodynamique de son fonctionnement conduisant notamment à son principe de conception et une présentation technologique

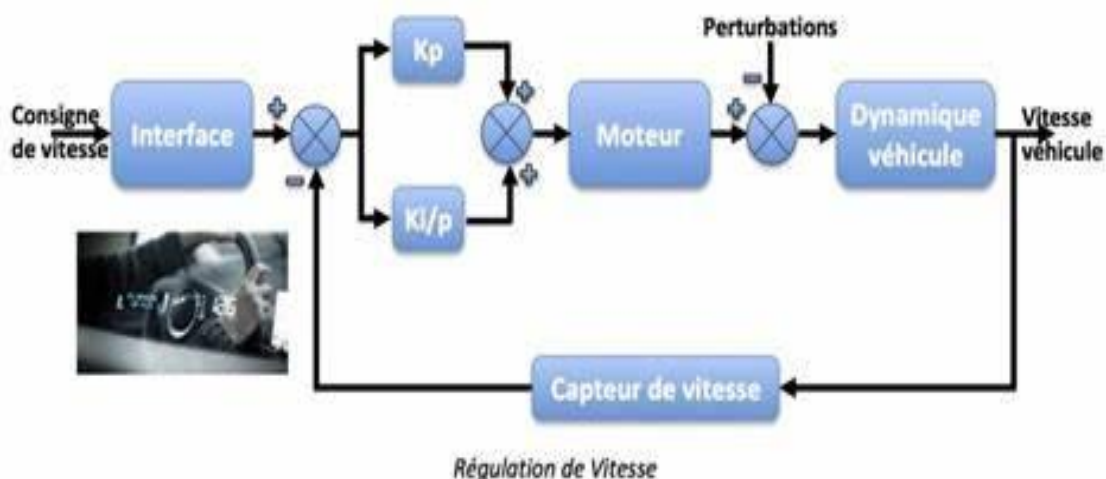


Figure V.1 : Modéliser les systèmes Asservis

Les projections énergétiques sont au cœur de ces exercices de modélisation. En comparaison d'autres secteurs, la production d'énergie comporte certaines spécificités :

1. l'énergie est utilisée dans tous les secteurs de l'économie ;
2. la production d'énergie requiert des infrastructures de long terme ;
3. la production et l'utilisation d'énergie s'accompagnent d'externalités environnementales locales et globales

VI.1. Démarche de la modélisation et éléments structurants

Un modèle est une construction mathématique visant, à partir d'hypothèses d'entrée et de processus de résolution, à représenter le fonctionnement d'un système réel (le climat, l'économie d'un pays, etc.), et son évolution dans le temps, afin d'aider les utilisateurs à organiser d'une manière logique et cohérente un travail de réflexion sur le comportement d'un tel système.

Système énergétiques de chimie d'hydrogène
Master I Hydrogène Vert vecteur d'Énergie (HVE)

