



## شكر و عرفان

لا بد لنا و نحن نخطو خطواتنا الأخيرة في الحياة الجامعية من وقفة نعود إلى أعوام

قضيناها في رحاب الجامعة مع أساتذتنا الكرام الذين قدموا لنا الكثير باذلين

...بذلك جهودا كبيرة في بناء جيل الغد لتبعث الأمة من جديد

و قبل أن نمضي نقدم اسمى آيات الشكر و الامتنان و التقدير و المحبة إلى الذين

... حملوا أقدس رسالة في الحياة

... إلى الذين مهدوا لنا طريق العلم و المعرفة

... إلى جميع أساتذتنا الأفاضل

نخص بالتقدير و الشكر

الأستاذ / بشكي جمال

الذي نقول له بشراك قول رسول الله صلى الله عليه و سلم

" إن الحوت في البحر و الطير في السماء ليصلون على معلم الناس الخير "

و كذلك نشكر كل من ساعد على إتمام هذا البحث و قدم لنا العون و مد لنا يد المساعدة و

زودنا

بالمعلومات اللازمة لهذا البحث و نخص بالذكر

سيف الدين بركات و رقيق زوليخة

كن عالما ... فان لم تستطيع فكن متعلما... فان لم تستطيع فأحب العلماء... فان لم

تستطع فلا تبغضهم

# الإهداء

اهدي هذا البحث إلى والدي العزيز سر قوتي

و جهدي

إلى والدتي الحب الذي لا ينتهي أبدا

إلى أستاذي الفاضل الذي لطالما أنار لي دربا

إلى كل من ساهم في نجاحي

و ساعدني على تخطي أصعب اللحظات .

## الفهرس

I	الشكر و العرفان
II	الإهداء
III	قائمة الأشكال
IV	قائمة الجداول
1	الملخص
2	المقدمة العامة
الفصل الأول : تقييم مصادر الطاقة	
4	1.1. المقدمة
4	2.1. تعريف الطاقة
4	3.1. تصنيف الطاقة
4	3.1_1. الطاقة التقليدية أو المستنفذة
5	3.1_2. الطاقة المتجددة أو النظيفة أو البديلة
5	4.1. مصادر الطاقة
5	4.1_1. الوقود الأحفوري
5	4.1_1. أ. الغاز الطبيعي
6	4.1_1. ب. الفحم
6	4.1_1. 1. إيجابيات الوقود الأحفوري
6	4.1_1. 2. سلبيات الوقود الأحفوري
7	4.1_2. طاقة المد و الجزر
8	4.1_2. 1. إيجابيات طاقة المد و الجزر
8	4.1_2. 2. سلبيات طاقة المد و الجزر
8	4.1_3. الطاقة الحرارية الجوفية
9	4.1_3. 1. إيجابيات طاقة الحرارية الجوفية
9	4.1_3. 2. سلبيات طاقة الحرارية الجوفية
10	4.1_4. طاقة الرياح
10	4.1_4. 1. إيجابيات طاقة الرياح
10	4.1_4. 2. سلبيات طاقة الرياح
10	4.1_5. الطاقة النووية

11	4.1_5.1. إيجابيات طاقة النووية
12	4.1_5.2. سلبيات طاقة النووية
12	4.1_6. الطاقة الشمسية
13	4.1_6.1. إيجابيات طاقة الشمسية
13	4.1_6.2. سلبيات طاقة الشمسية
14	4.1_7. الوقود الحيوي
14	4.1_7.1. إيجابيات الوقود الحيوي
14	4.1_7.2. سلبيات الوقود الحيوي
14	5.1. الملخص

## الفصل الثاني : إنتاج الهيدروجين

16	2.1. المقدمة
16	2.2. نظام الهيدروجين
17	3.2. إنتاج الهيدروجين
18	3.2.1. من الوقود الأحفورية
18	3.2.2. من الغاز الطبيعي
18	3.2_2.1. طريقة إعادة تشكل البخار
20	3.2_2.2. طريقة الأكسدة الجزئية
22	3.2_2.3. إعادة تشكيل بالحرارة الذاتية
22	3.2_3. من الفحم
22	3.2_3.1. التغويزات
22	3.2_3.2. من الفحم
23	3.2_3.1. التقاط و تخزين CO <sub>2</sub>
23	3.2_4. من الدورات الكميا-حرارية
24	3.2_4.1. دورت (اليود/كبريت)
25	3.2_5. من الكتلة الحيوية
25	3.2_5.1. تغويز الكتلة الحيوية
26	3.2_5.2. التركيب الضوئي الحيوي
26	3.2_6. من طاقة النووية
27	3.2_7. من الطريقة الحرارية

- 28 8\_3.2. من تحليل الماء
- 28 8\_3.2. 1. التحليل الكهربائي للماء
- 29 8\_3.2. 2. التحليل الكهربائي القلوي
- 30 8\_3.2. 3. تحليل الكهربائي للحمض ( غشاء تبادل البروتون ) (PEM)
- 31 8\_3.2. 4. تحليل الكهربائي بارتفاع درجة الحرارة (PET)
- 32 8\_3.2. 5. تحليل الضوئي للماء (PEC)
- 33 4.2. إنتاج الهيدروجين باستغلال مصادر الطاقات المتجددة
- 33 4.2. 1. من طاقة الرياح
- 33 4.2. 2. من الطاقة الشمسية
- 35 5.2. آفاق إنتاج الهيدروجين
- 36 6.2. ملخص

### الفصل الثالث : توزيع و تخزين الهيدروجين

- 38 1.3. المقدمة
- 38 2.3. تخزين الهيدروجين على شكل غاز
- 38 2.3. 1. ضغط الهيدروجين
- 39 3.3. تخزين الهيدروجين على شكل السائل
- 40 2.3. 1. تبريد هيدروجين السائل
- 40 2.3. 2. في السوائل العضوية
- 41 4.3. تخزين الهيدروجين على شكل صلب
- 41 4.3. 1. الامتصاص الكيميائي
- 42 4.3. 1. 1. الهيدريدات
- 42 4.3. 1. 1. 1. هيدريدات المعادن
- 44 4.3. 1. 2. 1. هيدريد معتمد على المغنيسيوم (Mg)
- 44 4.3. 1. 3. 1. هيدريدات معقدة
- 45 1.3. - الأليينات
- 45 2.3. - النيتريدات
- 46 3.3. - بروهيدريدات
- 46 4.3. 1. 4. 1. المركبات متعددة المعادن
- 47 4.3. 2. الامتصاص الفيزيائي

48	2_4.3.1. المواد الكربونية و الأنابيب
48	2_4.3.2. الكربون النشط
48	2_4.3.3. ألياف الكربون النانوية والفوليرين
49	2_4.3.4. أنابيب الكربون النانوية
51	2_4.3.5. النانوية العضوية والغير العضوية
51	5.3_ توزيع الهيدروجين
52	5.3_1. مقطورة الغاز
52	5.3_2. ناقلة السوائل
52	5.3_3. خط أنابيب
53	6.3_ وجهات النظر على التخزين و التوزيع للهيدروجين
54	7.3_ الملخص

## الفصل الرابع : تطبيقات و استخدامات الهيدروجين

57	1.4_ المقدمة
57	2.4_ تطبيقات الهيدروجين
58	3.4_ استعمالات الهيدروجين
58	3.4_1. محركات الهيدروجين الحرارية
59	3.4_2. التوربينات
59	3.4_3. خلايا الوقود
60	3.4_3.1. أنواع الخلايا الوقود
61	3.4_3.1.1. خلايا الوقود ذات الغشاء البوليميري PEMFC
61	3.4_3.1.2. خلايا الوقود القلوية AFC
62	3.4_3.1.3. خلايا الوقود ذات الحمض الفسفوري PAFC
62	3.4_3.1.4. خلايا الوقود ذات الكربونات المصهورة MCFC
63	3.4_3.1.5. خلايا الوقود ذات أكسيد الصلب SOFC
63	1.5_ التصميم الأنبوبي
64	2.5_ التصميم المستوي
64	3.4_2.3. مميزات خلايا الوقود
65	4.4_ تطبيقات خلايا الوقود
65	4.4_1. مجالات النقل

65	4.4_2 . مجالات الالكترونيات
66	4.4-3. في مجالات توليد الكهرباء
66	5.4 _ مشاكل تواجه الخلية الهيدروجينية
66	6.4 _ تعليمات الأمان للهيدروجين
67	7.4. الملخص
68	الخلاصة العامة
69	المراجع



# الفصل الأول:

**1.1\_ المقدمة :**

- لقد تزايد الاهتمام بمصادر الطاقات المتجددة , و التي قد باتت هذه الأخيرة من أهم مواضيع الساعة لاقتصاديات العالم الطاقوية بعد الأزمات التي صحبتها تغيرات في أسعار الطاقة الأحفورية ( البترول و الغاز ) الذي يعتبر الرائد الأول للطاقات المتجددة بالعالم على غرار التلوث الذي يسببه للبيئة من احتباس حراري ونضوب في طبقة الأوزون . إذ تعد الجزائر إحدى الدول التي تولت اهتماما بالغا للطاقات الخضراء لما تملكه من مصادر وقدرات طبيعية...
- رغم الدور الهام للطاقات المتجددة و الاهتمام الذي حظيت به إلا أنه ما تم تجسيده على أرض الواقع لازال بعيدا عن التطلعات و الأهداف المنشودة للتنمية الاقتصادية إضافة إلى ما تحظى به هذه الطاقات من مزايا استغلالها فقد وجدت معيقات لا يمكن تفاديها في الوقت الراهن.
- فما هي هذه الطاقة وما مصادرها ؟

**2.1\_ تعريف الطاقة : Définition De L'énergie**

- الطاقة هي كمية فيزيائية يتم التعبير عنها بوحدة الجول في النظام العالمي للوحدات ، و يعبر عن العمل المستخرج أو المطبق على المادة أي انه يمكن أن تتحول المادة إلى طاقة و بالعكس أيضا يمكن أن تتحول الطاقة إلى مادة ، و تأخذ الطاقة عدة أشكال مختلفة وتكون على شكل طاقة حرارية أو كيميائية أو كهربائية أو نووية أو ميكانيكية أو إشعاعية أو كامنة.[1]

**3.1\_ تصنيف الطاقة : Energie évaluée**

- وهنا يمكن تصنيف الطاقة و مصدرها على مدى إمكانية تجدد تلك الطاقة و استمراريتها إلى صنفين هما [2] :

**1\_3.1 / الطاقة التقليدية أو المستنفذة : Energie Conventionnelle ou Appauvrie**

- تشمل الفحم و البترول و المعادن و الغاز الطبيعي و المواد الكيميائية، و هي مستنفذة لأنها لا يمكن صنعها ثانية أو تعويضها مجددا في زمن قصير.

## 1.3\_2/ الطاقة المتجددة أو النظيفة أو البديلة : L'énergie Renouvelable

وتشمل طاقة الرياح و الهواء و الطاقة الشمسية و طاقة المياه أو الأمواج و الطاقة الجوفية في باطن الأرض و طاقة الكتلة الحيوية، وهي طاقات لا تنفذة و لا تزول.

## 1.4.1 مصادر الطاقة : Les sources D'énergie

إن أهم مصادر الطاقة المستخدمة حالياً، و تلك المتوقعة أن يكون لها شأن في توفير الطاقة للبشرية تكمن في:

### 1.4.1\_1 / الوقود الأحفوري : Combustibles Fossiles

يتشكل هذا الوقود الأحفوري عن طريق عمليات طبيعية كالتحلل اللاهوائي للكائنات الميتة ، و عادة ما يتم إنتاجه ملايين السنين و أحياناً يتجاوز 650 مليون سنة.

و تستخرج هذه المواد من باطن الأرض حيث تشترك هذه المصادر الطاقة الأحفورية في مكوناتها في أنها تتكون من مواد هيدروكربونية (مركبات من الكربون و الهيدروجين) إضافة إلى بعض الشوائب ، و يستخرج هذا الوقود الأحفوري من المواد الأحفورية كالفحم الحجري و البترول و الغاز الطبيعي [3].

### 1.4.1\_1 أ / الغاز الطبيعي : Gaz Naturel

الغاز الطبيعي هو مركب كربوني و هو أحد المصادر الطاقة البديلة عن النفط ، و يحتل المرتبة الثالثة من حيث الاستهلاك العالم من الطاقة و يعود تشكل هذا الغاز إلى بقايا المخلفات الميتة المتواجدة في طبقات الأرضية حيث تفككت هذه المواد العضوية إلى مكونات كيميائية و هذا مع عدم وجود الأكسجين، و بفعل الحرارة و الضغط تكونت هذه المركبات الهيدروكربونية و تستقر هذه المواد تحت طبقات الجيولوجية، و يتميز هذا الغاز بوفرته الكبيرة و سهولة استخراج و نقله إضافة إلى أن له كفاءة عالية و قليل التكلفة و نسبة تلوثه للبيئة قليلة و هذا راجع إلى أنه لا يحتوي على شوارد معدنية، يشكل الميثان الجزء الأكبر من تركيب هذا الغاز إضافة إلى أنواع غازات مختلفة و مركبات أخرى، و يؤثر اختلاف هذا التركيب إلى اختلاف في قيمة الطاقة في الأنواع المختلفة من الغاز [3].

**4.1\_1. ب / الفحم : Charbon**

يوجد هناك العديد من أنواع الفحم المختلفة منها (الفحم الحجري و الفحم البني و الفحم القطراني) ، حيث يعتبر الفحم الحجري من أكثر أنواع قيمة و ذلك لنقاوته و كثافته العالية، إضافة انه يتكون من عنصر الكربون بشكل أساسي، و ينتج هذا الفحم من بقايا النباتات مثلا في المستنقعات حيث يتم تحليلها عند تعرضها للضغط و حرارة خارجية، أما بالنسبة للفحم البني فيتواجد بنسبة 70% في الاتحاد السوفيتي و بالنسبة للفحم القطراني فينتج من مادة قطرانية عند تقطيرها لإنتاج الغاز حيث يحتوي هذا الفحم من مواد هيدروكربونية و التي تستعمل في إنتاج الغاز [3] .

**4.1\_1.1 / إيجابيات الوقود الأحفوري: Avantages Des Combustibles Fossiles**

- ✓ امتلاكه لكثافة الطاقة عالية.
- ✓ سهولة النقل.
- ✓ سهولة التخزين.
- ✓ بمعالجة الوقود الأحفوري بتروكيميايا، يمكن الحصول على أنواع مختلفة منه، خاصة الوقود الأحفوري السائلة و الغازية، حيث يتم استخراج منها و ذلك لاستعمالات المختلفة في محركات الطائرة و السيارات و ذلك بعد عملية بيتروكيميائية اللازمة. [4]

**4.1\_2. سلبيات الوقود الأحفوري: Négatives Des Combustibles fossiles**

- ✓ وقود غير متجدد.
- ✓ احتراق الوقود الأحفوري الذي يعد من العوامل الرئيسية لتلوث البيئة و التسبب في الاحتباس الحراري، مما يسبب في ارتفاع درجات الحرارة حول الأرض و يزيد في التصحر و الجفاف.
- ✓ التكلفة العالية لاستخراجه و نقله.

يمثل الشكل التالي التلوث الناتج عن احتراق الوقود الأحفوري. (4)



الشكل (1) : التلوث الناتج عن احتراق الوقود الأحفوري.

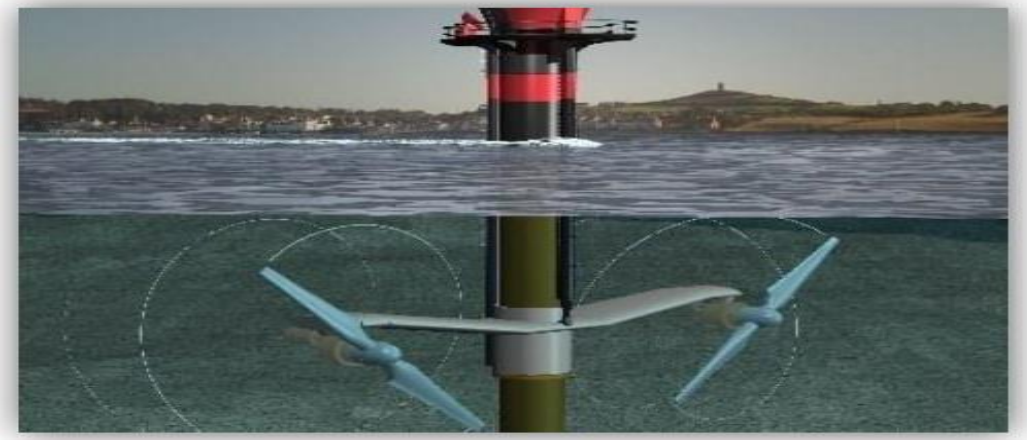
#### 4.1\_2/ طاقة المد و الجزر : Energy Marémotrice

المد و الجزر هي ظاهرة يومية تظهر في بحار العالم و محطاته و هي من مصادر طاقة الميكانيكية في الطبيعة حيث تنشأ هذه الظاهرة عن تجاذب بين الأرض و القمر و عليه تصنف هذه الطاقة من طاقات المتجددة ، حيث تستخدم هذه الطاقة في إنتاج الكهرباء و ذلك عن طريق بناء سدود حيث توضع وتوربينات لتوليد الكهرباء عند بوابة هذا السد. [5] انظر الشكل التالي



الشكل (2) : سد لتوليد الطاقة الكهربائية يعمل بطاقة المد و الجزر.

- و يمكن أيضا بناء أبراج تستغل في إنتاج الكهرباء و تعمل بطاقة المد و الجزر حيث تثبت مراوح في البرج و تكون هذه المراوح تحت سطح الماء [5]. كما نلاحظ الشكل التالي :



الشكل (3): برج لتوليد الطاقة الكهربائية يعمل بطاقة المد و الجزر و حركة الأمواج.

#### Avantage De Energie: 1\_2\_4.1 إيجابيات طاقة المد و الجزر: Marémotrice

- ✓ طاقة متجددة ومجانية.
- ✓ لا تحتاج لوقود.
- ✓ تنتج الكهرباء بكمية عالية.
- ✓ لا تنتج هذه الطاقة أي غازات ملوثة للبيئة. [6]

#### Négatives De Energie: 2\_2\_4.1 سلبيات طاقة المد و الجزر: Marémotrice

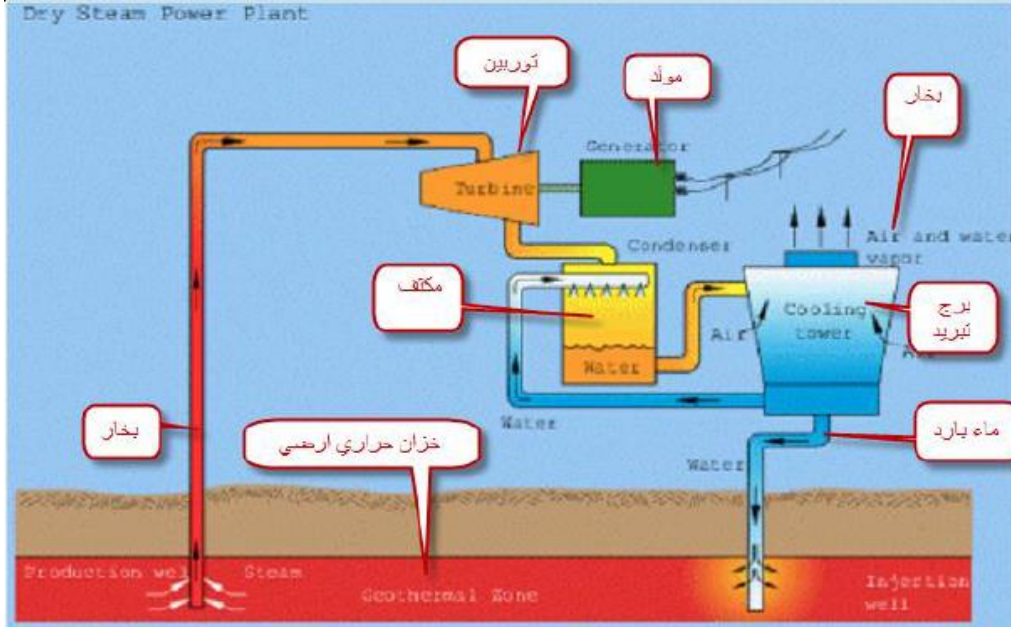
- ✓ تكلفة عالية.
- ✓ مصدر طاقة منقطع أي يمكن إنتاج كهرباء فقط خلال أمواج المد.
- ✓ يمكن أن يحدث خلل في هجرة الأسماك.
- ✓ مركز التوليد يرتبط بوجود البحار و المحيطات. [6]

#### 3\_4.1 / الطاقة الحرارية الجوفية : Energie Géothermique

هي مصدر طاقة بديل و نضيف و متجددة، و هي طاقة حرارية مرتفعة ذات منشأ طبيعي مختزنة في الصهارة في باطن الأرض، حيث يقدر أن أكثر من 99% من كتلة الكرة الأرضية عبارة عن صخور تتجاوز حرارتها 1000 درجة مئوية [7].

و ترتفع درجة الحرارة بزيادة تعمقنا في جوف الأرض بمعدل نحو 7 و 2 درجة مئوية لكل 100 متر في العمق، أي أنها تصل إلى معدل 27 درجة مئوية على عمق 1Km، و يستفاد من هذه الطاقة الحرارية بشكل أساسي في توليد الكهرباء، و يتطلب ذلك حفر أنابيب كثيرة إلى أعماق

سحيقة قد تصل إلى نحو 5Km ، و في بعض الأحضان تستخدم المياه الساخنة للتدفئة عندما تكون الحرارة قريبة من سطح الأرض.



الشكل(4): آلية توليد الكهرباء بالاعتماد على الحرارة الأرضية.

### 1\_3\_4.1 إيجابيات طاقة الحرارة الجوفية: Avantages Des Energie Géothermique

- ✓ طاقة متجددة.
- ✓ طاقة نظيفة.
- ✓ لا تنتج أي غازات مضرّة للبيئة.
- ✓ استخدام مباشر.
- ✓ تستخدم في إنتاج الكهرباء. [8]

### 2\_3\_4.1 سلبيات طاقة الحرارة الجوفية: Négatives Des Energie Géothermique

- ✓ يمكن إنشاء هذه المحطات الحرارية الجوفية فقط في المناطق التي تحتوي على صخور حارة.
- ✓ تعتبر هذه المحطات مكلفة جدا على رغم من أنها لا تعتمد على حرق الوقود الأحفوري.
- ✓ إمكانية انطلاق غازات الضارة من الحفر التي تم حفرها لاستخراج بخار الماء. [8]

## 4.1\_4/ طاقة الرياح : L'énergie éolienne

هي طاقة مستخرجة من الطاقة الحركية للرياح بواسطة استخدام عنفات الرياح لإنتاج الطاقة الكهربائية، وهي تعتبر من أنواع الطاقة الكهروميكانيكية ، و تعد طاقة الرياح أحد أنواع الطاقة البديلة التي انتشر استخدامها كبديل من بدائل الطاقة. [9] كما نلاحظ الشكل التالي :



الشكل (5) : استغلال طاقة الرياح في إنتاج الكهرباء باستخدام العنفات (مراوح).