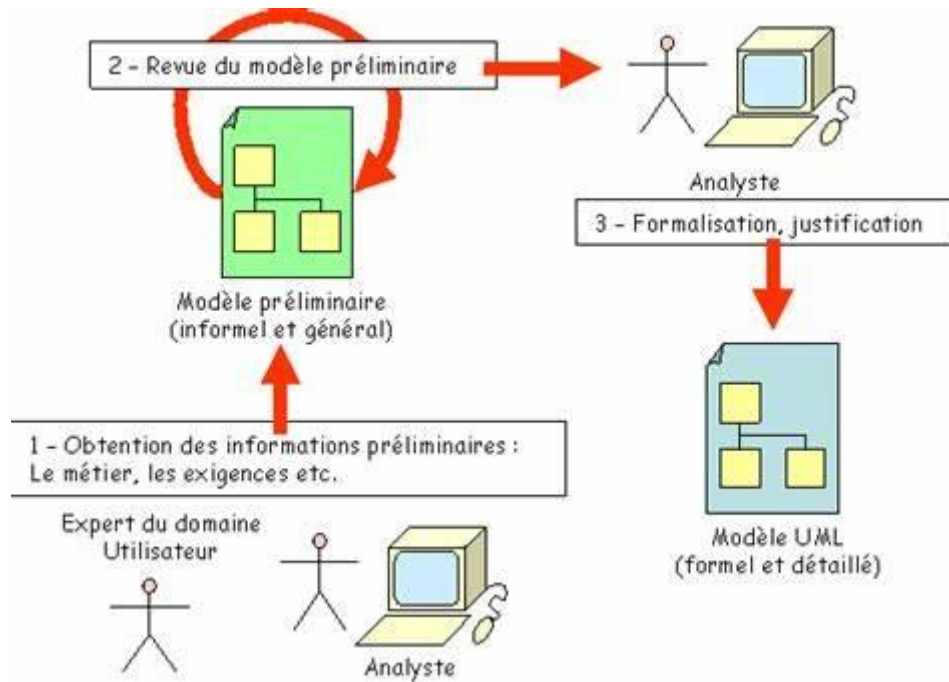


Figure VI.2 : Méthode proposée pour la modélisation

VI.2. Méthode de résolution

On distingue généralement deux structures de résolution mathématiques différentes sur lesquelles peuvent reposer les modèles : les modèles de simulation et les modèles d'optimisation. Ces deux classes de modèles ne vont pas répondre au même type de question

1. **La logique d'optimisation** repose sur la minimisation d'une grandeur de coût, appelée fonction objectif. Cette méthode permet par exemple de déterminer un système optimal pour satisfaire une demande. Ce mode de résolution peut également satisfaire en parallèle d'autres contraintes prédéfinies (limites physiques sur la disponibilité de ressources, les potentiels techniques, les limites climatiques, etc.). Ces modèles sont généralement dits parfaitement omniscients et optimisent les variables sur la période entière d'étude. Ce type de modèle se prête donc bien aux exercices dits normatifs avec des scénarios plutôt décisionnels, qui visent à répondre à la question « Comment atteindre un objectif donné, compte tenu des contraintes ? ». Par exemple, de nombreux modèles s'interrogent actuellement sur la question : « Comment limiter une augmentation des températures moyennes mondiales inférieures à 2°C, compte tenu des technologies actuelles et de leurs coûts ? ».
2. **La logique de simulation** a pour objectif de reproduire un système réel afin de pouvoir étudier son comportement, généralement par une extrapolation tendancielle du passé. Les modèles de simulation vont donc plutôt conduire à décrire ce qui pourrait se passer partant d'une situation de départ connue et selon une évolution des variables du modèle décrite par des lois d'évolution explicites et calibrées par l'observation de données historiques. Ces modèles sont généralement utilisés pour des scénarios exploratoires, qui visent à répondre à la question « Que peut-il advenir ? ». Ils

Système énergétiques de chimie d'hydrogène Master I Hydrogène Vert vecteur d'Energie (HVE)

permettent ainsi d'extrapoler des trajectoires basées sur des éléments de prospective classique fondés sur une approche dite « What if ? »

VI.3. Les paradigmes de modélisation

On parle alors de trois axes de modélisation

1. Modélisation structurale
2. Modélisation dynamique
3. Modélisation fonctionnel

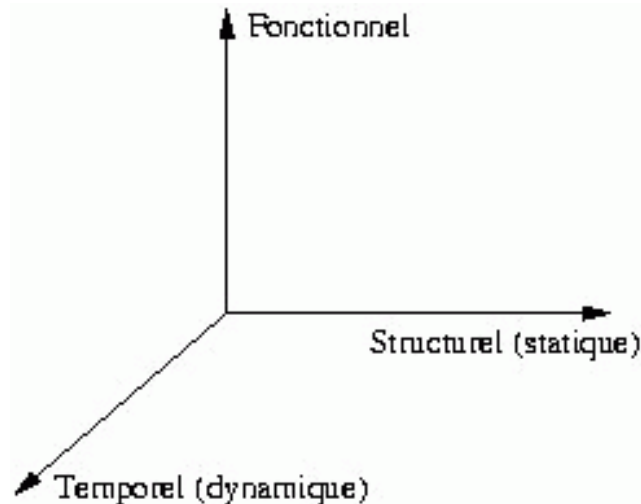


Figure VI.3 : Les paradigmes de modélisation

Par exemple, la structure du modèle d'évaluation intégrée développé par NASA, dit MESSAGE-GLOBIOM, est composée de cinq modèles différents, complémentaires et spécialisés dans différents domaines :