### 1\_4\_4.1 / إيجابيات طاقة الرياح : Les Avantages De L'énergie éolienne

✓ طاقة متجددة.

✓ طاقة نظيفة لا ينتج عنها أي انبعاثات. [10]

### 2\_4\_4.1 / سلبيات طاقة الرياح : Les Negatives De L'énergie éolienne

✓ عدم توفر الرياح في أي مكان.

✓ تكلفة عالية في البناء.

✓ التوربين الهواء له صوت مزعج.

✓ طاقة أقل من المحطات العامة للوقود الأحفوري [10] .

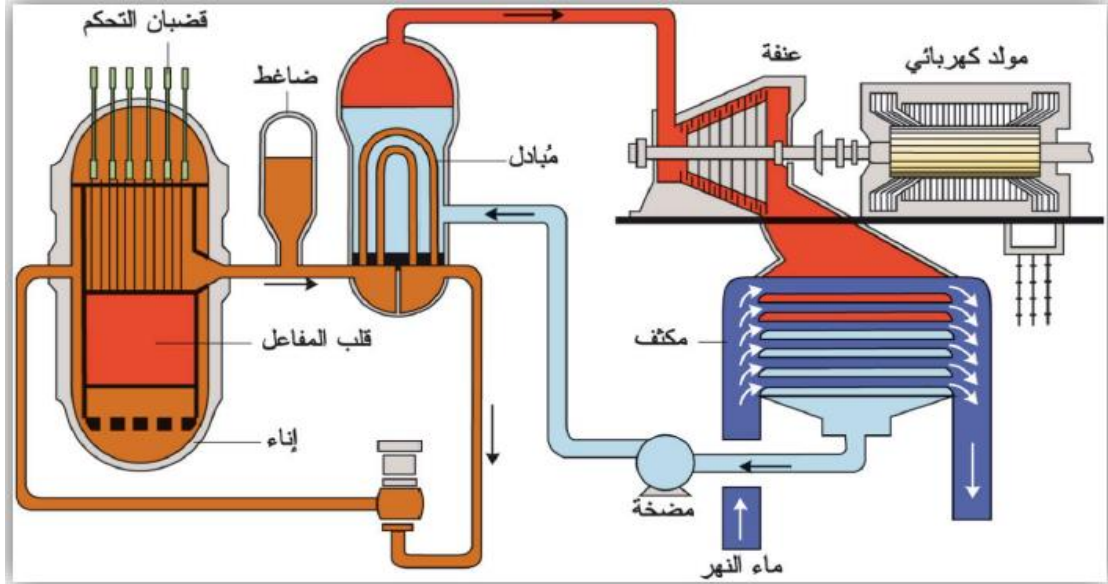
## 4.1\_5 / الطاقة النووية : Energie Nucléaire

الطاقة النووية هي الطاقة التي يتم توليدها من تفاعلات الاندماج أو الانشطار الأنوية الذرية، وتستغل هذه الطاقة في محطات توليد الكهرباء النووية، لتسخين الماء لإنتاج بخار الماء الذي يستخدم بعد ذلك لإنتاج الكهرباء [11] .



\_ و تعتبر محطات التوليد النووية نوعا من محطات التوليد الحراري البخاري،حيث تقوم بتوليد البخار بالحرارة التي تتولد في فرن المفاعل،الفرق في المحطات الطاقة النووية أنه بدل الفرن الذي يحترق فيه الوقود يوجد الفرن الذري الذي يحتاج إلى جدار عازل و واقى من الإشعاع الذري و هو يتكون من طبقة الآجر الناري و طبقة من المياه و طبقة من الحديد الصلب ثم طبقة من الإسمنت يصل سمكها مترين و ذلك من أجل حماية المحطة و البيئة المحيطة من التلوث بالإشعاع الذري.

و المفاعل النووي تتولد فيه الحرارة نتيجة ذرة اليورانيوم و ذلك بضربها بنيوترون،و تستغل هذه الطاقة الحرارية الهائلة في غليان الماء في المرجل و تحويلها إلى بخار ذات الضاغط عالي مع درجة حرارة عالية حوالي 480 درجة مئوية،ثم يسלט هذا البخار ذو ضغط العالي على زعانف التوربينات البخارية و بذلك تتحول الطاقة البخارية إلى طاقة ميكانيكية على محور هذا التوربين [12]. كما نلاحظ الشكل التالي



الشكل (6) : المفاعل النووي لتوليد الطاقة الكهربائية.

## 1\_5\_4.1 / إيجابيات طاقة النووية: Les avantages De L'énergie Nucléaire

- ✓ طاقة نظيفة.
- ✓ لا تعتمد على الوقود الأحفوري .
- ✓ لا ينتج أي انبعاثات مضره للبيئة.
- ✓ طاقة قوية و فعالة.
- ✓ يمكن الاعتماد عليها.

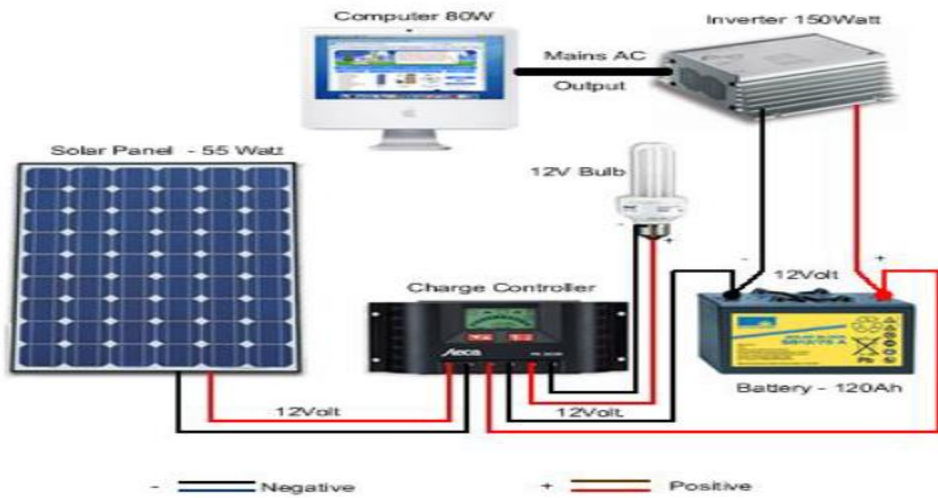
- ✓ طاقة رخيصة على مدا الطويل.
  - ✓ تكلفة قليلة للوقود أي يحتاج كمية من اليورانيوم لإنتاج الطاقة.
  - ✓ الكمية التي ينتجها 28g من اليورانيوم تساوي طاقة التي ينتجها 100000kg من الفحم
- [13] .

#### Les negatives De L'énergie : سلبيات طاقة النووية : /2\_5\_4.1 Nucléaire

- ✓ تكلفة أولية عالية جدا للبناء.
- ✓ النفايات المشعة.
- ✓ الإشعاعات النووية.
- ✓ توفير الوقود.
- ✓ غير متجدد.
- ✓ الكوارث نووية [13] .

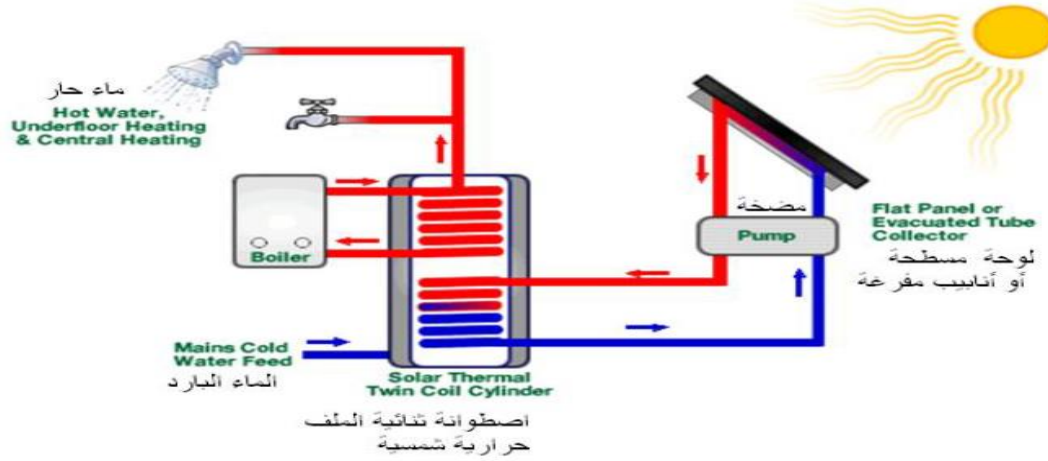
#### Energie Solaire : الطاقة الشمسية : /6\_4.1

الطاقة الشمسية هي من أحد الطاقات المتجددة و هي عبارة عن الإشعاعات و الحرارة الصادرة عن الشمس، اللتين قام الإنسان باستغلالهما لخدمة مصلحته،و ذلك من خلال استخدام مجموعة من الوسائل التكنولوجية المتطورة حيث يتم تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية و ذلك من خلال استخدام محولات فولتوضوئية أو محركات حرارية [14] .



الشكل ( 7 ) : توصيل خلية الشمسية لإنتاج الكهرباء.

✓ ويمكن أيضا استخدام الشمس في أنظمة التبريد و التسخين و هي من أبرز الأمثلة على استغلال الطاقة الشمسية، كما يتم تقطير و تطهير الماء الصالح للشرب باستخدام الطاقة الشمسية، كما يتم استغلالها في توليد درجات الحرارة مرتفعة لاستخدامها في أعمال صناعية، و من المهم معرفة أن الطاقة الشمسية آثار إيجابية و أخرى سلبية، و هذه الآثار تترتب على طريقة الاستخدام [14]. كما نلاحظ الشكل التالي :



الشكل ( 8 ) : المجمع الشمسي الحراري.

#### 1\_6\_4.1 / إيجابيات طاقة الشمسية : Avantages De L'énergie Solaire

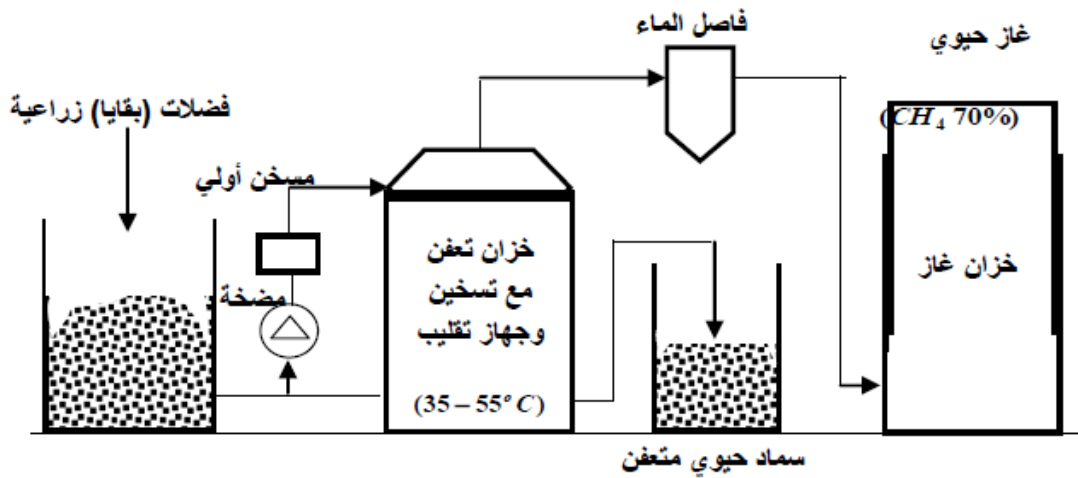
- ✓ طاقة جديدة و متجددة .
- ✓ طاقة نظيفة لا تنتج أي انبعاثات مضره للبيئة.
- ✓ طاقة رخيصة على مدا الطويل.
- ✓ سهولة التركيب.
- ✓ تحتاج إلى عناية بسيطة فقط [15] .

#### 2\_6\_4.1 / سلبيات طاقة الشمسية : Négatives De L'énergie Solaire

- ✓ تكلفتها عالية جدا.
- ✓ حسن اختيار موقع.
- ✓ كفاءتها قليلة.
- ✓ إمكانية عملها في نهار فقط و مع توفر أشعة الشمس [15] .

### 4.1\_7/ الوقود الحيوي : Biocarburants

هي الطاقة المستمدة من الكائنات الحية سواء النباتية أو الحيوانية منها و يمكن أيضا الحصول عليها من التحليل الصناعي للمزروعات و الفضلات النباتية و الحيوانية [16]، والبقايا التي يمكن إعادة استخدامها كالخشب و السماد و تحليل النفايات المصانع و مخلفات الأغذية التي يمكن تحويلها إلى غاز حيوي عن طريق المكروبات ذات الهضم اللاهوائي، كما يمكن أيضا تحويل الكتلة الحيوية إلى طاقة و ذلك عن طريق التخمر الهوائي حيث أن هذه الطريقة تحتاج إلى تجديد المواد العضوية باستمرار إضافة إلى التدفئة الخارجية. [17] كما نلاحظ الشكل التالي :



الشكل ( 9 ) : إنتاج الوقود الحيوي من بقايا زراعية.

### 4.1\_7\_1/ إيجابيات الوقود الحيوي : Avantages Des Biocarburants

- ✓ طاقة متجددة.
- ✓ متعدد المصادر [18].

### 4.1\_7\_2/ سلبيات الوقود الحيوي : Négatives Des Biocarburants

- ✓ تكلفة عالية الإنتاج.
- ✓ استخدام الأسمدة حيث يمكن أن يكون لها آثار ضارة على البيئة المحيطة.
- ✓ نقص في الغذاء.
- ✓ استهلاك المياه [18]

### 5.1. الملخص :

قمننا في هذا الفصل بتقديم تعريف عام للطاقة مع ذكر تصنيفها , إضافة إلى تقييم مصادرها المختلفة و المتعددة مع ذكر إيجابيات و سلبيات كل طاقة على حدى.

## الفصل الثاني:

**2.1. المقدمة:**

في الوقت الذي تتحصر فيه شمس الوقود الأحفوري يشهد العالم ولادة مصادر أخرى للطاقة البديلة ، و التي ستكون بقدرتها على إعادة هيكلة الحضارة الإنسانية و التي ستحدث أيضا تغييرا جذريا في طبيعة الأسواق المالية و الظروف السياسية و الاجتماعية و هي حضارة الهيدروجين و على ذلك فإننا على أعتاب انقلاب اقتصادي قوامه الهيدروجين .

تعتبر الأبحاث الحالية في مجال الطاقة هو محاولة إحلال مصادر الطاقة الاحفورية الغير متجددة بمصادر أخرى للطاقة المتجددة، و تكون متوفرة بشكل كبير و غير مكلفة و أقل تلوث للبيئة، و قد اهتم الباحثون باستخدام الهيدروجين باعتباره هو العنصر الأكثر تواجد حيث يشكل 75% من حجم الكون حيث أن الهيدروجين لا يتواجد في الطبيعة حرا بل يوجد على شكل مركبات متحدة مع معادن و عناصر أخرى و قد يزيد عددها عن 92 عنصر، حيث أن أكثر المركبات شيوعا تحتوي على الهيدروجين هو الماء ( $H_2O$ )، كما توجد مصادر أخرى تتضمن معظم أشكال المواد العضوية ، و هذا الوقود الذي لا ينتج عنه أي انبعاثات ملوثة، كما أنه يمتلك أعلى قيمة حرارية في وحدة الكتلة من بين جميع الحوامل الطاقة المتوفرة على وجه الأرض.

**2.2. نظام الهيدروجين : Hydrogen Systems**

الهيدروجين هو عنصر كيميائي رمزه  $H_2$  و هو غاز عديم اللون و الرائحة و غير سام و هو أخف من العناصر الموجودة في الطبيعة وكتلته الحجمية  $\rho = 0.09g / l$  فهو أخف من الهواء بحوالي 14 مرة، وله قدرة كبيرة على الانتشار في الجو و وزنه الذري 1.0079 و له نظائر هما الديتريوم و التيتريوم، و مع ذلك، فهو يتواجد في تركيبة مع العناصر الأخرى. الهيدروجين ليس مصدرا رئيسي للطاقة. و مع ذلك يصبح حاملا جذابا و مهما للطاقة عندما ينفصل عن العناصر الأخرى باستخدام مصدرا للطاقة. و من المفترض أن يكون الهيدروجين الوقود النظيف للطاقة مستقبلا و خاصة لأغراض التخزين ونقل الطاقة [19]. السعة التخزينية لطاقة الهيدروجين ممتازة لأن الحسابات تبين أن كل كيلوغرام من الهيدروجين يحتوي تقريبا على 33KWh من الطاقة [19]. إن المزايا الرئيسية لاستخدام الهيدروجين للتزويد بالطاقة تتضمن :

مصدر طاقة آمن لتخفيض واردات النفط، فمن الممكن استخدام الموارد المحلية لإنتاج الهيدروجين، مما يؤدي إلى استقلالية في مجال الطاقة. الاستدامة من خلال الاستفادة من مصادر الطاقة المتجددة، حيث يمكن إنتاج الهيدروجين من مصادر الطاقة المتجددة. أقل تلوثاً من خلال إنتاج صفري للكربون تقريباً، حيث يمكن للهيدروجين أن يحل محل الوقود الأحفوري لتوفير الطاقة الكهربائية ووقود النقل. الجدوى الاقتصادية للهيدروجين التي يتحمل أن يشكل أسواق للطاقة العالمية في المستقبل. يمكن تخزين و توزيع الهيدروجين بعدة طرق.

لذلك الهيدروجين هو الناقل للطاقة النظيفة المقبول في جميع أنحاء العالم كما هو مصدر مستقل و يحتوي على نسبة عالية من الطاقة في الكتلة مقارنة مع أنواع الوقود الأخرى كما هو موضح في الجدول التالي مقارنة بين الهيدروجين و أنواع المختلفة من الوقود كمصدر للطاقة [20]:

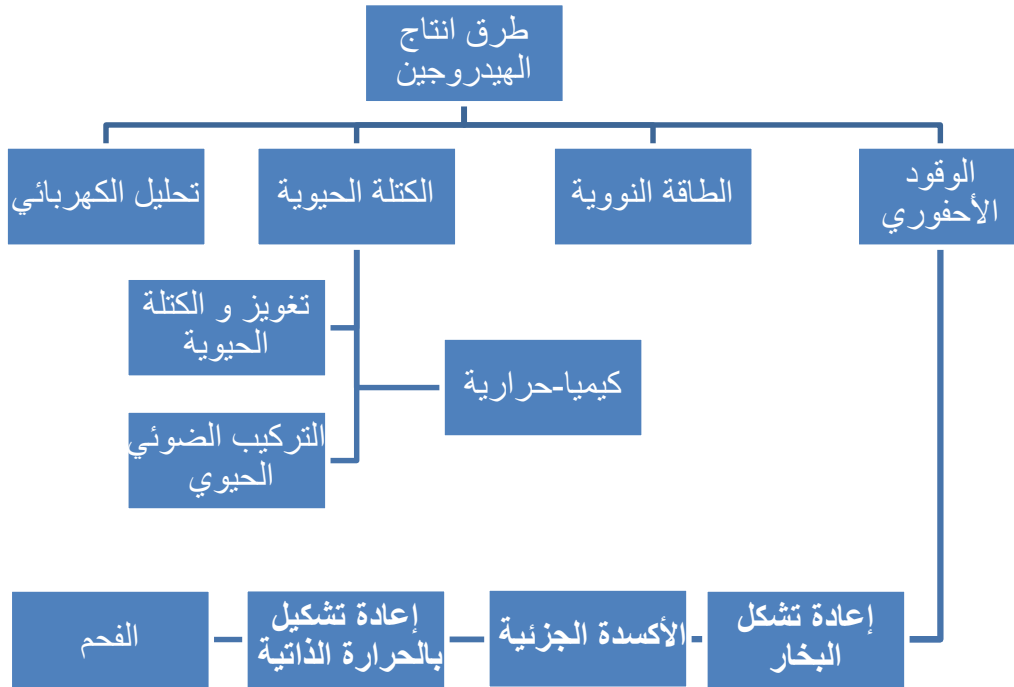
المحتوى الطاقى (MJ/Kg)	الوقود
120	الهيدروجين
54.4	الغاز الطبيعي المسال
27	فحم
46.4	بنزين السيارات
45.6	مازوت السيارات
29.6	ايثانول
19.7	الميثانول

الجدول (1)-مقارنة بين الهيدروجين و أنواع المختلفة من الوقود كمصدر للطاقة.

### 3.2. إنتاج الهيدروجين: Production D'hydrogène



يمكن إنتاج الهيدروجين من مجموعة متنوعة من المصادر، كما هو مبين في الشكل (10) الذي يظهر عدة مسارات متنوعة لإنتاج الهيدروجين، حيث يمكن إنتاجه من مواد غنية بيه، مثل الفحم والغاز الطبيعي و الكتلة الحيوية و الماء، و يسלט الضوء على الطرق المدعومة توليد الطاقة الكهربائية، أهميه هذه المسارات في إنتاج الوقود هي أنها يمكن أن تنتج محليا دون الاعتماد على مصادر خارجية.



الشكل 10- مخطط مصادر الطاقة الرئيسية لإنتاج الهيدروجين.

### 1.3.2 إنتاج الهيدروجين من الطاقة الأحفورية Production d'hydrogène à partir des énergies fossiles :

يعد الوقود الأحفوري المصدر الرئيسي لإنتاج الهيدروجين في الصناعة، حيث يمكن تطبيق عدة طرق على المركبات الهيدروكربونية المختلفة لإنتاج الهيدروجين مثل الغاز الطبيعي و الميثان و الفحم و غيرها من مركبات أخرى [21] .