- le modèle énergétique MESSAGE ;
- le modèle d'utilisation des terres GLOBIOM ;
- le modèle de pollution atmosphérique et de gaz à effet de serre GAINS ;
- le modèle macroéconomique agrégé MACRO ;
- le modèle climatique simple MAGICC.

VI.4. La modélisation des systèmes énergétiques

- Début qui remonte aux années 1970, suite aux premiers chocs pétroliers ;
- Intérêt pour étudier l'évolution des systèmes énergétiques et faire face aux bouleversements économiques qui coïncide avec l'émergence du pouvoir informatique ;
- De nouveaux enjeux, dont les changements climatiques, ont fait en sorte que la modélisation des systèmes 3E «énergie –économie –environnement» est encore plus pertinente qu'il y a 40 ans ;

Système énergétiques de chimie d'hydrogène **Master I Hydrogène Vert vecteur d'Énergie (HVE)**

- Malgré tout, les modèles restent peu utilisés et peu compris pour appuyer la prise de décisions stratégiques au sujet de problématiques complexes, dont la transition des systèmes énergétiques

VI.4. Utilité des modèles énergétiques

- Estimer les besoins en énergie à long terme ;
- Bénéficier d'une vision intégrée et consistante des systèmes énergétiques et de leur évolution à long terme ;
- Évaluer les transformations nécessaires à l'atteinte d'objectifs énergétiques ;
- Évaluer les impacts de l'innovation technologique ;
- Évaluer les impacts économiques et environnementaux des politiques –Tarification du carbone –Électrification des transports –Moratoire sur l'exploitation des hydrocarbures ;
- Identifier les politiques à mettre en place prioritairement pour atteindre les objectifs.

VI.5. Classification simplifiée des modèles 3E

Simulation	Optimisation
<ul style="list-style-type: none">• Modèles exploratoires permettant d'évaluer l'impact des changements sur les systèmes énergétiques.• Prévisions• Solutions probables	<ul style="list-style-type: none">• Modèles qui se concentrent sur des critères spécifiques pour favoriser le changement des systèmes énergétiques.• Projections (scénarios)• Solutions idéales

V.6. Quelques mots pour décrire les modèles énergétiques

- ❖ Technico-économique
- ❖ Programmation linéaire
- ❖ Dynamique des systèmes
- ❖ Programmation en nombres entiers
- ❖ Dynamique récursive
- ❖ Input-Output

Références bibliographiques

1. Edouard Freund, Paul Lucchese · 2012 'L'hydrogène, carburant de l'après-pétrole '
2. MATHIS, Paul.. Versailles : Les énergies : comprendre les enjeux .Editions Quae, 2011, 252 P. Bibliographie, sitographie, infographie - ISBN 978-2-7592-1653-6.
3. HOUSECROFT Catherine E., SHARPE Alan G. Inorganic Chemistry. 4e édition. Pearson, 2012, 1257p.
4. AVERILL, Bruce A., ELDREDGE Patricia. Chemistry: Principles, Patterns, and Applications. Pearson, 2007, 3033 p.
5. Tharcis, Marion. "Synthèse et caractérisation d'assemblages supramoléculaires organisés par liaisons hydrogène dans l'eau." Paris 6, 2011. <http://www.theses.fr/2011PA066058>.
6. Gagnon-Thibault, Évelyne. "Synthèse et caractérisation de matériaux polymères poreux pour le stockage d'hydrogène." Thesis, Université Laval, 2012. <http://www.theses.ulaval.ca/2012/29167/29167.pdf>. Pierre Malbrunot, Tapan Bose · 2007 'L'hydrogène: pour relever le défi énergétique du XXIe siècle books.google.com › books