### 2.3.2. من الغاز الطبيعي: Des Gaz Naturel

يحتوي الغاز الطبيعي أساسا على الميثان، حيث أن 50٪ من إنتاج العالمي للهيدروجين اليوم من الغاز الطبيعي، و توجد هناك عدة طرق لإنتاجه من الغاز الطبيعي وهي [22] :

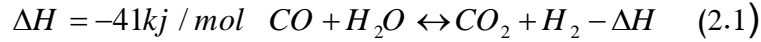
#### 3.2. 2\_1 / طريقة إعادة تشكل البخار: Le Vaporeformage

تعتمد هذه الطريقة على إنتاج أكبر قدر من الهيدروجين المتواجد في الغاز الطبيعي حيث تقوم بتفاعل غاز الميثان مع بخار الماء إضافة إلى محفز النيكل و يكون هذا التفاعل في درجة حرارة عالية، حيث أن هذه الطريقة تعد من أكثر الطرق استخداما لإنتاج الهيدروجين في الوقت الحالي . [23]

إذا أخذنا حالة الميثان حيث :



كما يتفاعل أول أكسيد الكربون المنتج في التفاعل الأول مع الماء وفقا للمعادلة التالي:



ملخص ردود التفاعلين التاليين:



يعتبر هذا التفاعل ماص للحرارة حيث أن المحفزات المستخدمة في التفاعل تتركز على الدعم الحراري و يمكن أيضا تنشيط هذه المحفزات المستخدمة بإضافة عناصر أخرى مثل اليورانيوم و البوتاسيوم، و ينتج من هذا التفاعل غاز غنيا بـ  $CO$  و  $H_2$  و قليل من  $CO_2$  حيث أن هذا الغاز مضر بالنسبة للطبيعة لذا يجب التخلص منه عن طريق تفاعل آخر مما يسمح لاسترجاع الهيدروجين مرة أخرى و يتطابق هذا مع التفاعل (2) أي تحويل أول أكسيد الكربون إلى ثاني أكسيد الكربون وهذه التفاعلات التي أجريت على التوالي تعبر عن ارتفاع و انخفاض في درجة الحرارة التي تتراوح ما بين 200 و 400 درجة مئوية. [24]

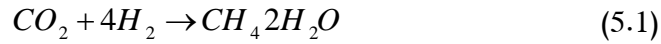
ينتج من هذا التفاعل غاز أساسيا يتكون من  $CO_2$  و  $H_2$  و قليل من  $CO$  و يتم فصل  $CO_2$  و الهيدروجين مع إزالة الشوائب و هذا ما يسمى بالتقية الهيدروجين، و توجد هناك

طريقتان صناعيتان لتتقية الهيدروجين هما تشكل الميثان و الامتزاز الانتقائي و ذلك عبر عملية الامتزاز بالضغط سوينغ.

في عملية تشكل الميثان توجد هناك طريقتين متميزتين و متتابعين هما :

إزالة الكربون : وهو إزالة  $CO_2$  بواسطة الأمينات أو الكربونات .

إنتاج الميثان : يكون من  $CO$  المتبقي من عائدات  $CO_2$ . [24]



و بهذه الطريقة تكون قد حصلنا على نقاوة كبيرة للهيدروجين أي ما يقارب 97% و منه يتم انخفاض كفاءة الهيدروجين لأن جزء كبير منه يستخدم لهذا الميثان. [25]

أما طريقة ضغط سوينغ الامتزاز لا تشمل مرحلة إزالة الكبريت و بعبارة أخرى فان تتقية الهيدروجين بهذه الطريقة تكون بتتقيتها من الشوائب و ذلك بواسطة المناخل الجزئية و هي الخاصة بالغازات التي تحتوي على 65% إلى 70% من الهيدروجين بعد تحويلها إلى  $CO$ ، وقد تكون طريقة إعادة تشكل البخار مناسبة بالنسبة للمواد الأولية الهيدروكربونية الثقيلة و مع ذلك فان الهيدروجين المنتج يحتوي على  $CO$  و  $CO_2$  لذا لبدا من عملية التنقية للحصول على هيدروجين نقي 99% و من الممكن الحصول على هيدروجين أكثر نقاوة عند استعمال طريقة الامتزاز بالضغط سوينغ و لكن بكمية قليلة في إنتاج  $CH_4$  حيث نلاحظ الجدول التالي المقارنة بين طريقة تشكل الميثان و الامتزاز بالضغط سوينغ. [25] [24]

الخطوات Etapas	تشكل الميثان formes de méthane	الامتصاص بالضغط سوينغ adsorption par pression
إنتاج و تركيب الغاز	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$

تحويل بخطوة واحدة $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ CO المتبقية من 1% إلى 3%	تحويل إلى خطوتين $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ CO المتبقية من 0.3% إلى 0.8%	تحويل CO إلى H <sub>2</sub> و CO <sub>2</sub>
	الأمينات الكربونات الساخنة CO المتبقية 0.005% إلى 0.1%	إزالة CO <sub>2</sub>
الامتزاز الانتقائي	تشكل الميثان من بقايا CO و CO <sub>2</sub> $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	تنقية H <sub>2</sub>
99.9% 85% إلى 90%	95% إلى 98% 98%	ملاحظات : نقاء H <sub>2</sub> معدل انتعاش H <sub>2</sub>

جدول (2) يمثل المقارنة بين طريقة تشكل الميثان و الامتزاز بالضغط سوينغ (8)

### 2.2.3.2. طريقة الأكسدة الجزئية: Méthode d'oxydation partielle

تتم عملية الأكسدة الجزئية بين الأوكسجين و الهيدروكربونات إلى هيدروجين بالإضافة إلى أكاسيد الكربونات و تتم هاته الأكسدة الجزئية الهيدروكربونات في درجة حرارة عالية حوالي من 1200 إلى 1500 درجة مئوية و إضافة إلى ضغط عالي حوالي من 20 إلى 90 بار كما هو الحال في طريقة إعادة تشكل البخار لإنتاج غاز الهيدروجين و من ناحية أخرى فان التفاعل ناشر للحرارة. [24]

و يحدث هذا التفاعل مع وجود أو عدم وجود أي محفز اعتماد على المواد الأولية حيث أنها تتكون من طرق رئيسية :

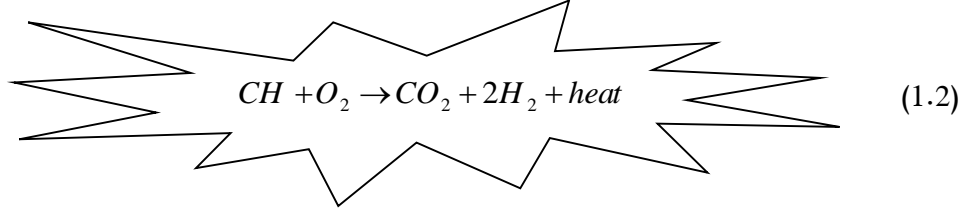
وحدة إنتاج الأوكسجين.

الأكسدة الجزئية.

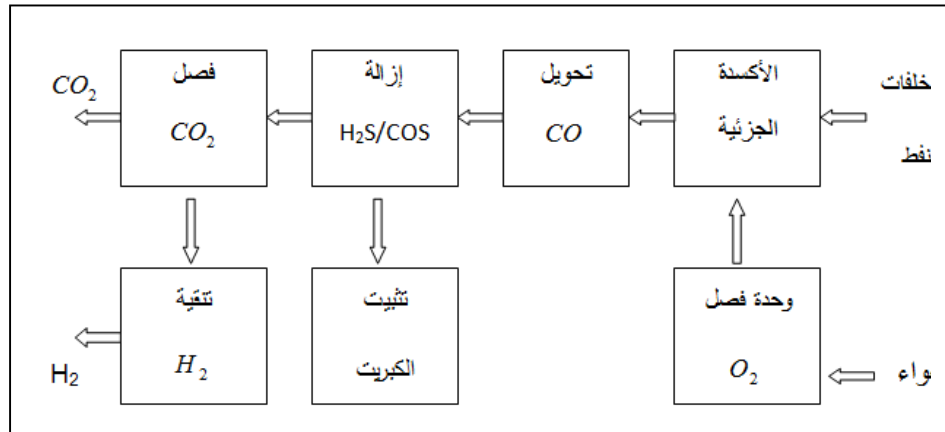
تحويل CO .

إزالة الكبريت بعد تحويل CO<sub>2</sub>.

تنقية الغازات المنتجة المؤدية إلى إنتاج الهيدروجين. (25)



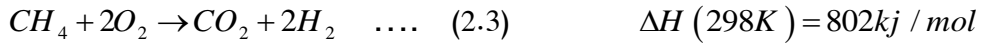
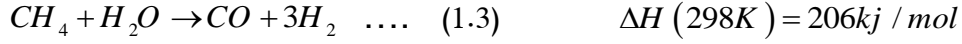
- حيث انه من الممكن تطبيق هذه الطريقة على المنتجات الثقيلة بين الغاز الفحم و حتى المخلفات الثقيلة و يعتبر الهيدروجين المنتج في الأكسدة الجزئية عادة ما يتضمن غاز مميح و لزيادة كمية الهيدروجين المنتجة يجب أكسدة CO إلى CO<sub>2</sub> و ذلك عن طريق إعادة تبخير حيث أن الهيدروجين المنتج اليوم هو مصنوع من الغاز الطبيعي و هو غير قابل للاستدامة على طول المدى لأنه يستعمل أساسا في التجارة العالمية ، وعلى الرغم من أن طريقة إعادة تبخير الغاز الطبيعي ناضجة نسبيا بالمقارنة مع غيرها من التكنولوجيات إنتاج الهيدروجين [27].



الشكل (11): يمثل الرسم التخطيطي للأكسدة الجزئية. [26]

### 3.2. 2. إعادة تشكيل بالحرارة الذاتية : Le Reformage Auto thermique

تعتبر هذه الطريقة مزيج بين الطريقة إعادة تشكل البخار و الأكسدة الجزئية حيث نلاحظ هذه التفاعلات :



يتم خلط غاز الطبيعي مع الأوكسجين وبخار الماء و ذلك قبل التسخين و إضافة أي المحفز و يتم هذا التفاعل تحت ضغط من 20 إلى 60 بار و درجة حرارة تتراوح ما بين 900 إلى 1000 درجة مئوية و ذلك لإنتاج غاز صناعي ، و منه يتكون الغاز المتحصل عليه من : 68% من  $H_2$  ، 20% من  $CO$  ، 10% من  $CO_2$  ، بالإضافة إلي كمية كبيرة من  $CH_4$  و  $N_2$  أما بالنسبة لعمليات التنقية فهي نفسها كما التي سبق وصفها سابقا . [23]

### 3.2. 3 / من الفحم : De Charbon

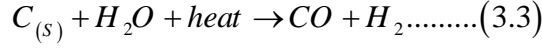
#### 3.2. 3. 1 / التغويزات : La gazéification

التغويز هو عملية حرارية تقوم بتحويل الكتلة الحيوية أو الفحم إلى خليط من الغازات ( أول أوكسيد و ثاني أوكسيد الكربون إضافة إلى الهيدروجين ) و مركبات أخرى و هذا من خلال تطبيق الضغط و الحرارة بالإضافة لبخار الماء ، حيث يمكن لفلزات أو الأغشية الخاصة بفصل الهيدروجين عن هذا الغاز ، و يمكن توليد الهيدروجين إضافي و ذلك عن طريق تفاعل  $CO$  مع بخار الماء لتشكل الهيدروجين و ثاني أوكسيد الكربون . [28]

#### 3.2. 3. 2 / من الفحم : De Charbon

هو مورد محلي متوفر و غير مكلف نسبيا من المهم أن نلاحظ انه يمكن إنتاج الهيدروجين من الفحم مباشرة و ذلك عن طريق تغويز الغازات بدلا من استخدام الكهرباء المولدة بالفحم لإنتاج

الهيدروجين مما يتطلب هذه العملية إلى تدفق في درجة حرارة عالية حيث انه يتم تحويل الفحم (الكربون) إلى غاز أول أكسيد الكربون و الهيدروجين . [29]



\_ و بما إن هذا التفاعل هو ماص للحرارة ، فإنه يجب إضافة الحرارة كما هو الحال في عملية إعادة تبخير الميثان و تحول CO إلى CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub> و ذلك من خلال تفاعل الكيمائي بين بخار الماء و أول أكسيد الكربون كما لحضنا سابقا ، حيث ا ناول أكسيد الكربون الذي يتم إنتاجه كمنتج ثاني من الفحم و يجب أن يتم التقاطه و تخزينه من اجل أن تكون الانبعاثات الغازية شبه معدومة . [29]

\_ و بعد إنتاج الهيدروجين من الفحم ويصبح ناضجا نجده أكثر تعقيدا مقارنة من إنتاجه من الغاز الطبيعي، لكن تكلفة الهيدروجين الناتجة أعلى لذا انه يجب استخدامه كمصدر للطاقة لوفرتة الكثيرة في العالم. [29]

### 3.2 . 3\_2\_1 / التقاط و تخزين CO<sub>2</sub> : Capturer Et Stocker Du Co<sub>2</sub>

إن إنتاج الهيدروجين من الوقود الاحفورية ينتج عنها حتما غاز ثاني أكسيد الكربون حيث يختلف هذه الكمية من المواد الأولية ، و لضمان استدامة إنتاج الهيدروجين مع انعدام أي انبعاثات ناتجة لذا يجب التقاط و تخزين CO<sub>2</sub> و لتخزينه توجد هناك ثلاث طرق مختلفة لالتقاط هذا الغاز : [30]

✓ أخر الاحتراق : يمكن إزالة ثاني أكسيد الكربون عند عملية الاحتراق و ذلك بفضل التوربينات الغازية التقليدية حيث يضمن هذا الغاز كمية كبيرة من النيتروجين و وأكسيدات النيتروجين بالإضافة إلى بخار الماء و ثاني أكسيد ثاني أكسيد الكربون .

✓ قبل الاحتراق : عند إنتاج الهيدروجين يتم التقاط ثاني أكسيد الكربون من خلال أي طريقة من الطرق المذكورة سابقا.

✓ احتراق الوقود : يتم تحويل الوقود الاحفورية إلى حرارة في عملية الاحتراق و ذلك باستعمال التوربينات البخارية التقليدية مع الأوكسجين النقي كمؤكسد و يمكن فصل CO<sub>2</sub> بسهولة عن طريق تكثيف بخار الماء، و منه يمكن تخزين ثاني أكسيد الكربون في طبقات المياه الجوفية و كذلك في المكونات الجيولوجية مثل النفط و الغاز و لكن لثبات استدامة تخزين

$CO_2$  أمران حاسمان لضمان إزالة الكربون و لنقله في خط أنابيب يعتمد على حد كبير في اختيار موقع تخزينه. [31]

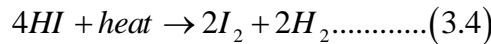
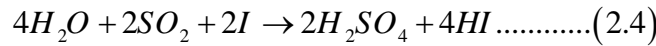
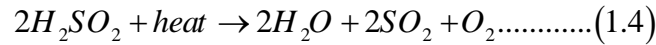
### 3.2. 4/ من الدورات الكيما-حرارية: Des Cours De Chimie Thermique

تقوم هذه الطريقة على إنتاج الهيدروجين بواسطة تفاعل الماء مع بعض المواد الكيميائية، و بعد سلسلة من هذه التفاعلات يتحول الماء إلى أكسجين و هيدروجين وتعود المركبات الكيميائية إلى حالتها الأصلية ، و هناك عديد من المركبات الكيميائية التي يمكن استخدامها في سلسلة التفاعلات لإنتاج الهيدروجين . [31]

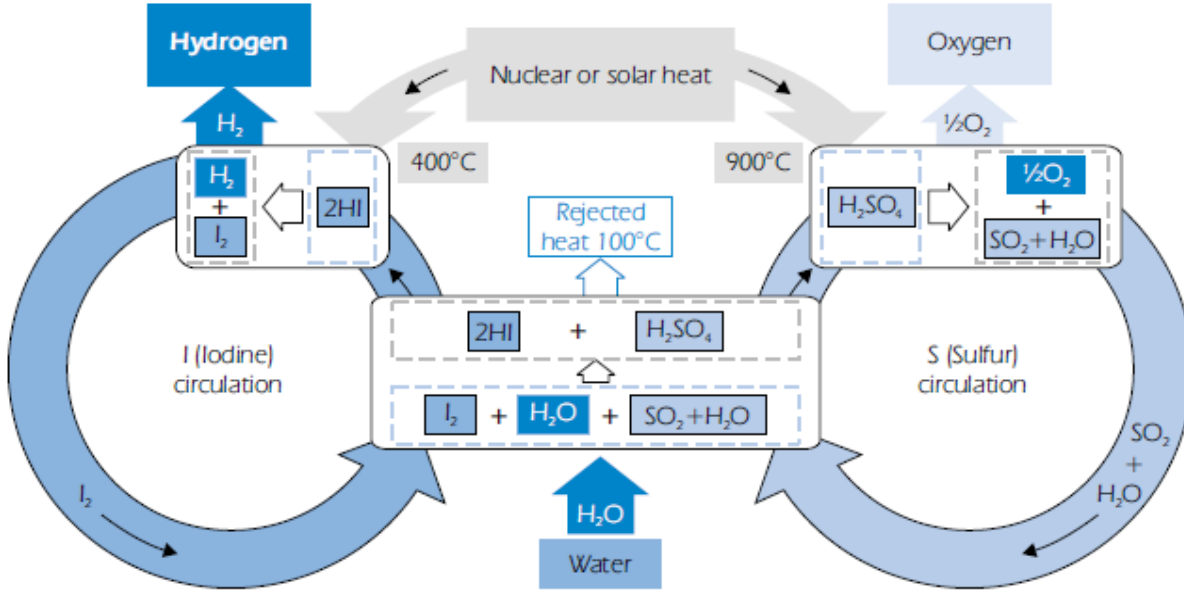
\_ تستخدم هذه الدورات الحرارية بما في ذلك الغاز الطبيعي و الفحم بالإضافة إلى الكتلة الحيوية لإنتاج الهيدروجين ، فبعض العمليات الحرارية تستخدم الحرارة جنباً إلى جنب مع دورات كيميائية مغلقة لإنتاج الهيدروجين من الموارد الأولية مثل دورات (اليود/الكبريت) و (كلور/الحديد)، و لكن من رغم إنتاج الهيدروجين من هذه التفاعلات إلا أن سلسلة التفاعلات لم تنتهي لذا لبدا من إكمال سلسلة التفاعلات. [32]

### 3.2 . 1\_4 / دورت (اليود/كبريت): Cycle De L'iode

يعتبر الكبريت في دورة اليود من الدورات الكيميائية الحرارية (حمض الكبريت) عندما نسخنه في درجة حرارة عالية حوالي 850 درجة مئوية فإنه يتحلل إلى ماء وأكسجين وثاني أكسيد الكبريت ، و منه يتم إزالة الأوكسجين و ثاني أكسيد الكبريت أما بالنسبة إلى الماء فيتم تبريده، و نفاعل ثاني أكسيد الكبريت مع ماء اليود لينتج حمض الكبريتيك و يود الهيدروجين ثم نقوم بفصل حمض الكبريتيك و إزالته و نقوم بتسخين يود الهيدروجين المتبقي في درجة حرارة حوالي 300 درجة مئوية ليتم فصل و كسر الروابط بين الهيدروجين و اليود ، و النتيجة هو الحصول على الأوكسجين و الهيدروجين من الماء و يتم تكرار هذه العملية بإعادة تدوير حمض الكبريتيك و اليود المستخدم [33].







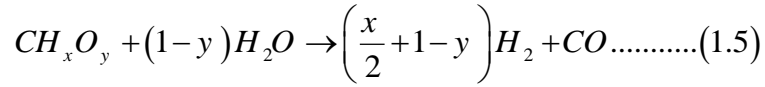
الشكل (12) : مخطط يمثل دورت (اليود/الكبريت). [33]

### 3.2 . 5 من الكتلة الحيوية: De La Biomasse

يمكن أن يكون مصدر لإنتاج الهيدروجين لأن عند تحويله إلى هيدروجين ينتج عنه انبعاثات من  $CO_2$  و يمكن إنتاجه بعدة طرق مثل التغويز لإنتاج  $H_2$  و  $CO_2$  و بعد تنقيته يعطي هيدروجين ، واليوم أكثر من 50 محطة في العالم تعمل بتغويز الكتلة الحيوية حتى لو لم تكن مخصصة لإنتاج الهيدروجين بواسطة التحليل الضوئي الكلي و استخدام بعض الطحالب الدقيقة أو بعض البكتيريا الزرقاء عن طريق تحليل المركبات العضوية من البكتيريا المنتجة مرة وحدة حيث يتم استخدام الهيدروجين أو نقله عبر شبكة الأنابيب حيث يدعو العلماء و المطورين لبذل جهدا في هي هذا المجال. [34]

### 3.2 . 5\_1 / تغويز الكتلة الحيوية : Gazéification Du Biogaz

و تتمثل حاليا طريقة التغويز الكتلة الحيوية للإنتاج العالمي للهيدروجين و يقدر إنتاجه حوالي  $430.10^6 Nm^3$  سنويا حيث أن طاقة المكافئة للتغويز تستعمل الفحم كمادة خام لها، حيث تعتمد طريقة التغويز على خلط كمية من الفحم إما على شكل طين أو في حالة صلابة مع أكسدة الهواء أو الأكسجين النقي و بخار الماء و ذلك في درجة حرارة من  $1000C^\circ$  إلى  $1500C^\circ$  فيتم تفاعل المركبات الهيدروكربونية الناتجة مع الماء وفقا للمعادلة التالية:



و بذلك يمكن تحقيق الكفاءة المطلوبة و ذلك بالحصول على طاقة الصافية و التي تقدر بحوالي 40% إلى 50%. [35]

### 3.2 . 5\_2 / التركيب الضوئي الحيوي: Biosynthèse

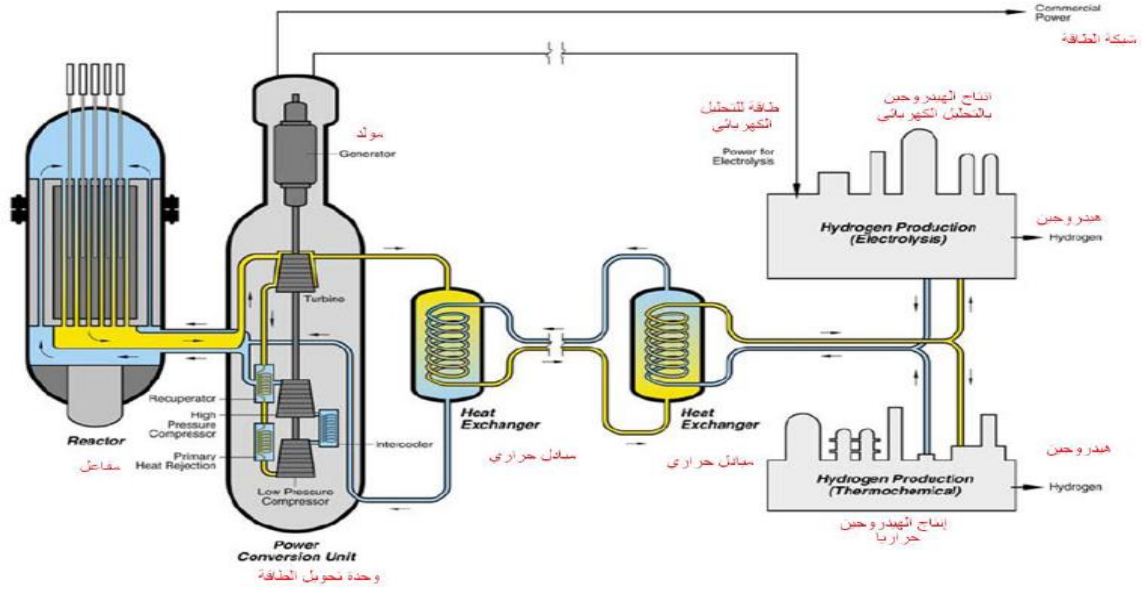
تعتمد هذه الطريقة لإنتاج الهيدروجين على مرحلتين و هما :

التركيب الضوئي و المحفز الهيدروجيني مثل بعض الطحالب الدقيقة و البكتيريا الزرقاء و إذا كانت ناجحة فإنها تترتب على إنتاج الهيدروجين المتجدد و الأهم هو فهم الطريقة الطبيعية للأنظمة الوراثية لإنتاج الهيدروجين و يمكن استعانة بعلم الوراثة لإثبات هذه الطريقة و هناك خيار آخر و هو تكرار الخطوتين باستخدام التركيب الضوئي. [36] [37]



### 3.2 . 6 / من طاقة النووية : De L'énergie Nucléaire

تتميز هذه الطاقة باستهلاك القليل من الكهرباء مما يتطلب زيادة في تدفقات الحرارة حيث قام الباحثون في السنوات الأخيرة بدراسة ما يسمى بالتفاعل النووي أي انه يمكن إنتاج الهيدروجين بدون إنتاج أي انبعاثات تؤثر على الاحتباس الحراري ، و إنتاج الهيدروجين بتحليل الكهربائي مرهون بسوء الأداء و لكن يمكن أن يكون حلا لا بد من تطبيقه مع تفكير في حلول أخرى أكثر أهمية للمدى الطويل مثل التحليل الكهربائي للماء و لكن ليس بالطريقة التقليدية ، و يتطلب هذا التفاعل حرارة حوالي 850 درجة مئوية إضافة إلى الكهرباء و عادة ما يكون احتياطيها محدودة ، لذا لبد من دراسة الطاقة النووية من حيث التكلفة و مع ذلك يجب تطوير تكنولوجيا النووية في المستقبل. [38] وكما يوضح الشكل التالي :

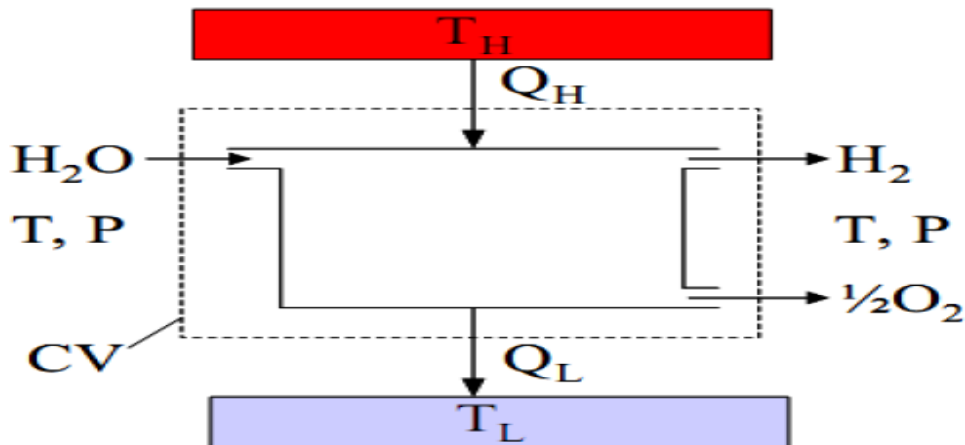


الشكل 13- يوضح طريقة العمل بالطاقة النووية.

### 7.3.2 / بالطريقة الحرارية: De Manière Thermique

تستخدم هذه الطريقة لإنتاج الهيدروجين وذلك بالتفكيك الحراري للماء و يتم ذلك بأسلوبين :

- نعرض الماء إلى الحرارة عالية تفوق 2500 درجة مئوية فينفك الماء إلى أكسجين و هيدروجين و لضمان إنتاج نسبة معتبرة من الهيدروجين يتطلب حرارة عالية إضافة إلى توفير المواد القابلة لتحمل هذه الحرارة، و هذه العملية غير مرغوب فيها على الغالب و أمرها مكلف و ليس بالسهل، كما يوضح الشكل التالي مايلي :



الشكل 14 - رسم يوضح طريقة الحرارة للماء.

- نقوم بتسخين الماء في حرارة حوالي 5000 درجة مئوية و ذلك باستخدام عملية قوس البلازما فيفتكك الماء إلى النواتج :  $H, H_2, O, O_2, OH, H_2O$  و تقدر نسبة إنتاج الهيدروجين من المزيج بحوالي 50% من حجمه، و تعتبر هذه العملية مكلفة جدا بمقارنة بالطرق الأخرى لإنتاج الهيدروجين. [38]

### 3.2. 8 / من تحليل الماء : D'analyse De L'eau

#### 3.2. 8\_1 / التحليل الكهربائي للماء : Electrolyse De L'eau

التحليل الكهربائي للماء هي عملية التي يتم فيها فصل الماء إلى عنصرين هما الأوكسجين و الهيدروجين و هذا باستخدام الكهرباء ، حيث أن الطاقة الكلية اللازمة لتحليل الكهربائي للماء تزداد قليل مع درجة الحرارة مما يؤدي إلى انخفاض في الطاقة الكهربائية المطلوبة ، و هي عبارة عن وحدة تسمى جهاز تحليل كهربائي حيث هي عبارة عن خلية كهربائية تتكون من قطبين مختلفين (الأنود و الكاثود) المتصلة بالوسط ، حيث أن الماء الذي يتم تحليله يجب أن يكون نقياً بأكبر قدر ممكن لأن الشوائب تبقى في الجهاز و تتراكم على مدى التحليل الكهربائي. [39]

- بالنسبة للمصعد : هو الذي يحدث فيه الأكسدة و يسمى أيضا قطب الأنود.
  - بالنسبة للمهبط : هو الذي يحدث فيه عملية الاختزال و يسمى أيضا قطب الكاثود.
- و تعتبر أقطاب هذه الخلية الكهربائية غالبا ما تكون خاملة حيث أنها تعمل على زيادة مسار الالكترونات حيث أنها تتجمع الايونات الهيدروجينية مع الالكترونات في الكاثود لتشكل غاز الهيدروجين. [39]

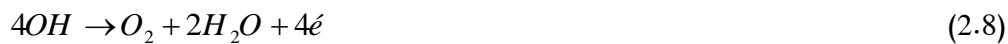
\_ ويعتبر إنتاج الهيدروجين بطريقة تحليل الكهربائي للماء أكثر طريقة شيوعا في إنتاج الهيدروجين كما انه لا ينتج ملوثات ولا أي انبعاثات عند قيامنا بهذه الطريقة ، و تكلفته قليلة نسبيا حيث نوضح طريقة إنتاج الهيدروجين عن طريق تحليل الكهربائي للماء :



المعادلات الحاصلة داخل الخلية التحليل الكهربائي :



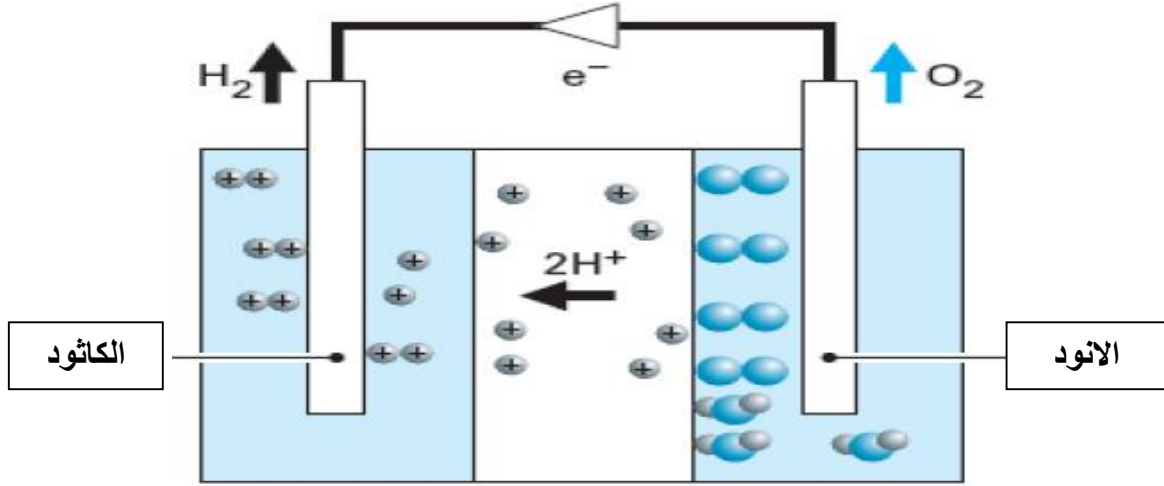
✓ الأنود



✓ الكاثود

• مجموع عمليتي الكاثود و الانود :

\_ نلاحظ خلال هذه التجربة أن الطاقة الكهربائية المقدمة إليها تحولت إلى طاقة كيميائية على شكل هيدروجين.

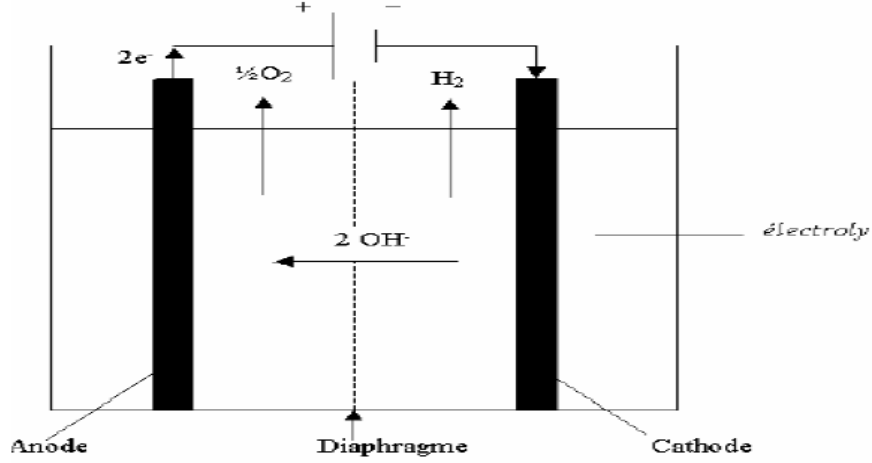
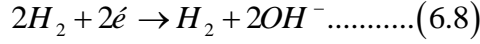
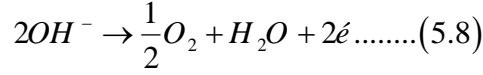


الشكل 15- رسم يوضح خلية التحليل الكهربائي للماء

\_ بالإضافة إلى هذه الخلية قد تكون هناك حاجة إلى الأنظمة الفرعية أخرى في عملية التحليل الكهربائي مثل الأنظمة التبريد و الامتدادات الطاقة و قد تكون هناك الحاجة أيضا لضغط خارجي من اجل نقل الهيدروجين إلى الضغط المطلوب و يتكون هذا التركيب بشكل عام من عدة أجهزة الكترونية متصلة بسلسلة متوازية و يكون هذا التركيب المتسلسل أكثر إحكاما من التركيب المتوازي. [39] [40]

### 3.2 . 8\_2 / التحليل الكهربائي القلوي : Electrolyse Alcaline

تعتبر هذه التكنولوجيا هي أقدم و أكثر استخداما و بالتالي هي صالحة وناضجة و باستخدام المحلول مائي لهيدروكسيد البوتاسيوم الذي يختلف تركيزه و درجة حرارته و يفضل هذا المحلول لأنه يعتبر أساسيا في التوصيل الأيونات و يحسن من مراقبة الكلوريدات و الشوائب الكبريتات. [40]



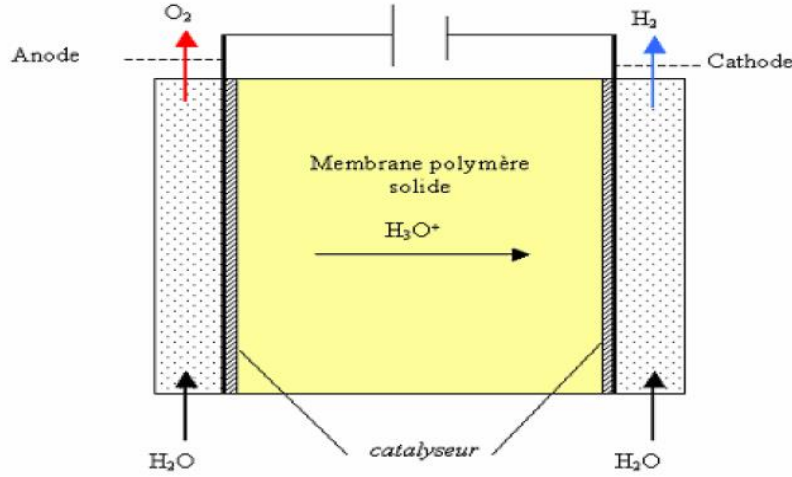
الشكل 16- مخطط يوضح تحليل الكهربي القلوي [41]

\_ و عادة ما تشمل هذه الوحدات إمدادات للطاقة و خلايا التحليل الكهربي و وحدة تنقية المياه و وحدة إزالة الرطوبة الغاز و وحدة تنقية الهيدروجين و نظام التحكم للضاغط حيث تعمل هاته التقنيات مباشرة تحت الضغط. [41] [42]

### 3.2. 8\_3/ تحليل الكهربي للحمض ( غشاء تبادل البروتون ) PEM:

#### Electrolyse De L'acide

يتضمن هذا النوع من التحليل الكهربي على الغشاء النفاذية البروتونات حيث يتكون هذا الغشاء عادة من بوليمرات حمض سلفونيك بيورفلود حيث تعمل أقطابها على تحفيز المعادن التي تسهل اختراقها و يتم التحليل ماء إلى أوكسجين و الالكترونات و البروتونات في الانود حيث تهاجر البروتونات من خلال الغشاء إلى الكاثود حيث يتم تخفيضها إلى الجزئيات الهيدروجين حيث تهاجر الالكترونات من خلال الدائرة الخارجية إلى الكاثود و تعتبر هذه التكنولوجيا ناجحة و يمكن إجراء هذه العملية في ضغط جوي، و يعتبر هذا نوع من التحليل الكهربي كمصدر للطاقات المتجددة، و هي أفضل من التحليل الكهربي القلوية حيث نلاحظ اختلاف في طاقة الكهربية بالإضافة إلى ذلك يعتبر التحليل الكهربي هو أفضل طريقة لإنتاج الهيدروجين. [42]



الشكل 17- مخطط يوضح التحليل للحمض [41]

### 3.2 . 4\_8 /تحليل الكهربائي بارتفاع درجة الحرارة: Electrollyse De Haute Température

هذه التكنولوجيا نتيجة لتطور في خلايا الوقود و الأهم من ذلك توفير الكهرباء و الحرارة من أجل الحفاظ على الحرارة العالية المطلوبة حيث يهدف هذا النوع من التحليل الكهربائي إلى مقارنته بنظام الشمسي أو المفاعل النووي ذوي درجات حرارة عالية.

\_ تعتبر هذه التقنية مماثلة للتحليل الكهربائي القلوي و لكن تستخدم بخار الماء بدلاً من الماء السائل حيث أن هذه الطريقة تدرس حالياً إنتاج الهيدروجين مع الأوكسجين كمنتج ثانوي و يمكن أن يكون في المستقبل أكثر فعالية من التحليل الكهربائي للماء و ذلك لأن بعض الطاقة المطلوبة للتفاعل يمكن توفيرها بالحرارة وهي أقل تكلفة من الكهرباء وهو أكثر كفاءة.

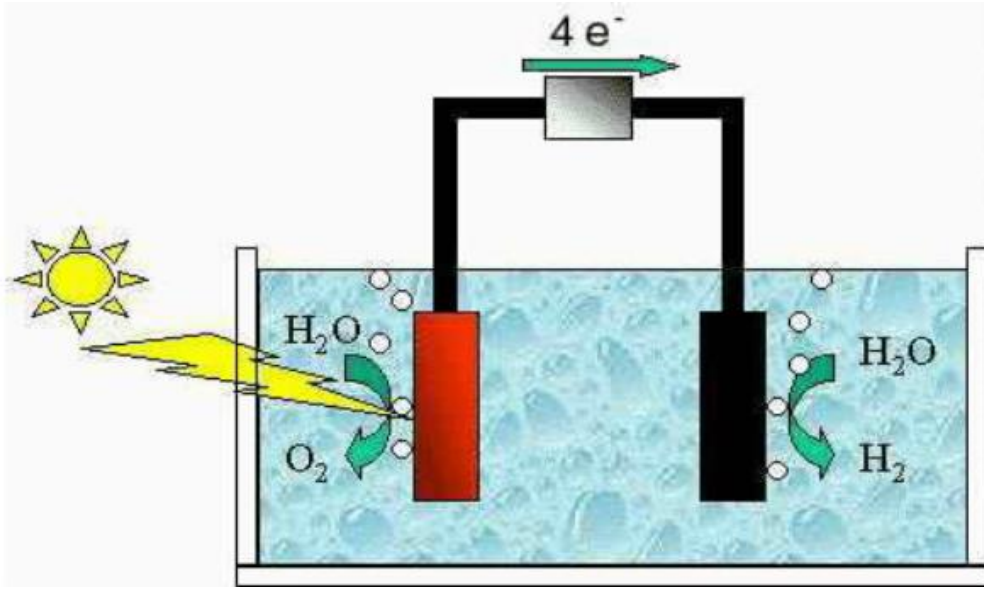
ولا يمكن المقارنة بالتحويلات الكيميائية الهيدروكربونية حيث أن هذه التفاعلات لا تعتمد على كفاءتها فقط بل مع اخذ كمية الانبعاثات ل  $CO_2$  و بالتالي فان مصادر الطاقة الحرارية كلها غير كيميائية بما في ذلك مصادر طاقة الحرارية الأرضية و المفاعلات النووية و المجمعات الشمسية [43].

### 3.2 . 5\_8 /تحليل الضوئي للماء (PEC): Analyse De L'eau

التحليل الضوئي للماء هي طريقة يتم فيها تحليل الماء بالكهرباء الناتجة من المحفز الضوئي مع أشباه الموصلات حيث أن خلايا الكهروضوئية تكون مغمورة في الماء و مقابلة لأشعة الشمس

حيث يتم عنها تحليل الماء إلى أوكسجين و هيدروجين فقط ، ويمكن بالأجهزة الضوئية أو الكهروضوئية و هناك أربعة مراحل رئيسية في هذه الطريقة :

- لابد أن تكون اللوحة معرضة لأشعة الشمس.
- تتم عملية الأكسدة في الانود لإنتاج جزيئات الأوكسجين ( $O$ ) .
- تنتقل الايونات الهيدروجين ( $H^+$ ) و الالكترونات من الانود إلى الكاثود.
- تنخفض ايونات الهيدروجين لتشكل جزيئات الهيدروجين ( $H_2$ ) في الكاثود .



الشكل 18- مخطط يوضح تحليل الضوئي للماء. [39]

\_ و فوائد هذه الطريقة هي إنتاج المباشر للهيدروجين و تعتبر تكاليف هذه الطريقة في زيادة محتملة من ناحية الكفاءة العامة ، و أخيرا فان أهم حاجز تكنولوجي في هذه الطريقة يكمل في صناعة أشباه الموصلات و من ناحية أخرى فهي قادرة على امتصاص الفوتونات الشمسية.

[43] [44]

#### 4.2 إنتاج الهيدروجين باستغلال مصادر الطاقات المتجددة : LA Production D'hydrogène En Exploitant Des Sources D'énergie Renouvelables

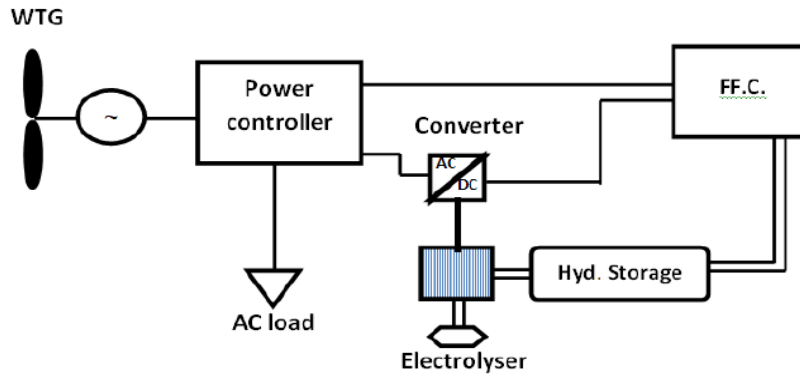
توجد هناك عدة طرق شيوعا في إنتاج الهيدروجين و ذلك باستخدام الطاقات المتجددة والقابلة للاستغلال حيث تعتبر الطاقة الرياح و الطاقة الشمسية من مصادر الطاقات المتجددة أكثر



الاستغلال حاليا و يمكن استخدامها كقنوات حيوية لإمدادات الطاقة و ذلك لتطور الحاصل في تقنيات لتوليد الطاقة الكهربائية من هذين المصدرين.[53]

#### 4.2. /1 من طاقة الرياح : De L'énergie éolienne

يمكن لهذا النظام الريحي إنتاج الكهرباء و استغلال فائض من الطاقة الكهربائية في إنتاج الهيدروجين و ذلك عن طريق تحليل الكهربائي للماء، و يعتبر هذا المصدر صديق للبيئة و طاقة بديلة حيث لا ينتج عنها أي انبعاثات ولا أي غازات ملوثة، يبين الشكل التالي مخططا رمزي و الذي يسمى "بالنظام الريحي - الهيدروجيني".[54]



الشكل 19 - مخطط رمزي لنظام الريحي - هيدروجيني

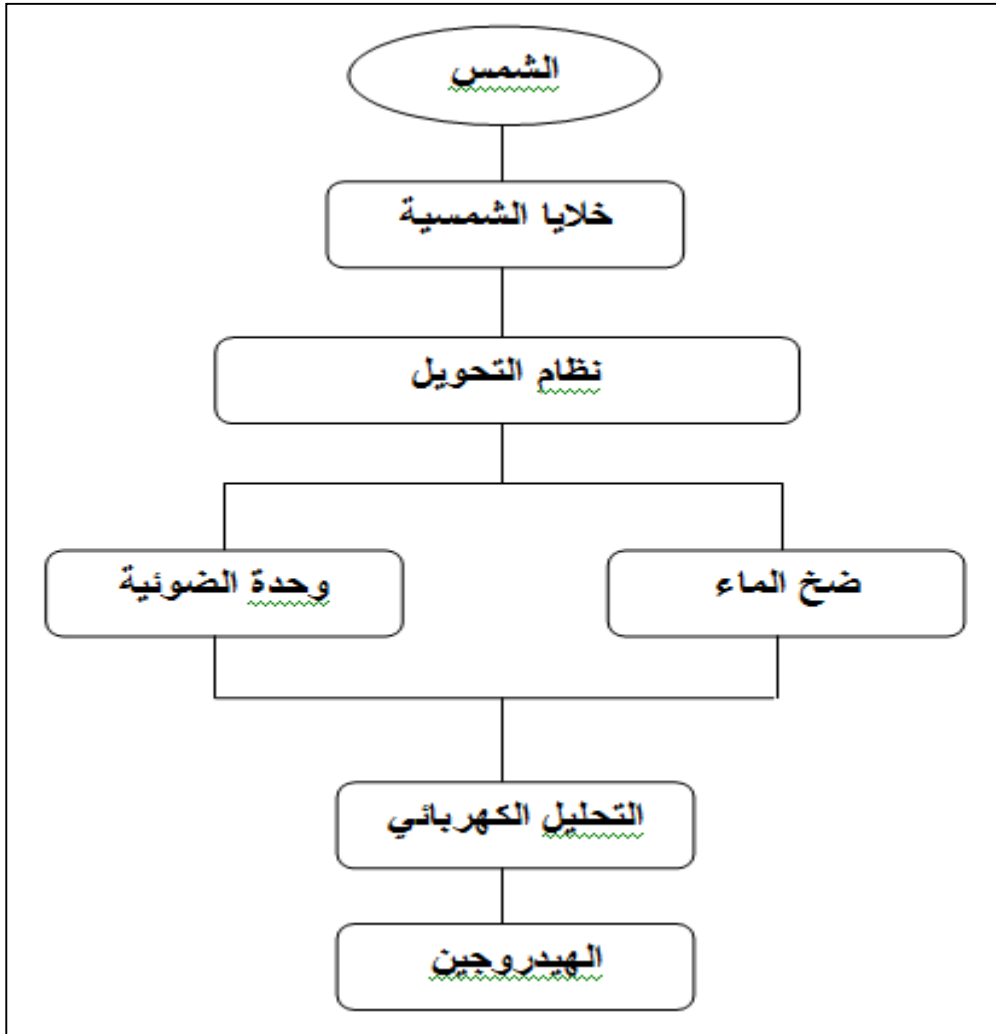
#### 4.2. /2 من الطاقة الشمسية : De L'énergie Solaire

يعتبر التحليل الكهربائي للماء من الطرق الأكثر شيوعا في إنتاج الهيدروجين، حيث نقوم باستغلال و استخدام الطاقة الشمسية في عملية التحليل الكهربائي و هو من الطرق الأكثر فعالية من حيث التكلفة و أكثر حماية للبيئة، و تعتبر هذه الطريقة من ابسط الطرق لإنتاج الهيدروجين حيث تشمل هذه الطريقة عدة مراحل منها : [55]

- ✓ **وحدة الضوئية** : هي عبارة عن ألواح تتكون من مواد كهروضوئية التي تقوم على تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية ، و بشكل عمومي فان هذه المواد عبارة عن موصلات أو مركبات أشباه الموصلات.
- ✓ **نظام التكيف** : المقصود بهذا النظام هو شكل الإشارة المنبثقة من الوحدة الضوئية.

✓ **نظام تحليل كهربائي** : هي عبارة عن مجموعة من الخلايا تتكون من ثنائي الأقطاب الكهربائية و تكون مغمورة في المحلول الكهربائي مع توصيلها بإمدادات الطاقة حيث نضيف إلى الماء مادة كيميائية موصلة.

\_ و يمكن توفير طاقة لتشغيل هذه الأنظمة إما بواسطة وحدة الضوئية أو بواسطة طاقة إضافية و يمكن أن تكون هذه الطاقة الإضافية تقليدية و إما تكون طاقة الرياح أو طاقة الحرارية الأرضية.



الشكل 20- التمثيل التخطيطي لنظام شمسي - هيدروجيني.

### • **نظام ضخ المياه و تحليل الكهربائي : Système De Pompage De L'eau Et électrolyse**

يشمل هذا النظام كلا من التضامن المساعدين مثل أنظمة التحكم و التنقية التي تنتج عن نظام الضخ و معالجة المياه حيث أن المياه المستخدمة في التحليل الكهربائي يمكن أن تأتي من عدة

مصادر مختلفة ، فالمياه المأخوذة من المنايع الساخنة يمكن أن تكون حلا جيدا ، فان هذا الماء الساخن يعتبر مصدر للطاقة مع زيادة فقط في العائدات إنتاج الهيدروجين مع العلم أن الطاقة اللازمة لضخ المياه تعتمد دوما على مصدرها. [54] [55]

## 5.2. آفاق إنتاج الهيدروجين:

يتمثل أحد أهداف هذا العمل في تقييم الأثر البيئي والجدوى الاقتصادية لاستخدام الهيدروجين كمتجه للطاقة البديلة. في هذا المنظور للتنمية المستدامة ومع مراعاة ما تم شرحه أعلاه ، ستقوم بمقارنة طرق الإنتاج المختلفة للهيدروجين من أجل محاولة تحديد ما هو أكثر أساليب الإنتاج قابلية للتطبيق اقتصاديًا للبيئة.

إن الإنتاج العالمي للهيدروجين كبير و متزايد على الصعيد العالمي أكثر من 50 مليون طن [46]، و قد بلغ إنتاج الهيدروجين من التحليل الكهربائي أكثر من 255.3 مليون متر مكعب عام 2013 و من المتوقع أن يصل إلى 324.8 مليون متر مكعب عام 2020 [47]. حيث أن إنتاج الهيدروجين حاليا يتم عن طريق إعادة تشكل البخار من الغاز الطبيعي و تعد هذه الطريقة من الطرق الرئيسية،و يتم إنتاجه أيضا عن طريق تحليل الكهربائي لكن بكميات أقل. تعتبر طريقة إعادة تشكل البخار حاليا الأقل تكلفة لإنتاج كميات كبيرة من الهيدروجين، حيث أن نسبة 48% من الهيدروجين المنتج بالعالم يتم استخراجها من الغاز الطبيعي [48]. حيث تتميز هذه الطريقة بميزة سيئة و هي اعتمادها على مصدر وقود احفوري غير متجدد، و من نتائجها أيضا إنتاج ثاني أوكسيد الكربون.

يستخدم التحليل الكهربائي تيار مستمر لتفكيك الماء إلى أوكسجين و هيدروجين، و بما أن هذه العملية تستخدم الماء كمصدر لها،يمكن أن تنتج أوكسجين و هيدروجين نقي يصل إلى 99.9995%، حيث أنه لإنتاج 1Kg من لهيدروجين نحتاج إلى 39KW من الطاقة الكهربائية و 8.9 L من الماء في درجة حرارة 25 درجة مئوية و 1 ضغط جوي [49]

ولدت فكرة استخدام الطاقة المتجددة لتوليد الكهرباء المستخدمة في تحليل الكهربائي في أوائل عام 1900، حيث أنه يمكن إنتاج الهيدروجين و الأوكسجين عن طريق تحليل الكهربائي من الكهرباء المولدة من طاقة الرياح [50]، و مع ظهور تقنيات جديدة للطاقة الشمسية أصبح أيضا تحليل الكهربائي من الكهرباء المولدة من الطاقة الشمسية لإنتاج الهيدروجين [51].

يمكن إنتاج الهيدروجين من مصادر طاقة المتجددة بما في ذلك الطاقة الشمسية و طاقة الرياح، و مع ذلك تواجه أنظمة طاقة المتجددة التحديات للحد من تكلفة الطاقة الكهربائية و تلبية احتياجات الطاقة من محطات الوقود الموزعة، في الماضي كانت العوائق الكبرى لاستخدام طاقة الرياحية و تقنيات طاقة الشمسية هي تكاليف المالية الباهظة ، و على مدى 30 سنة الماضية، انخفضت تكاليف الطاقة الشمسية و الرياحية بشكل ملحوظ.[52]

إن من أفضل الطرق الواعدة لتوفير طاقة نظيفة محلية خالية من الكربون لوحدات تحليل الكهربائي تكمن بإنتاج الطاقة الكهربائية من تقنيات الشمسية و الرياحية، حيث أن كلا من مصادر الطاقة الرياحية و الشمسية تولد طاقة الكهربائية بشكل متفاوت و يختلف باختلاف المصدر الطبيعي الذي يسبب توليدها، و هناك جانب آخر مهم من التكلفة النهائية للهيدروجين، هو ما إذا كان يتم إنتاجه مركزيا أو إنتاجه بطريقة موزعة عند نقطة الاستخدام.[52]

## 6.2. ملخص:

في هذا الفصل تحدثنا عن المصادر المختلفة للهيدروجين و طرائق الإنتاج المستعملة في إنتاج الهيدروجين، فإذا اتخذنا عدم مراعاة التأثيرات البيئية فإن إنتاج الهيدروجين من الوقود الأحفوري هي الطريقة المناسبة لذلك، كما أنه يمكن أن يقترن إنتاج الهيدروجين من التحليل الكهربائي بفضل الطاقات المتجددة .

لذا فإن استعمال الهيدروجين كمتجه للطاقة يكمن في نوع المصدر و كذلك في تأثيرات البيئية، حيث أن الهيدروجين ليس مجرد وسيلة لتخزين الطاقة.

# الفصل الثالث:

**1.3.1. المقدمة :**

- بما أن الهيدروجين من أخف العناصر و له وزن جزيئي صغير جداً فإن تسربه من الخزانات و الأنابيب يعتبر أسهل بكثير من تسرب الوقود التقليدي، و على أية حال سواء كان استخدام هذا الهيدروجين كوقود للنقل أو لتوليد الطاقة فإنه من الضروري وجود طرق فعالة و قليلة التكلفة لتخزينه، إذ نعتبر أن تخزين الهيدروجين هو وصف للطرق التي يمكن من خلالها تخزين غاز الهيدروجين من أجل استعمالات متعددة. هذه الطرق تعتمد على عدة أساليب، منها تطبيق ضغط مرتفع، أو بواسطة التبريد الشديد أو بواسطة مركبات كيميائية .
- يعد تخزين الهيدروجين أحد الأهداف الحالية لاقتصاد الهيدروجين. أغلب الأبحاث حول تخزين الهيدروجين تهدف إلى تخزين الهيدروجين على شكل مادة حاملة للطاقة خفيفة الوزن من أجل التطبيقات المختلفة. يمكن أن نقسم طرق تخزين الهيدروجين كالتالي:

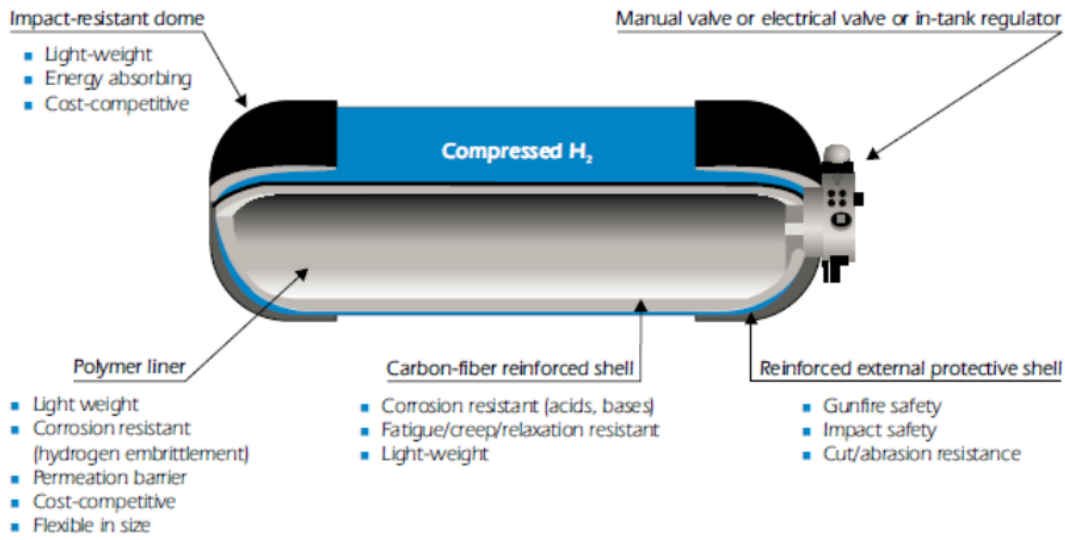
### 2.3. تخزين الهيدروجين على شكل غاز: Stockage De L'hydrogène Sous Forme De Gaz

تعتبر طريقة تخزين  $H_2$  على شكل غاز من أحد أكثر التكنولوجيات البسيطة و أكثرها شيوعاً و تتم هذه العملية داخل صهاريج أو حاويات و اسطوانات غاز، فقد تم تطوير الصهاريج المركبة الخفيفة الوزن لتحمل الضغوط التي تصل إلى حوالي 850 بار و قد تم تحقيق أقصى ضغط لتعبئة الحاويات حوالي 1094 بار، حيث أن هناك طرق أخرى لتخزين الهيدروجين كغاز مثال غاز مبرد، حيث يتم تبريد الهيدروجين الغازي في درجات الحرارة المنخفضة مما يحسن من كثافة الطاقة في الغاز. [56] فكانت طريقة تخزينه على شكل غاز كالتالي:

### 1\_2.3. ضغط الهيدروجين : Pression D'hydrogène

إن عملية ضغط الهيدروجين مشابهة لعملية ضغط أي الغاز، و يتم ضغط الهيدروجين عادة في ضغط حوالي  $(25-200)bar$ ، و ذلك في حال تخزينه في خزانات اسطوانية الشكل ذات السعات الصغيرة بحدود 50l ، أما في حال استخدام الهيدروجين في النطاق الواسع فإنه يضغط تحت ضغوط العالية و تخزينه في خزانات ذات جدران سميكة معظمها تكون في شكل اسطواني، و تعد الخزانات المركبة بالكربون أو الألمنيوم من أكثر التقنيات نضجا، حيث أن هذه الخزانات قادرة على تحمل ضغوط العالية تصل قيمتها حوالي  $700bar$ ، حيث تبلغ كثافة الغاز عند  $350bar$  إلى حوالي  $20kg / m^3$  و  $(35-40)kg / m^3$  في ضغط  $700bar$  حيث أن هناك الحاجة إلى ضغط حوالي  $20000bar$  للوصول إلى كثافة  $70kg / m^3$ ، و لتحقيق مثل هذه الضغوط العالية

يعتبر أمر غير واقعي، فمن الواضح أن تخزين الهيدروجين بالضغط العالي لديه بعض العيوب أنه لن يتمكن أبداً من الوصول إلى كثافة عالية، إضافة إلى أن قدرة تخزينه في المركب تكون محدودة، لأن زيادة الضغط لا تتناسب مع زيادة في سعة التخزين عند الضغط العالي مع فقدان طاقة بشكل كبير أثناء ضغط الهيدروجين و مع ذلك فإن التخزين الغازي هو الشكل الغالب للتخزين المستخدم حالياً في العالم، و من أجل الانتقال إلى الاقتصاد القائم على الهيدروجين و الاستخدام الهيدروجين يجب تطوير أشكال التخزين الأخرى أنظر الشكل [57].



الشكل (21): يوضح نموذج لخزان مركب لتخزين غاز الهيدروجين المضغوط.

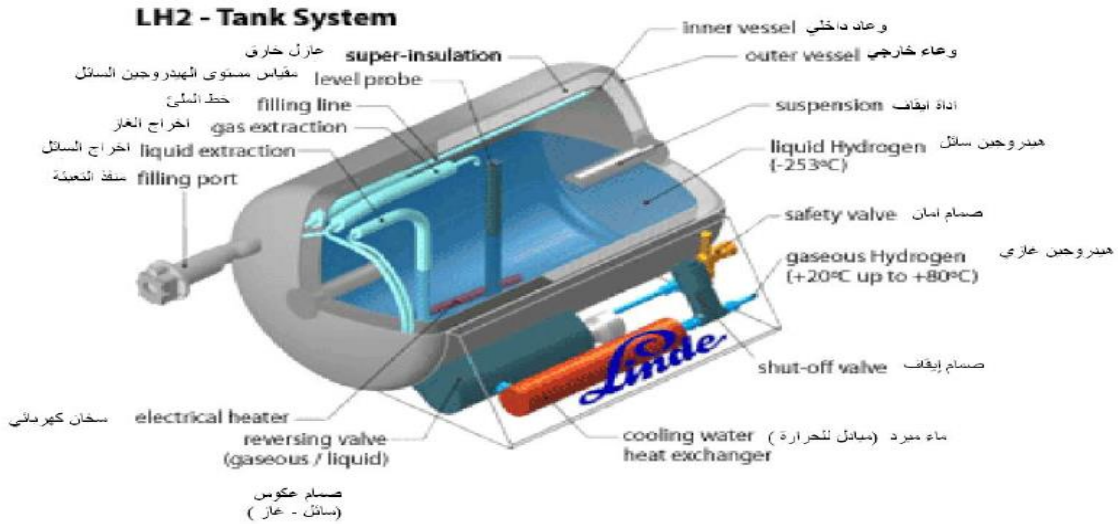
### 3.3\_ تخزين الهيدروجين على شكل السائل : Stockage De L'hydrogène Sous Forme De Liquide

الطريقة الثانية الأكثر استخداماً للتخزين بعد الغاز المضغوط هو تخزين الهيدروجين كسائل كما يمكن تخزين الهيدروجين على شكل سائل مبرد و ذلك في درجة حرارة أقل من الصفر ( $-253^{\circ}C$ ) أو يتم تخزينه كـمكون في السوائل أخرى مثل محاليل  $NaBH_4$  أو السوائل العضوية القابلة للشحن أو الأمونيا اللامائية، و يستخدم الهيدروجين السائل في بعض المركبات التجارية، حيث يحتوي الهيدروجين السائل على كثافة تقدر بـ  $70.8 kg / m^3$  و عند ضغط  $13bar$  و عند وصوله لدرجة حرارة ( $-240^{\circ}C$ ) يبدأ بتغير طوره من الغاز إلى سائل و هي تسمى بالنقطة الحرجة و له كثافة الجاذبية تقارب 100% مثل الهيدروجين الغازي، و مع ذلك لا يمكن استغلال الكثافة الكلية للهيدروجين حيث تقدر نسبة استغلاله 20% من وزنه و تكون له كثافة طاقة كبيرة لكل وحدة حجم

تتراوح ما بين  $30\text{kg} / \text{m}^3$  إلى  $80\text{kg} / \text{m}^3$  إضافة إلى ذلك يتم فقدان طاقة قدرها (30-40)% عندما يتم إنتاج الهيدروجين السائل. [58]

### 1.2.3. تبريد هيدروجين السائل : Refroidissement De L'hydrogène Liquide

يتم تخزين الهيدروجين في أوعية الخاصة بتبريد، و المعروفة أيضا باسم المبردات حيث هذه الأوعية مزدوجة الجدران مع وجود عازل بين الجدران، حيث يعتبر هذا العازل أمرا مهما و ذلك من أجل تقليل تدفق الحرارة، و يستخدم النيتروجين السائل أيضا كخامل لزيادة تقليل انتقال الحرارة، و يمتاز هذا الهيدروجين السائل بكثافة تخزين عالية في ضغوط منخفضة نسبيا ، إضافة إلى ذلك أن طاقته المخزنة أفضل بكثير من الهيدروجين المضغوط، و لكن هناك حاجة إلى كمية كبيرة من الطاقة في عملية التميع (الإسالة) حيث تقدر هذه الطاقة اللازمة لتميع  $10\text{kwh} / \text{kg}$  ، بينما قيمة التسخين الأعلى (HHV) للهيدروجين تقدر ب  $39.4\text{kwh} / \text{kg}$  ، ومنه يعني أن حوالي 25% إلى 45% من الطاقة المخزنة في الهيدروجين سوف تستهلك لتخزين، و لحفاظ على الظروف التبريد يجب استخدام خزانات فائقة العزلة إضافة إلى خطورة المتشكلة بسبب الضغط و التبريد. [59] يمثل الشكل التالي تصميم خزان لتخزين الهيدروجين بشكل سائل :



الشكل (22) : يوضح نظام لتخزين الهيدروجين السائل.

### 2.3.3. في السوائل العضوية: Dans Les Fluids Organiques



يتم في هذه التقنية تخزين الهيدروجين المنتج و ذلك بإضافته إلى سوائل عضوية في شكل ناقلات الهيدروجين على سبيل المثال السوائل العضوية، و يحدث نزع الهيدروجين بالتحفيز العكسي ل  $(C_7H_{14})$  إلى  $(C_7H_8)$  وفقا لتفاعل التالي :



- و يتمثل العيب الرئيسي للسوائل العضوية عند استخدامها في تخزين الهيدروجين في المنتج الباقي إلى المصنع لإعادة تدويره، و هذا يعني أن المنتجات الثانوية يجب إزالتها مما يجعل هذه الطريقة مكلفة و منه فان مثل السيكلوكسين هو سائل عديم اللون و الرائحة يمكن أن يتفاعل بقوة مع الأكسدة التي تؤدي إلى الانفجار لذلك فان استخدام هذه الأنواع من أنظمة التخزين مشكوك فيه. [59] [60]

### 4.3\_ تخزين الهيدروجين على شكل صلب : Stockage De L'hydrogène Sous Forme De Solide

يقوم الكيميائيون حاليا بالتحري عن خيار بديل لتخزين الهيدروجين لمركبات تعمل بخلايا الوقود فكانت بحوثهم قائمة في الأساس عن تركيب مادة تحتوي على كمية كبيرة من الهيدروجين و هي أحد أكثر أشكال التخزين الواعدة في المستقبل على الرغم من أنه لا يزال في مرحلة البحث و التطوير، فمن حيث المبدأ هناك طريقتان لتخزين الهيدروجين في مادة صلبة و التي تختلف في طريقة ارتباط الهيدروجين بالصلب فكان التخزين الحالة وفقا لآليتين هما ( الامتصاص الكيميائي " *chemisorption* " \_ الامتصاص الفيزيائي *physisorption* " ) :

#### 4.3\_1. الامتصاص الكيميائي : Chemisorption

و تعتمد في هذه الطريقة على تكوين رابطة كيميائية بين الصلب و ذرة  $H_2$  و يتضمن في هذه التقنية كسر رابطة  $H-H$  و ينتج عنه  $H$  جديد بحيث يشكل رابطة قوية مع المادة الصلبة و ذلك بإجراء التفاعلات الكيميائية التي تؤدي إلى امتصاص الهيدروجين كما هو الحال في الهيدريدات المعدنية.

- المواد التي يكون فيها الهيدروجين كيميائياً لها كثافة عالية مقارنة بالمواد التي يتم امتصاص الهيدروجين بها، يستلزم الإزالة الكيميائية تفكك الهيدروجين الجزيئي بحيث يتم تخزين الهيدروجين كذرات الهيدروجين . لتسهيل هذا التفكك، يمكن إضافة معادن انتقالية إلى المادة - فإن إلكترونات المعدن الانتقالي تفكك رابطة  $H-H$ .

## 4.3\_1.1 / الهيدريدات : Hydrides

يملك  $H_2$  القدرة على تكوين مركبات مع عناصر أخرى عند تفاعله مع الفلزات مثل هيدريد الصوديوم  $NaH$  و هيدريد الكالسيوم  $CaH_2$  و التي يتخذ فيها الهيدروجين عدد أكسدة سالب، أي أنه يتفاعل باكتساب إلكترون واحد مع العناصر التي لها أقل كهروسالبية.

## 4.3\_1.1\_1.1 : Hydrures Métallique : هيدريدات المعادن

تتفاعل المعادن، والمركبات البينية المعدنية والسبائك بشكل عام مع الهيدروجين وتشكل مركبات هيدروجين-فلزية صلبة ( $MH_n$ )، و توجد هيدريدات أيونية\_ هيدريدات تساهمية\_ هيدريدات فلزية \_ حيث يتفاعل الهيدروجين في درجات حرارة مرتفعة مع العديد من المعادن الانتقالية وسبائك لتشكيل هيدريد.

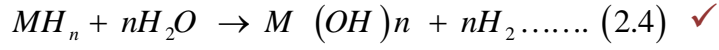
إن أحد أهم جوانب تخزين هيدريد معدني على مستوى المركب هو القدرة على امتصاص الهيدروجين بسرعة، حيث تعتبر هذه المواد في الحالة الصلبة أفضل من ناحية الكفاءة و كثافة الطاقة العالية وهي قادرة علي امتصاص وإزالة الهيدروجين مع اختلافات الضغط الصغيرة، و إن استخدام الهيدريد يعتبر تقنية واعدة لتخزين الهيدروجين و هناك طرق جديدة وهي استخدام المواد ذات البنية النانوية مثل الأنابيب النانوية الكربونية و النيتريدات و البورون، والتي يعرف أنها تمتلك خاصية تخزين الغازات داخل هيكلها. [62]

- عندما يتفاعل الهيدروجين مع سبيكة معدنية فإنه ينتج عنه طرد للحرارة، و بالتالي يتم تخزين الهيدروجين في هذه الجزيئات المعدنية، كما أنه يجب توفير تكنولوجيا المناسبة لإمداد و إزالة الحرارة، و من أجل امتصاص الهيدروجين يجب توفير الحرارة حيث تعتمد هذه الحرارة اللازمة لامتصاص على الانتالبي لتشكيل هيدريد معدني، كما أنه عند الإفراج على الهيدروجين يتطلب أيضا حرارة، و يمكن أن يكون الهيدروجين مرتبط كيميائياً إما بالهيدريدات المعدنية أو السائلة، حيث يستخدم هيدريد المعادن مركبات مثل مركب ( $FeTi$ ) لتخزين الهيدروجين عن طريق ربطها بسطح المادة، حيث تعمل سبيكة الحديد-التيتانيوم كإسفنج لامتصاص الهيدروجين، وبالتالي يصبح هيدريد فلز ( $FeTiH$ ) و منه تعتبر هذه الطريقة الأسلم لتخزين الهيدروجين في "هيدريد المعدن"، و يعتبر الهيدريد منخفض درجة الحرارة مثل  $FeTiH_2$  و  $LaNi_5H_7$ ، و لكن عند ارتفاع درجة حرارة عالية في الهيدريد يتم عنه تحرير الهيدروجين. [63]

يقوم الهيدريد أو السبيكة المعدنية على آلية امتصاص الكيميائي و ذلك عن طريق الانحلال الحراري القابل للعكس ، أي

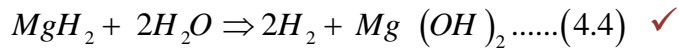
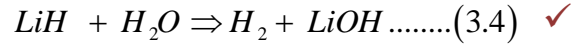


- حيث  $M$  هو معدن أو سبيكة و  $x$  هو تكافؤ، ويمكن لهذه التفاعلات أن تكون قابله للعكس، ويمكنها تخزين الهيدروجين بواسطة هيدريد المعدن تحت ضغط شديد، حيث يعرف التحلل المائي بأنه تفاعل هيدريد بالماء لتحرير غاز الهيدروجين كما توضحه المعادلة

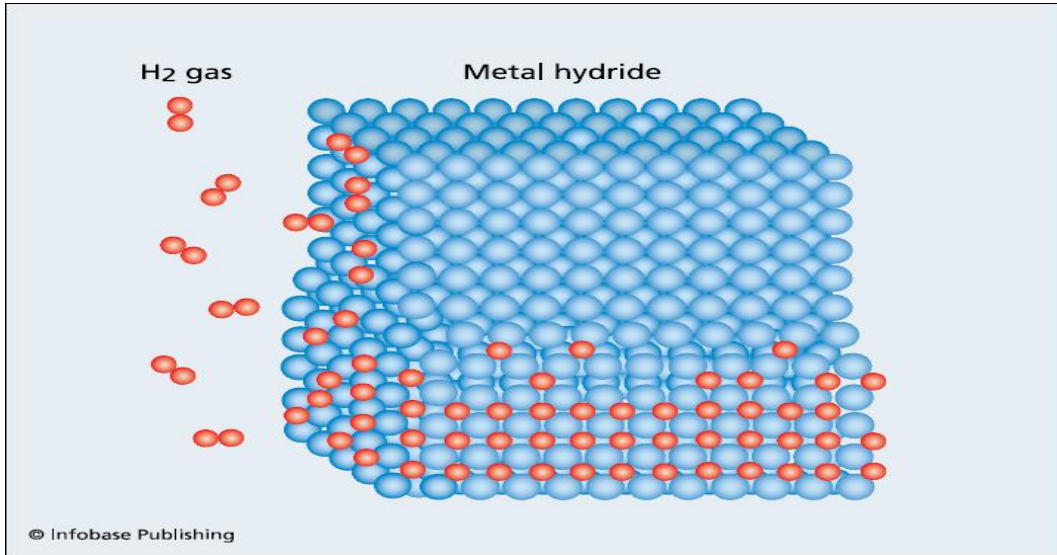


حيث  $M$  هو معدن و  $n$  هو التكافؤ. [64]

كما يبين التفاعلين التاليين [65] :



\_ نلاحظ الشكل التالي الذي يوضح عملية الهدرجة كما يلي :



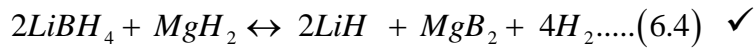
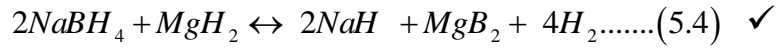
شكل(23): يوضح امتصاص الهيدريد المعدني للهيدروجين.

- إن السبائك المعدنية هي الخيارات المهمة لتشكيل الهيدريدات، و ذلك بسبب وزنها الخفيف و قدرتها على تخزين الهيدروجين، أما بالنسبة للمعادن مثل الليثيوم ( $Li$ )، والبريليوم ( $Be$ )، والصوديوم ( $Na$ )، والبورون ( $B$ )، والألمنيوم ( $Al$ )، والمغنيسيوم ( $Mg$ ) الخ، كانت موضوع أبحاث مكثفة في الآونة الأخيرة، حيث تستخدم المعادن الثقيلة بشكل عام بكميات صغيرة كمحفزات أو منشطات لتعديل خاصية هيدريد المعادن، كما يمكن تصنيف هيدريدات إلى :

### 4.3\_1\_2.1\_1\_4.3 : (Mg) المغنيسيوم معتمد على هيدريد معتمد على (Mg) : Hydrure a Base De Magnésium

يعتبر المغنيسيوم ( $Mg$ ) واحد من أكثر المرشحين لتخزين الهيدروجين حيث يمتلك ( $MgH_2$ ) سعة تخزين عالية من  $H_2$  تقدر بـ 7.7% لكل وحدة كتلة، إضافة إلى أن له أعلى كثافة الطاقة من جميع هيدريد قابله للعكس تقدر حوالي ( $9 MJ / kg$ )، و وفرة كبيرة و تكلفته منخفضة و يتطلب تحليله مرة واحدة، و له قوة الترابط عالية حوالي ( $75KJ / mol$ ) و هذا مما يؤدي إلى ارتفاع في درجة الحرارة التحلل، و على الرغم من كل هذه الخصائص فإنه يتم تطوير هذه الهيدريدات القائمة على المغنيسيوم ( $Mg$ ) من أجل الاحتفاظ على قدرة الهيدروجين العالية و ذلك بمزج ( $MgH_2$ ) مع أنواع أخرى من الهيدريدات المعادن الخفيفة كما يمثل التفاعل التالي :

[66]



#### : $Mg_iXH_y$

إن المركبات القائمة على ( $Mg$ ) مع مجموعة ( $XH_y$ ) تعتبر أيضا مثيرة للاهتمام لتطبيقات تخزين الهيدروجين مثل  $Mg_2Ni$  و  $Mg_2CO$  و  $Mg_2Fe$ ، و منه يتفاعل  $Mg_2Ni$  مع الهيدروجين و يتحول إلى مرحلة الهيدريد المعقد  $Mg_2NiH_4$ ، و تقدر درجة الحرارة لإزالة الهيدروجين حوالي ( $250 - 300$ ) درجة مئوية و في الضغط  $2.5 \text{ bar}$ ، و هي أفضل من المغنيسيوم ( $Mg$ ) النقي، و منه أن البنية المجهرية تلعب دورا مهما على الخصائص الهدرجة لهذا النوع من هيدريد المعدن.

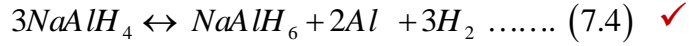
[67]

### 4.3\_1\_3.1\_1\_4.3 : Les Hydrures Sont Complexes : هيدريدات معقدة

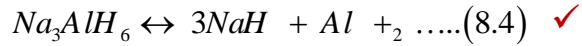
أصبح مصطلح هيدريد معقد مصطلحا شاملا حيث يشمل كل من التحليلات و النيتريدات و البروهيدريدات و التي يجري نظر فيها حاليا لتخزين الهيدروجين. [68]

#### 1.3- الأليانات : Alanates

تعتبر أليانات الصوديوم ( $NaAlH_4$ ) من المواد الأولية المركز عليها في تخزين الهيدروجين، و منه أثناء عملية إزالة الهيدروجين تتحلل هذه المرحلة إلى مرحلة متوسطة لينتج ( $Na_3AlH_6$ ) مع إنتاج للهيدروجين كما توضح المعادلة التالية :



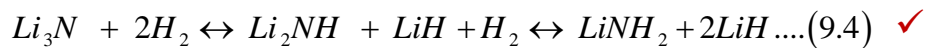
كما تبين الخطوة التفاعل الثانية إلى إنتاج جديد للهيدروجين كما توضحه المعادلة التالية :



يحدث التفاعل الأول في درجة حرارة تقدر حوالي (210-220) درجة مئوية، و التفاعل الثاني في درجة حرارة حوالي 250 درجة مئوية، مع العلم أنه لا يحدث نزع الهيدروجين من  $NaH$  إلا في درجة حرارة حوالي 425 درجة مئوية ولا تعتبر هذه العملية الأخيرة دورًا في عملية تخزين الهيدروجين القابل للعكس، إن عدم إرجاع هذا التفاعل، وعدم استقرار الهيدريد وحركة إمتصاص بطيئة تعني أن هذه المادة لم تعتبر مادة تخزين واعدة بشكل خاص و لكن عند إضافة محفز مناسب يصبح عملية الهدرجة قابلة للعكس مما يؤدي إلى تخزين الهيدروجين، و لتحسين حركية قابلية الرجوع و حركة الهدرجة يتم إستخدام التيتانيوم ( $Ti$ ) و التي تظهر أفضل حركية في التركيب مع أعلى سعة تخزين الهيدروجين، و منه يتم إمتصاص الهيدروجين بسهولة عند درجات حرارة حوالي 120 درجة مئوية ، ويمكن إعادة هدرجته عند درجة مئوية و في ضغط 170، و علي الرغم من أن دور محفز ( $Ti$ ) لم يفهم بالكامل بعد، و منه فإن المادة قد استخدمت بالفعل في وحدات تخزين الهيدروجين ولذلك أثبتت إلى حد ما أن الهيدريد المعقد يمكن تطبيقه عمليًا على تطبيقات التخزين الهيدروجين.[69]

### 2.3- النيتريدات : Nitrides

يعتبر استخدام الليثيوم والبريليوم في المركبات أمرا جيدا و ذلك بسبب انخفاض وزنها الذري، حيث يعتبر تخزين الهيدروجين في  $Li_3N - Li_2NH - LiNH_2$  خيارًا جذابًا و ذلك وفقًا للتفاعل التالي :

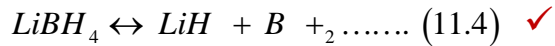
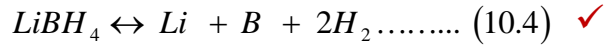


- ويذكر أن إضافة العامل المساعد  $TiCl_3$  له تأثيران مهمان هما تثبيط تكوين  $NH_3$  وتحسين حركية الهدرجة، و أيضا  $LiH$  يحد من تكوين  $NH_3$  أثناء نزع الهيدروجين، عندما نقوم بخليط من  $LiH$  و  $LiNH_2$  مع محفز  $TiCl_3$  فإنه يمكن إطلاق 6% من كتلة الهيدروجين عن طريق التفاعل ثاني وذلك في درجة الحرارة تتراوح ما بين  $150C^\circ$  إلى  $250C^\circ$  ، و مع ذلك

يكون امتصاص الهيدروجين في ضغط متوازي  $0.1 \text{ MPa}$  و في درجة حرارة تقدر  $250^\circ\text{C}$  [70].

### 3.3- بروهيدرايدت : Borohydrides

وتحتوي البروهيدرات علي أكبر قدر من سعة تخزين الهيدروجين من أي هيدريد معقد، و يحتوي  $\text{LiBH}_4$  علي 18.5% من كتلة الهيدروجين ويتم إطلاقه خلال أحد التفاعلات التالية :



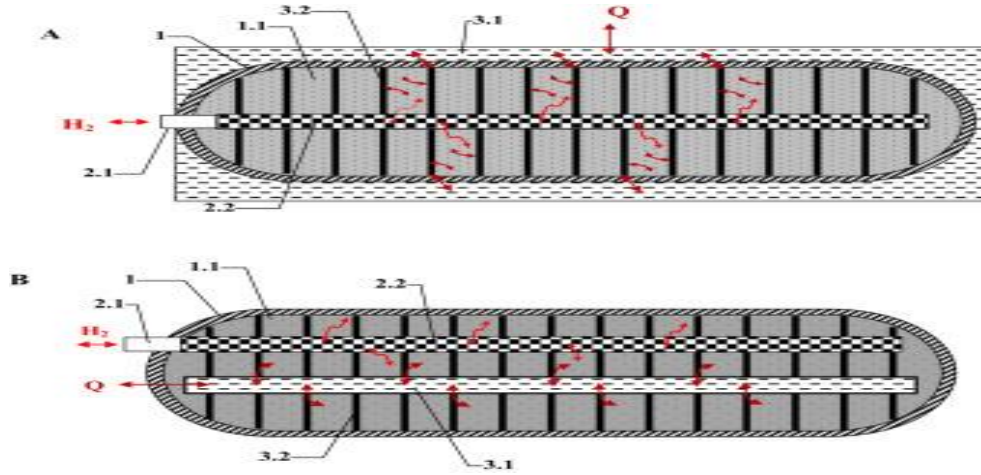
- ومع ذلك، فإن درجة حرارة التحلل مرتفعه جدا تكون فوق  $727$  درجة مئوية، ومع ذلك، فإن تفاعل إزالة الهيدروجين من  $\text{LiBH}_4$  هو عملية عكسية، وعلي الرغم من إعادة الهيدروجين تتطلب ضغوط عاليا  $35 \text{ MPa}$  ودرجات حرارة عاليه تبلغ  $600$  درجة مئوية، و بالنسبة لمعظم الهيدريدات المعقدة فإن آلية الهدرجة في  $\text{LiH}$  و  $\text{B}$  ليست مفهومة بعد ولكن يُعتقد أنها ناتجة إما عن التفاعل ل  $\text{LiH}$  مع  $\text{B}$  لتشكيل مركب يحتوي على الهيدروجين، أو من تفاعل  $\text{H}$  و  $\text{B}$  لتشكيل البوران ( $\text{BH}_3$ )، والذي يتفاعل تلقائياً مع  $\text{LiH}$  لإعطاء بوروهيدريد كامل. [71] [72]

### 4.3\_1\_4.1 المركبات متعددة المعادن : Véhicules Multimodaux

يمكن لهذه المركبات أن تستخدم في تخزين الهيدروجين القابل للعكس، و كانت من أحد التطبيقات الأولية الموجهة للتخزين الهيدروجين و لكن هذه المركبات المعدنية لها قدرة منخفضة نوعا ما في تخزين الهيدروجين، و يكون الشكل العام لهذه المركبات  $\text{ABnH}_x$  وعادة ما تتكون هذه المركبات المضيفة من معدنيين  $\text{A}$  و  $\text{B}$ ، حيث تميل هذه المركبات إلى تشكل  $\text{AH}_x$  و  $\text{BH}_x$  و إضافة إلى أنها تتشكل بين عنصر يشكل مرحلة هيدريد مستقر و عنصر يشكل مرحلة هيدريد غير مستقر حيث يكون الهيدروجين في المواقع المتداخلة (البينية)، و تتميز هذه المركبات بقدرتها المحدودة على ضبط الامتصاص و ذلك عن طريق مزج بين المعادن كما يمكن أيضا تغيير المركبين  $\text{A}$  و  $\text{B}$  وفقا للمتطلبات. و منه تعتبر هذه التطبيقات مثيرة للاهتمام و خاصة للتطبيقات الثابتة. [73]

لا يزال الهيدريدات المعادن تبدوا كاحل لتخزين الهيدروجين في المستقبل، و لكن تطبيقها في الواقع لا تزال بعيدة كل البعد و خاصة في قطاع النقل، وغالبا ما يكون تطبيقها محدودا مقارنة بغيرها من تكنولوجيات التخزين الأخرى، يعتبر تقديم الهيدريدات المعدنية كوسط تخزين عند الانتقال إلى اقتصاد الهيدروجين هو الأفضل استعمالا من بين التطبيقات الثابتة، حيث يمكن أن تخزن هيدريدات

المعادن في حاويات حيث يمكن أن تكون حاويات هيدريد المعادن إما مبردة خارجياً أو مبردة داخلياً كما هي موضحة في الشكل التالي: [74]



الشكل (24): وصف لمكونات الحاويتين للتبريد الخارجي (A) والتبريد الداخلي (B).

✓ مكونات الحاويات هي:

1- الحاوية الكلية للغاز.

1.1- مواد الهيدريدات المعدنية.

2- نظام إدخال و إخراج وتوزيع الغاز.

1.2- خط أنبوب مدخل و مخرج  $H_2$ .

3.2- تنقية الغاز.

3- نظام تحكم في الحرارة.

1.3- وسائل التدفئة/التبريد.

2.3- أجهزة توزيع الحرارة.

### 2\_4.3. الامتصاص الفيزيائي : Physisorption

تمتاز جزيئات  $H_2$  على سطح المادة الصلبة عن طريق التجاذب الفيزيائي وحده إذ لا يتم تشكيل روابط جديدة بسبب وجود قوى فاندرالس قوية التي تؤدي إلى امتصاص الهيدروجين مثل المواد

الكربونية المسامية، حيث لها روابط ضعيفة و الطاقة المطلوبة منخفضة نسبيا لإطلاق الهيدروجين المخزن. [61]

- تعتمد المواد التي تتم امتصاص الهيدروجين عليها على مساحة سطحها لتخزين الهيدروجين وتميل إلى امتلاك قدرات حجميه منخفضة. ومع ذلك فإنها تستند بشكل عام على عنصر الكربون، فتأتي أشكال تخزينها على الشكل التالي:

### 4.3\_2. 1. المواد الكربونية و الأنابيب النانوية: Matériaux En Carbone Et Nanotube

قد لفت الانتباه لتخزين الهيدروجين في الكربونات الصغيرة، بما في ذلك الكربون النشط و الأنابيب النانوية الكربونية والألياف النانوية، ومؤخرًا، الكربونات المسامية المجهرية و تعتبر هي التقنية المركز عليها و ذلك بسبب انخفاض الكتلة المولية و استقرارها الكيميائي و من الناحية العملية، يتم تسويق الكربونات المسامية بكميات كبيرة وهي غير مكلفه نسبيا. [75]

### 4.3\_2. 2. الكربون النشط: Charbon Actif

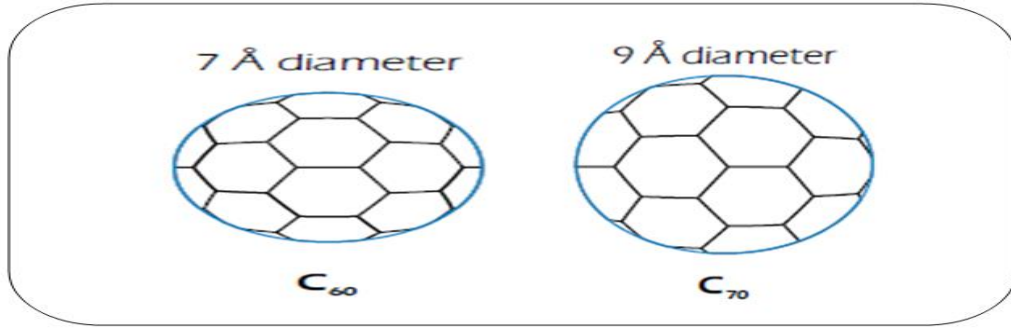
الكربون المنشط هو شكل من أشكال الكربون يسهل اختراقه ويمكن دمج مع أساليب التنشيط الكيميائية أو الفيزيائية، و اعتمادا على كل من المواد وطريقة التنشيط والظروف، فإن الكربون الناتج سيكون له بنية مسامية محددة ويمكن أن تكون الكربونات المنشطة أساسا عيانية أو مجهرية أو جزيئات يسهل اختراقها، و لكن في الأخير التركيز الرئيسي هو تخزين الهيدروجين، حيث أن الكربونات المنشطة تميل إلى أن تكون لها مسام على شكل شق كما يمكن أن تتخذ بنية المسام للكربون العديد من الأشكال المختلفة وذلك اعتمادًا على طريقة التنشيط المختارة والمواد الخام المستخدمة. [76] [77]

### 4.3\_2. 3. ألياف الكربون النانوية والفوليرين: Nanotubes De Carbone Et Fullerène

وهناك بديل آخر في بنية النانو الكربونية هو تكنولوجيا الكربون النانوية، و هي زرع ألياف الكربون النانوية بواسطة تحلل الهيدروكربونات أو أول أكسيد الكربون على محفز معدني وتتكون هذه



الألياف من صفائح جرافيت محاذية في اتجاه معين، حيث تعتبر ألياف النانو الجرافيت مثالية لامتصاص الغاز كما أن قدرتها على امتصاص الهيدروجين تقدر بحوالي 10% لكل وحدة كتلة، وقد تبين أن الكربون الفوليرين  $C_{60}$  و  $C_{70}$  يقوم بتخزين الهيدروجين بطريقة عكسية، نظريًا، يمكن أن يتم هدرجة الفوليرين  $C_{60}$  حتى  $C_{60}H_{60}$  و التي تتوافق مع 7.7% من كتلة الهيدروجين، كما يمثل الشكل التالي : [78]

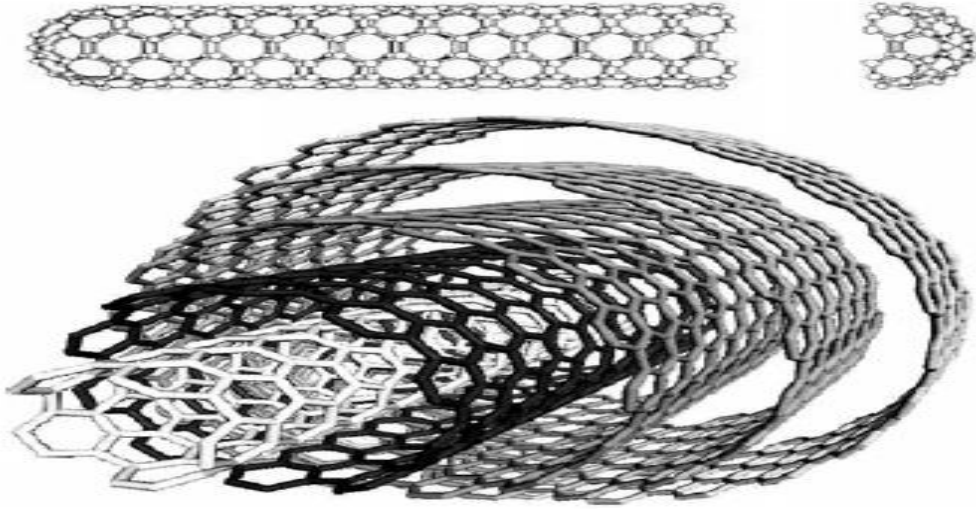


الشكل (25): يوضح فوليرين الكربون على شكل كرات.

#### 4.3\_2. 4. أنابيب الكربون النانوية : Nanotubes De Carbone

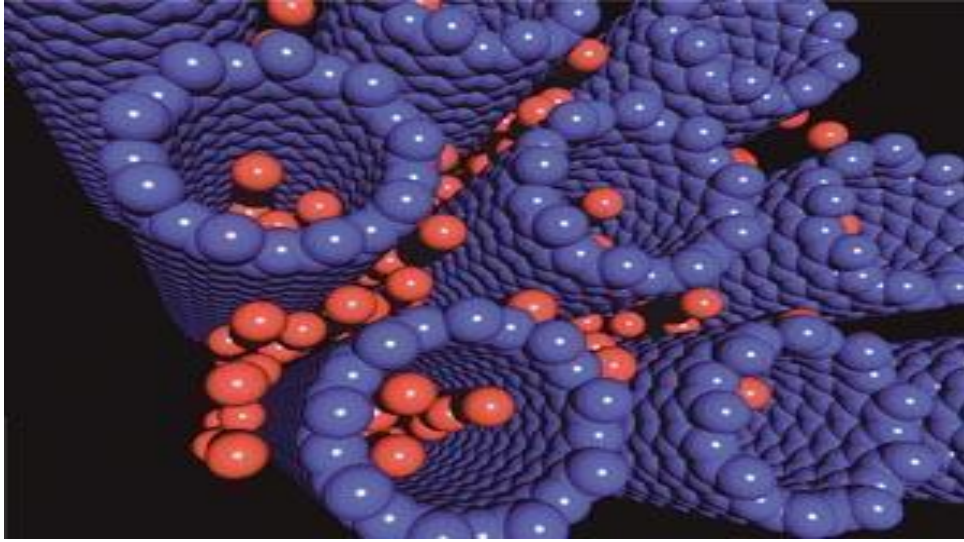
يعتمد تحلل جزيئات الغاز على سطح المادة الصلبة على قوى فان دير فالس، وحيث أن التفاعل ضعيف، فإن الامتصاص الفيزيائي العالي يلاحظ عند درجة حرارة منخفضة، وقد أجريت بحوث مكثفه خاصة في الأنابيب النانوية الكربونية، حيث أن الأنابيب الكربونية النانومترية هي هياكل اسطوانية ذات نهايات مفتوحة أو نهايات مغلقة، و يحتوي النطاق المغلق على طرف نصف كروي عند كل طرف، حيث أن هناك نوعان من الأنابيب النانوية الكربونية:

ـ الأنابيب النانوية متعددة الجدران و الأنابيب النانوية أحادية الجدار و تتكون الأنابيب أحادية الجدار من ورقة الجرافين المنفردة و تكون ملفوفة على شكل أسطوانة و يبلغ قطرها بضعت نانومترات (nm) ، أما بالنسبة الأنابيب الكربونية متعددة الجدار في عبارة عن عدة لفات محورية مشتركة من صفائح الجرافين حيث أن بين كل طبقة و طبقة أخرى حوالي (0.35 nm) ، و تحتاج هذه الأنابيب لنموها إلى وجود محفز مثل  $CO$  و  $Ni$  ، و عندما يتم تحضير أنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار فإنها تخرج على شكل نصف كروي، و من خلال التصوير المباشر في  $HRTEM$  و في أطياف ريمان، تعتبر هذه الأدوات الأكثر استخداما لوصف المجهرات الدقيقة للأنابيب النانوية الكربونية حيث يمتاز أحادي الجدار بتنظيم الذاتي عند تشكل الأنبوب النانوية و هو أكثر كثافة و بذلك يتم تشكيل العديد من الأنابيب أحادية الجدار و التي تكون متشابكة في ما بينها كما هو موضح في الشكل التالي : [79] [80]



الشكل (26): يوضح أنابيب الكربون النانوية ذات جدار واحد و متعددة الجدران.

و كما تعد تكنولوجيا الأنابيب النانوية الكربونية هي الاتجاه الجديد الذي يتم إتباعه في البحث عن وسائط تخزين الهيدروجين عالية السعة، و يمكن للأنابيب النانوية أحادية الجدار أو متعددة الجدران أن تكون نقية أو مخدرة عادة بمعادن قلوي، حيث تكون المسافة بين الجدران كبيرة بما يكفي لمرور جزيئات الهيدروجين دون تزايل مع الكربون و يمكن أن يؤدي ضغط هذه الحزمة إلى تقليل هذه المسافة و في هذه الحالة يمكن أن تصبح الروابط الكيميائية بين الجدار الداخلي و الهيدروجين ممكنة، و تكون هذه الرابطة المتكونة عن طريق الامتصاص الكيميائي أكثر قوة، و يمكن تطبيق قوة فان دير فالس لضم الأنابيب النانوية و ذلك لتشكيل مواقع يمكن فيها كثف الهيدروجين داخل الأنابيب النانوية، حيث يتم إطلاق الهيدروجين فقط عند التسخين في درجات حرارة أعلى من 400 درجة مئوية، إذا فإن أنابيب الكربون النانومترية هي أنابيب مجهرية من الكربون و التي تخزن الهيدروجين في المسام المجهرية على الأنابيب وداخل هياكل الأنابيب، و هناك العديد من الخيارات لتخزين الهيدروجين في الأنابيب النانوية الكربونية، حيث أن الأنابيب النانوية الكربونية هي هياكل مرتبطة بالفوليرين والتي تتكون من اسطوانات الجرافين المجهرية، كما توضح الشكل التالي : [81] [82]



الشكل (27): يوضح الامتصاص الأنابيب النانوية الكربونية للهيدروجين.

### 4.3\_2. 5. النانوية العضوية وغير العضوية : Nanoparticules Organique Et Non Organiques

إن الأنابيب النانوية الكربونية قد حظيت بقدر كبير من الاهتمام كمواد تخزين محتملة، ويوجد العديد من المواد النانوية الأخرى منها العضوية وغير العضوية فهي موجودة أيضًا حيث قام العالمين *Nath* و *Rao* بتقديم لمحة عامة عن الأنابيب النانوية غير العضوية ومكوناتها وقد تم التحقيق في العديد من هذه العوامل ولا سيما تلك المكونة من عناصر الخفيفة، بالنسبة لخواص الخاصة بتخزين الهيدروجين. بالإضافة إلى ذلك، تمت دراسة مواد أخرى تجريبيًا أو نظريًا لخصائص تخزين الهيدروجين، بما في ذلك أكسيد التيتانيوم ( $TiO_2$ )، كربون التنغستن ( $WC$ )، السليكون ( $C$ )، وكبريت السليكون ( $SC$ )، وعلى سبيل المثال، فإن قدره بعض الأنابيب النانوية المتعددة الجدران على الأنواع الأخرى لها إمكانية لتخزين كميات كبيرة من الهيدروجين. [83] [84] [85] [86]

### 5.3\_ توزيع الهيدروجين : Distribution D'hydrogène

من أجل استخدام الهيدروجين في محطات إعادة التزود بالوقود، فإنه إما يجب إحضاره إلى المحطة أو إنتاجه في الموقع، والإنتاج في الموقع عادة ما يكون مكلفًا جدًا نظرًا لكونه إنتاجًا صغيرًا وبالتالي بالنسبة لمعظم محطات التزود بالوقود العاملة اليوم، يتم إنتاج الهيدروجين في منشأة مركزية ومن ثم يتم توزيعها وفقًا للمتطلبات، و الطرق الرئيسية الثلاثة لتوزيع الهيدروجين الموجودة حاليًا هي:

5.3\_1. مقطورة الغاز : Les remorques

يتم ضغط الهيدروجين إلى ضغط معتدل من حوالي 200bar، وتخزينها في أوعية صغيرة ثم نقلها، حيث تقوم شركة (AGA) بنقل الهيدروجين إلى محطة التزويد بالوقود الهيدروجين باستخدام مقطورات الغاز و ذلك بتخزين الهيدروجين تحت 200bar في زجاجات 50L كما يوضح الشكل التالي :

200 Bars à 21°C

(0.9kg de H<sub>2</sub> → 50 litres)

الشكل 28- يوضح حاوية تخزين الهيدروجين ذات سعة 50L.

5.3\_2. ناقلة السوائل : Convoyeur De Fluide

يتم تمييع الهيدروجين وتخزينها في الأوعية المبردة، ومن ثم يتم نقلها في الناقلات المعتادة.

5.3\_3. خط أنابيب : Pipeline

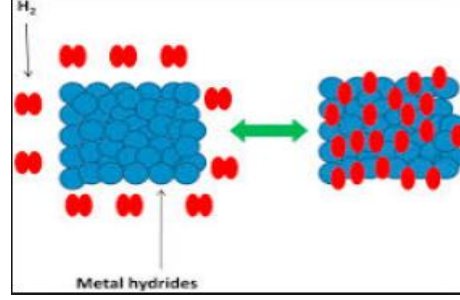
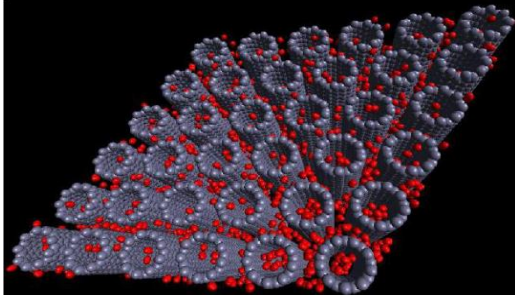
يتم نقل الهيدروجين عبر بنية تحتية لخطوط الأنابيب بطريقة مماثلة للغاز الطبيعي، كما يوضحه الشكل التالي :



الشكل 29- يوضح خطوط أنابيب لنقل.

سيكون نقل الهيدروجين باستخدام هيدريدات المعادن ميزة على هيدروجين مضغوط أو سائل، حيث أن التخزين الهيدروجين في الحالة الصلب يسمح بكثافة تخزين عالية و ذلك دون ضغط

مرتفع أو مخاطر تسرب الهيدروجين، ومع ذلك فإن هيدريدات المعادن ثقيلة تعتبر مكلفة للغاية، وهو ما يستبعدا حاليا كطريقة صالحة للتخزين على نطاق واسع، وتجري حاليا بحوث بشأن مواد تخزين أخرى مثل هيدريد المعادن الخفيفة، و البولييمرات، و المواد القائمة على الكربون كما يوضح الشكل التالي :



الشكل 31- يوضح المواد القائمة على الكربون.

الشكل 30- يوضح هيدريد المعدني.

- تختلف تكاليف التوزيع حسب كمية الهيدروجين التي يتم توزيعها، حيث أن نقل الهيدروجين السائل هو أرخص من بين الخيارات المذكورة على الرغم من أن تكاليف الإنتاج مرتفعة بشكل ملحوظ، و في الوقت الحاضر، الطريقة الأكثر شيوعًا هي التوزيع باستخدام مقطورات الغاز، و سيستمر هذا الاتجاه في السنوات القادمة، إذ لم يكن هناك اختراق كبير للتكنولوجيا في خفض تكاليف إنتاج الهيدروجين السائل، وبالتالي سوف تصبح الناقلات السائلة الخيار المفضل.
  - إن خطوط الأنابيب كطريقة توزيع لا تكون فعالة إلا على مسافات طويلة و أيضا عندما يتم التعامل مع كميات كبيرة من الهيدروجين، و يتم تدريجيا إدماج الهيدروجين في الاقتصاد و منه ستزداد كميات الهيدروجين المنتجة والمطلوبة و بالتالي في المستقبل يمكن بناء بنية تحتية مخصصة لخط أنابيب الهيدروجين وتجهيزها للتعامل مع كميات كبيرة من الهيدروجين. [87]
- [88].

### 6.3\_ وجهات النظر على التخزين و التوزيع للهيدروجين: perspectives sur la distribution et le stockage de l'hydrogène

على الرغم من التقدم في البحث والتطوير، يعد التخزين والتوزيع من بين العقبات الرئيسية لاقتصاد الهيدروجين، من وجهة نظر إستراتيجية وتكنولوجية وبالفعل فإن اختيار أسلوب التخزين والتوزيع أمر صعب للغاية لأن التقنيات المختلفة في المنافسة لها مزايا وعيوب. [52]

يبدو أن تخزين الهيدروجين المضغوط وتوزيعه يمثلان تقنية بسيطة نسبياً من وجهة نظر تنفيذ التخزين ولكنها مكلفة جدا للضغط ومعقدة من ناحية التوزيع، ومع ذلك، بالنسبة لتخزين

الصهاريج الصغيرة، يمكن أن يكون تخزين الضغط حلاً جيداً نسبياً ويستخدم بالفعل في بعض المركبات النموذجية.

تخزين وتوزيع الهيدروجين على شكل سائل أكثر تعقيداً لتنفيذ ويتطلب أيضاً الكثير من الطاقة للحفاظ على الهيدروجين في درجة حرارة أقل من 20K، إضافة إلى ذلك، فإن خسائر الهيدروجين الناجمة عن الخسائر الحرارية لا مفر منها، ومع ذلك، فإن الهيدروجين على شكل سائل لديه محتوى طاقي أعلى من الهيدروجين المضغوط. [52]

لا يزال تخزين الهيدروجين في المواد الصلبة في حالة من البحث والتطوير، له العديد من المزايا، ولا سيما بالنسبة للهيدريد المعادن التي نسبة التخزين في الخزان هو اعلي ثلاث مرات من الغاز مضغوط، ومع ذلك، فإن وزن الخزان بالنسبة إلى كتلة الهيدروجين المخزنة هائل ويعيق بشدة هذه التقنية للتطبيقات النقالة، بالإضافة إلى ذلك، لا تزال تكاليف المواد مرتفعة للغاية، وبالتالي فإن وضع التخزين هذا يكون مكلفاً جداً بشكل عام، و لا يزال هناك الكثير من الأبحاث الجارية في هذا المجال.

وفي الختام، النظر إلى الخسائر في التخزين والتوزيع، يبدو انه لكي يكون استخدام الهيدروجين مربحاً في كل المجالات، من الضروري قصر النقل على الحد الأقصى. ولذلك، فإنه من الضروري مضاعفه نقاط إنتاج الهيدروجين، والتحول إلى الإنتاج لا مركزي، وكذلك اختيار التوزيع بكميات كبيره عن طريق خطوط الأنابيب.

و من وجهه نظر التخزين، لا يزال الاستنتاج مختلطاً، لذلك من الصعب تحديد أفضل طريقة للتخزين، و يتم استخدام كل من التخزين السائل والغازي في جميع أنحاء العالم لمختلف التطبيقات الثابتة والمتنقلة. أما التخزين على شكل صلب مازال في حالة البحث والتطوير ولكنها واعدة للمستقبل، وأخيراً، من المؤكد أن العديد من الدراسات يجب أن تستمر في تحسين أنماط التخزين المختلفة واختيار أفضلها مع الأخذ في الاعتبار الآثار البيئية بالإضافة إلى الدورات الحياتية لوسائل التخزين والتوزيع. [52]

### 7.3. الملخص :

قمنا في هذا الفصل بتقديم طرق التخزين المختلفة المستعملة في تخزين الهيدروجين إضافة إلى ذكر الطرق و الآليات المستعملة في نقل الهيدروجين. رغم اختلاف طرق التخزين الهيدروجين إلا أنه لا يزال اختيار الطريقة الأنسب صعب، لأن تخزين في الحالة الصلبة مازال قيد البحث و التطور على خلاف الحالتين الغازية و السائلة.

و بالنسبة لطرق توزيع الهيدروجين فإنها تختلف من حالة لأخرى حسب الحالة توزيع بالنسبة للمسافات القريبة و الطويلة.

# الفصل الرابع:



**1.4. المقدمة:**

- تعرف المصادر الأحفورية بالمحدودية في مخزونها و استعمالها المفرط له عواقب خطيرة على الإنسانية في حين أن العودة للمصادر المتجددة لا تقاوم إذ أن هذه الأخيرة غير متوفرة زمنيا بانتظام و يمكن نعتها بالمصادر الطاقوية المتموقة أي أنه لا يمكن نقلها و لا تقييمها إلا في موقع توفرها كما هو الحال للأشعة الشمسية و الرياح و طاقة الأمواج , فتحويل هذه المصادر إلى كهرباء يمكن تقليص الفارق بين العرض و الطلب و لكن يبقى اللجوء إلى حامل الطاقة المرشح من طرف العلميين و الصناعيين وهو الهيدروجين لأبد منه و بما أن المصادر المتجددة و دائرة الهيدروجين من إنتاجه إلى استعماله لا يمثلان أي خطر على البيئة , و إنما يقدمان و بدون شك إمكانية الاستقلال الطاقة التدريجي من المصادر الأحفورية. أما بوصفه عنصرا كيميائيا فله استخدامات و تطبيقات متنوعة فمن الممكن أن تصنف استخداماته على النحو التالي:

**2.4\_ تطبيقات الهيدروجين: Applications de l'hydrogène:**

يمكن استخدام الهيدروجين في محركات الاحتراق الداخلي ومركبات خلايا الوقود، كما يمكنه أن يكون وسيلة فعالة لتخزين الطاقة من مصادر متجددة حيث تعتمد استخدامات الفرعية للهيدروجين اليوم على : [88]

- ✓ **الصناعة الكيميائية :** حيث يستخدم بكمية كبيرة في إنتاج الأمونيا (النشادر) هي تعتبر المادة الأولية في صناعة الأسمدة.
- ✓ **الصناعة الغذائية و الأدوية :** في هدرجة الزيوت و الدهون و مواد التجميل و غيرها.
- ✓ **الصناعة الببتروكيميائية :** تكرير النفط و إنتاج الميثانول و غيرها.
- ✓ **صناعة الإلكترونيات :** إنتاج أنصاف النواقل و الألياف البصرية و غيرها.
- ✓ له قدرة على **التوصيل الحراري** أعلى من أي غاز آخر.
- ✓ يستخدم في **وقود الصواريخ**.
- ✓ يستعمل في **تبريد المولدات الكهربائية** حيث يستخدم الهيدروجين كوسيط تبريد عالي الأداء.
- ✓ يستخدم في **المفاعلات النووي** كوقود نووي.
- ✓ استخدامه في **توليد الطاقة الحرارية** و ذلك بحرقه المباشر في المحطات الحرارية.
- ✓ يستخدم في **توليد الطاقة الكهربائية** بواسطة خلايا الوقود و التي تعد تقنية حديثة.

- و يقدر حاليا النسبة المستهلكة من الهيدروجين المنتج عالميا بحوالي 50% في إنتاج الأمونيا و 37% في تكرير النفط و 8% في إنتاج الميثانول و الباقي في الاستخدامات الأخرى. [89] [90] [91]

### 3.4 \_ استعمالات الهيدروجين: Utilisations d'hydrogène

يعتبر استخدام الهيدروجين مسألة مهمة في تنفيذ سياسة التنمية المستدامة، حيث يمكن أن يكون هو حلقة الربط بين اختلاف أنواع الطاقة و أيضا يمكن أن يكون بديلا للوقود الديزل أو بديل للغاز الطبيعي، ومنه فإن احتراق الهيدروجين في المحركات أو استخدامه في خلايا وقود لا يؤدي إلى أي انبعاثات غازية ملوثة. [92]

#### 3.4\_1. محركات الهيدروجين الحرارية: Moteurs thermiques à hydrogène

تعمل المحركات الحرارية، المعروفة بمحركات الاحتراق الداخلي، باحتراق غاز الفحم أو الغاز الطبيعي أو حتى المزيد من نواتج التقطير البترولية، و منه يمكن لجميع هذه المحركات القائمة علي الاحتراق أن تعمل بالهيدروجين لإنتاج الطاقة الميكانيكية، و إن قدرة هذه المحركات ذات الاحتراق الداخلي للهيدروجين عند عملها ينتج عنها انبعاثات منخفضة جدا من اكاسيد النيتروجين ( $NO_x$ )، و تعتبر اكاسيد النيتروجين هي الانبعاثات الوحيدة الغير المرغوب فيها من نواتج هذه المحركات. [93]

العديد من هذه المحركات الحرارية هي من نوع المكبس المتبادل، فهي تعمل وفقا لدورة اشتعال أوتو أو دورة ديزل، و من وجهة النظر الوحيدة للديناميكا الحرارية ، يمكن تحويل جميع هذه المحركات للعمل بالهيدروجين بما في ذلك تلك التي تعمل وفقاً لدورة الديزل. [94]

تعتبر محركات الاحتراق الداخلي للهيدروجين أكثر كفاءة بنسبة 20% من محركات البنزين ، ولكن مثل جميع المحركات الحرارية تكون محدودة بسبب كفاءة دورة كارنو. ويخضع محرك احتراق الهيدروجين الداخلي للصدمات ، وهذا راجع إلى الاشتعال الذاتي للوقود غير المحترق في "منطقه الغاز النهائية" ؛ ويمكن التغلب على هذا عن طريق تزامن الإشعال، وإن استخدام الهيدروجين في محرك احتراق داخلي سينتج بعض اكاسيد النيتروجين، حيث يجري حاليا العمل على تحديد طرق لتقليل انبعاثات اكاسيد النيتروجين من المحركات. [95] [96]

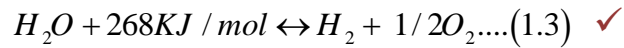
**3.4\_2. التوربينات: Turbines**

الهيدروجين يشبه الوقود التقليدي عند استخدامه في محرك التوربينات. ومع ذلك يمكن زيادة درجة الحرارة عند استخدام الهيدروجين و هذا سيؤدي إلى زيادة الكفاءة العامة، ومما يتميز بتقليل من انبعاث غازات الدفيئة التي يكون الملوث الوحيد فيها هو كميته صغيره من اكاسيد النيتروجين، و تعتبر تكنولوجيا التوربين أرخص من خلايا الوقود حالياً ويمكن استخدامها كتكنولوجيا انتقالية. [97]

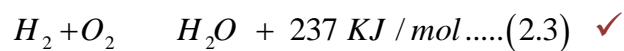
**3.4\_3. خلايا الوقود: Piles à combustible**

خلية الوقود هي جهاز كهروكيميائي يحول الطاقة الكيميائية الناتجة عن تفاعل وقود الهيدروجين مع أكسجين الهواء مباشرة إلى طاقة كهربائية ذات جهد منخفض بالإضافة إلى حرارة والماء، حيث تعتبر تقنية حديثة للتوليد المباشر للطاقة الكهربائية و بكفاءة عالية، و منه لا تختلف البنية الأساسية لخلية الوقود عن البنية الأساسية لأي خلية كهروكيميائية أخرى، فهي تتكون من : مصعد و مهبط يفصل بينهما عازل إلكتروني لمنع اختلاط الوقود و الأكسجين. [99] [98]

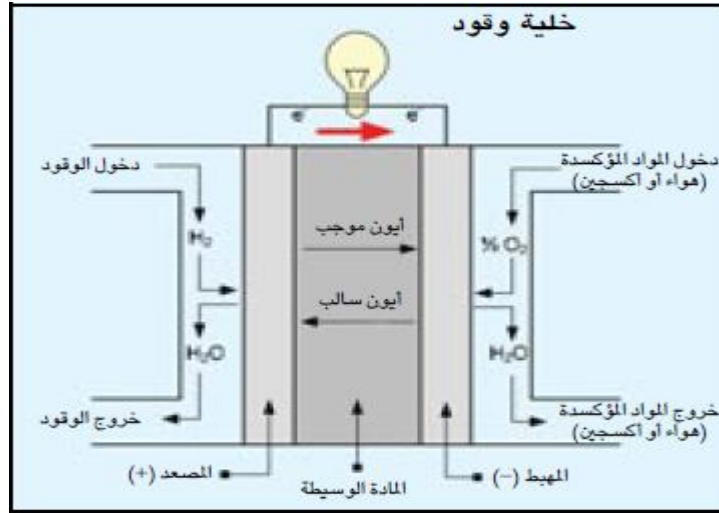
- أما عن مبدأ عملها فهو عكس مبدأ عمل التحليل الكهربائي للماء، حيث يقوم هذا الأخير بتحليل الماء إلى مركبتيه الأكسجين و الهيدروجين مع استهلاكه قدراً معيناً من الطاقة الكهربائية [99]



- بينما تقوم خلية الوقود بتركيب الماء من الهيدروجين و الأكسجين مع إنتاجه قدراً معيناً من الطاقة الكهربائية



و منه فإن خلية الوقود لها ناتج ثانوي و هو الماء النقي، و الذي يكون إما في حالته السائلة ماء ساخن أو بخار ماء، و ذلك حسب درجة حرارة عمل الخلية، كما يوضح الشكل التالي :



الشكل (32) : رسم تخطيطي لخلية الوقود.

\_ فخلال عملية التشغيل يتأكسد الوقود عند القطب السالب بوجود المادة المحفزة و تتحرر الالكترونات، وفي نفس الوقت يتم اختزال في القطب الموجب بوجود المادة المحفزة، فتنتقل الالكترونات المتحررة من القطب السالب إلى القطب الموجب عبر الدارة الكهربائية الخارجية و بذلك يتولد تيار كهربائي مباشرة، كما يمكن تحويله إلى تيار متردد لأداء مهام أخرى، و للحصول على قدرة كهربائية المطلوبة توضع أكثر من خلية وقود في إطار واحد على شكل مصفوفات، و منه عند عمل هذه الخلية فإنه تواجه بعض الانخفاض في مستوى أدائها و ذلك بسبب التآكل أو سبب تعطل بعض مكوناتها. [99]

### 3.4\_ 3. 1. أنواع الخلايا الوقود : Types de piles à combustible

تصنف خلايا الوقود تبعاً لنوع الوقود المستخدم إذ يمكن أن يكون الوقود هيدروجينياً نقياً أو غازات مشبعة بالهيدروجين أو أن يكون الوقود سائلاً أو غازاً أو باختلاف درجة حرارة التشغيل أو الوسط الكيميائي المستخدم، وهذه الاختلافات تجعل من استخدام بعض خلايا الوقود أمراً مناسباً في السيارات والحافلات بينما تعمل أنواع الخلايا الأخرى بشكل أفضل للاستخدامات غير المتحركة مثل توليد الطاقة، و منه فقد تم حتى الآن تطوير أكثر من تسعة أنواع من الخلايا حيث نذكر منها الأنواع الأكثر استخداماً و انتشاراً على المستوى العملي و التجاري : [98] [101]

- 1- خلايا الوقود ذات الغشاء البوليميري PEMFC .
- 2- خلايا الوقود القلوية AFC .
- 3- خلايا الوقود ذات الحمض الفسفوري PAFC .
- 4- خلايا الوقود ذات الكربونات المصهورة MCFC .

- 5- خلايا الوقود ذات أكسيد الصلب *SOFC* .
- وهناك عدة أنواع مازالت قيد التطوير مثل خلايا الميثانول المباشر *DMFC* ، خلايا الزنك / الهواء
  - *Z AFC* ، و خلايا الأكسيد الصلب العكوسة *RSOFC* ، و خلايا الحمض الصلب *SAFC* .
  - كما تصنف أيضا الخلايا الوقودية حسب درجة حرارة عملها، فهناك خلايا وقود ذات درجات الحرارة المنخفضة تصل حتى 200 درجة مئوية مثل: [101]
  - ✓ خلايا القلوية AFC .
  - ✓ خلايا الحمض الفسفوري PAFC .
  - ✓ خلايا الغشاء البوليميري PEMFC .
  - و خلايا الوقودية ذات درجات حرارة المرتفعة أعلى من 600 درجة مئوية مثل :
  - ✓ خلايا الكربونات المصهورة MCFC .
  - ✓ خلايا أكسيد الصلب SOFC .

### 3.4.3.1 - خلايا الوقود ذات الغشاء البوليميري PEMFC : Piles à combustible en polymère

تعد هذه الخلية من أفضل أنواع الخلايا الوقود و أصغرها حجما فيما يخص الطاقة الناتجة منها، هذا النوع من الخلايا الوقود هو الأكثر انتشارا في العالم، كما أنه يستخدم في العديد من المجالات و ذلك لنظر صغر حجمه و انخفاض درجة حرارة العمل فيه، و يستخدم في هذا النوع غشاء من مادة البوليمر التي تسمى نيفيون (*Nafion*) حيث يؤدي دور الوسيط، حيث يوضع هذا الغشاء بين القطبين من البلاتين المثقب، يتم هذا التفاعل تحت درجة حرارة منخفضة 80 درجة مئوية، و مع ذلك يحظى هذا النوع من الخلايا باهتمام حيث يزم استخدامه في وسائل المواصلات، إضافة إلى ذلك تعد الخلايا التي تستخدم الميثانول مباشرة كوقود هي أحد فروع هذا النوع من الخلايا. [100]

### 3.4.3.2 - خلايا الوقود القلوية AFC : Piles à combustible alcalines

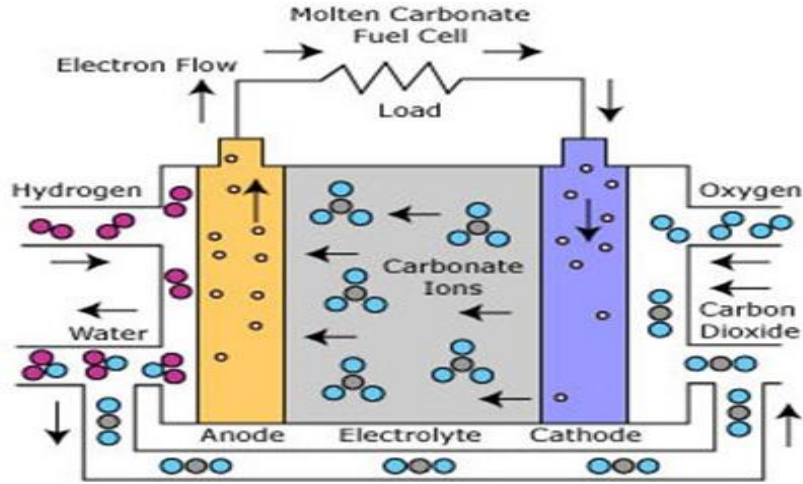
تستخدم الخلايا الوقود القلوية هيدروكسيد البوتاسيوم كمادة وسطية ، و تبلغ حرارة تشغيلها ما بين 65 إلى 120 درجة مئوية، و على الرغم من أنها تعد من أكثر الأنواع تطورا إلا أن ضعف تحملها لثاني أكسيد الكربون حتى و لو بنسبة قليلة يحد من استعمالها على النطاق الواسع ، لذا يفضل أن تعمل الخلايا القلوية في بيئة مخلقة كالفضاء الخارجي أو تحت الماء ، و ذلك لحسن أدائها و ارتفاع مردودها، في لهذه الأسباب لم ينتشر استخدام الخلايا القلوية في وسائل النقل و لا في التطبيقات الأرضية الأخرى، و إنما انحصر استخدامها في برامج الفضاء. [98]

### 3.4\_3.1.3 - خلايا الوقود ذات الحمض الفسفوري PAFC : Piles à combustible avec de l'acide phosphorique

تستخدم هذه الخلايا حمض الفسفور المركز كمادة وسطية، و تبلغ درجة حرارتها التشغيلية ما بين 150 إلى 200 درجة مئوية و تعد الأكثر تطورا و الأقرب للتسويق التجاري، حيث أنها تستخدم في بعض الغنادق و المستشفيات و يستفاد أيضا من حرارتها الناتجة في تطبيقات أخرى كتدفئة و تسخين المياه، و تمتاز هذه الخلايا حمض الفسفور بأن حرارتها التشغيلية أعلى من خلايا الوقود ذات الغشاء التبادل البروتون (PEMFC)، و بأنها أكثر تحملا لتلوث الوقود بأول أكسيد الكربون، ولكنها تحتاج إلى زيادة و استخدام مادة محفز كالبلاتين و هذا مما يحد من استخدامها في المركبات، لذا فإنه يقتصر استخدامها على المحيطات الأرضية لإنتاج طاقة. [98]

### 3.4\_4.1.3 - خلايا الوقود ذات الكربونات المصهورة MCFC : Piles à combustible avec carbonate fondu

تعتبر من أنواع خلايا الوقود ذات درجات الحرارة العالية حيث أن درجة حرارة العمل المرتفعة تسمح باستخدام الغاز الطبيعي كوقود مباشرة بدون الحاجة لاستخدام وحدة لمعالجة الغاز ويمكن استخدام وقود ذو طاقة حرارية منخفضة من المصانع ومصادر الوقود الأخرى، و تعمل خلايا الوقود MCFC بشكل مختلف تماما عن طريقة عمل بقية أنواع الخلايا الأخرى، حيث أنها تستخدم محلول مكون من خليط من الأملاح الكربونية المذابة كوسيط مثل كربونات الليثيوم مع كربونات البوتاسيوم أو مع كربونات الصوديوم، و لإذابة أملاح الكربونات والحصول على حركة ايونات عالية في المحلول لابد أن تعمل خلايا MCFC بدرجة حرارة عالية تتراوح ما بين 600 إلى 800 درجة مئوية، حيث المصعد هذه الخلية يكون مصنوع من النيكل أما بالنسبة للمهبط فيصنع من أكاسيد النيكل إضافة إلى ذلك لا يحتاج إلى محفزات و يكون مردودها مرتفع نسبيا، على عكس ذلك أنه يحتاج إلى تزويد الخلية بالكربونات بشكل دائم و عند بداية تفاعل يحتاج إلى درجة حرارة عالية اللازمة لصهر الكربونات، كما يمثل الشكل التالي: [101]



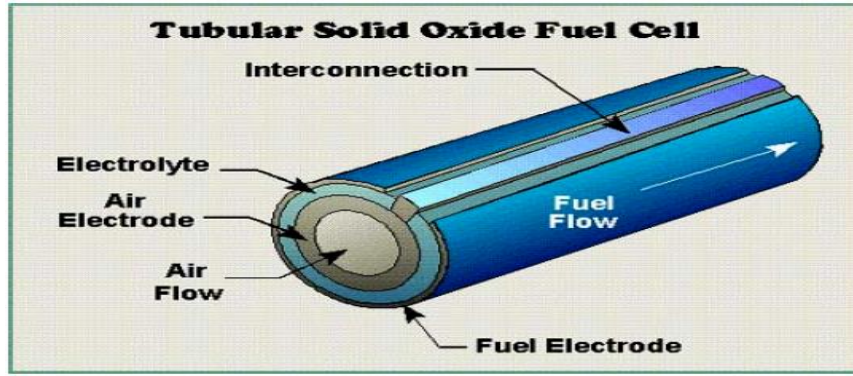
الشكل (33): يوضح نموذج لخلية وقود ذات الكربون المنصهر.

### 5.1.3\_3.4 خلايا الوقود ذات أكسيد الصلب SOFC : Piles à combustible à oxyde solide

خلية وقود الأكسيد الصلب (SOFC) هي حالياً خلية الوقود ذات أعلى درجة حرارة للتشغيل حيث أنها تعمل في مجال ما بين 600 إلى 1000 درجة مئوية، وتستخدم أنواع وقود مختلفة و يصمم هذا النوع من الخلايا بطريقتين إما بشكل مسطح أو اسطواني، و تتميز بقوة تحملها للشوائب الموجودة في الوقود باستثناء مادة الكبريت، و مع ذلك فإن مردود خلية وقود الأكسيد الصلب هو أفضل مردود مقارنة مع خلايا الوقود الأخرى ويكون حوالي 60% بالإضافة إلى أن درجة حرارة التشغيل العالية تسمح باستخدام خلايا الوقود هذه كنظام توليد مشترك حيث يمكن أن تولد بخاراً ذو درجة حرارة مرتفعة وضغط عالي يمكن أن يستخدم في العديد من التطبيقات. [101]

#### 1.5- التصميم الأنبوبي : Conception tubulaire

في هذا التصميم يتم صنع المصعد و المهبط بشكل أنبوبي متمحور بحيث يكون المهبط من الجهة الداخلية و المصعد من الجهة الخارجية و يفصل بينهما طبقة الكهرليت، و بهذا التصميم للخلية فإنها قادرة على فصل بين الوقود و الهواء، و لكنه يعاني من مشكلتين أساسيتين هما ارتفاع تكاليف تصنيع و انخفاض كثافة الاستطاعة، و يبين هذا الشكل مكونات الأساسية لهذا التصميم : [99]

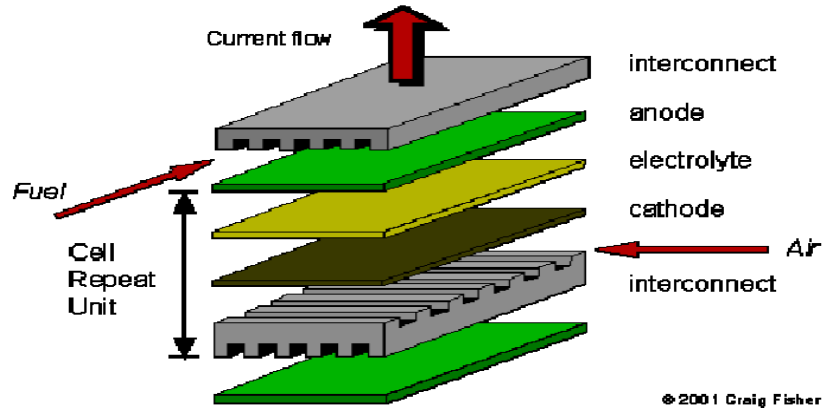


الشكل (34) : يوضح مكونات الأساسية لخلية SOFC بتصميم أنبوبي.

### 2.5- التصميم المستوي : Design plat

يتميز هذا التصميم لخلايا أكسيد الصلب ببساطة تصنيعه و تركيبه مما يسهل عملية التوصيل بين الأقطاب إضافة إلى تعدد السبل تمرير الغازات، والميزة الأهم هي انخفاض المقاومة الداخلية و هو الأمر الذي يتيح الحصول كثافة استطاعة أعلى مقارنة بالتصميم الأنبوبي، كما نلاحظ في الشكل

المكونات الأساسية لهذا التصميم [99]



الشكل (35) : يوضح المكونات الأساسية لخلية SOFC بتصميم المستوي.

### 3.4\_ 2.3 / مميزات خلايا الوقود : Caractéristiques de la pile à combustible

تتميز خلايا الوقود بالعديد من المزايا عن غيرها من المولدات الطاقة، نذكر منها : [102]

✓ لا يصدر عنها أي ملوثات، بل تكون كهرباء و مياه صالحة للشرب أيضا، فتعتبر مصدر نظيفا لطاقة.



- ✓ تعتبر آمنة جدا حيث أن تكنولوجيا الهيدروجين لا تحتوي على أية عناصر تسبب أخطار ممكنة.
- ✓ كفاءة تشغيل عالية جدا، لأنها تحول الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية بشكل مباشر مما لا يسبب أي ضياع في الطاقة.
- ✓ عند تشغيل خلية الوقود لا تصدر أي صوت.
- ✓ عملية صيانتها سهلة جدا و بسيطة، كما أنها تستمر لفترة طويلة.
- ✓ يمكن التحكم في حجمها حسب الطاقة الكهربائية التي تحتاجها للتشغيل.
- ✓ لا توجد أي أجزاء ميكانيكية.
- ✓ إمكانية إنتاج ماء صالح للشرب خلال تشغيلها.

#### 4.4\_ تطبيقات خلايا الوقود : Applications des piles à combustible

تعتبر التطبيقات العديدة باستخدام خلايا الوقود في مجال تحويل الطاقة من الميزات الإيجابية لهذه التقنية ،و يمكن استخدامها في مجال توليد الطاقة الكهربائية و مجال النقل أيضا و قد تم مؤخرا استخدامها في مجال الالكترونيات و هذا نظرا لطبيعة خلايا الوقود فإنه يمكن تركيبها على شكل مصفوفات و هذا من أجل استخدامها في التطبيقات الصغيرة.[98]

#### 4.4\_ 1. مجالات النقل : Zones de transport

في البداية بدأ استخدام خلايا الوقود في المركبات ذات الأحجام الكبيرة مثل الحافلات و ذلك لكبر حجم الخلية في بدايتها،و لكن مع التطور المستمر قل حجم الخلية الوقود لدرجة أنها تصلح في استخدام السيارات،و تعد الشركات إنتاج السيارات الكبرى في العالم من أكثر الجهات التي عل أبحاث الخلايا الوقود، حيث أنها أنتجت سيارة تعمل بخلايا الهيدروجين.[103]

#### 4.4\_ 2. مجالات الالكترونيات : Champs électroniques

تعتبر خلايا الوقود من أنسب مصادر الطاقة بالنسبة للأجهزة الإلكترونية،و ذلك لنظر صغر حجمها،و قدرتها على توليد كمية كبيرة من الطاقة الكهربائية بالنسبة إلى الحجم الصغير،كما عرضت شريكة العالمية موتورولا هاتف المحمول الذي يعمل بخلية وقود من خلال تزويد الهاتف بخزان وقود على شكل أنبوبة صغير تشبه أنبوبة قلم الحبر و التي يمكن أن تشغل الهاتف لفترة أطول. [103]

### 4.4-3/ في مجالات توليد الكهرباء : Dans les domaines de la production d'électricité

التوربينات الغازية هي التي تنتج الحركة الدورانية اللازمة لدوران المولد و بالتالي تولد كهرباء، و قد تم اكتشاف أنه يمكن بتزويد التوربينات الغازية بمجموعة مضغوطة من خلايا الوقود، فإن ذلك يساعد على توليد الكهرباء بجهد مرتفع نسبياً، و بالتالي تحسين كفاءة الكهرباء للمولد، حيث يستغل بخار الماء ذو درجات حرارة عالية في إدارة التوربينات البخارية. [104]

و بهذا يمكننا استخدام خلايا الوقود لتغذية المنازل و المستشفيات وكذلك المناطق السكنية البعيدة و الوعرة و التي يصعب معها إنشاء أبراج التوزيع لطبيعة هذا المكان. [103]

### 5.4 \_ مشاكل تواجه الخلية الهيدروجينية:

بعد أن تعرفنا على مزايا خلايا الوقود لابد و أن تسألنا عن عدم استخدامها بشكل واسع النطاق السبب يكمن في العديد من المشاكل التي اعترضت هذا المصدر من الطاقة.

كما علمنا أن خلايا الوقود تستخدم الأكسجين و الهيدروجين لإنتاج الكهرباء، و بتأمين هذين الغازين يمكننا الحصول على مصدر مستمر للطاقة و بالنسبة لغاز الأكسجين فيتم الحصول عليه من الهواء حيث يتم سحب الهواء إلى الكاثود لحصول على أكسجين مباشرة و لكن المشكلة الحقيقية تكمن في غاز الهيدروجين بسبب صعوبة تخزينه و ندرة وجوده حراً في الطبيعة فتكلفة الحصول على غاز الهيدروجين مرتفعة، وهذا مما يجعل النفط يتفوق على خلايا الهيدروجينية في التكلفة حيث أن المطلوب حتى تصبح خلية الوقود اقتصادية أن تكون تكلفتها أقل 200 مرة على ماهي عليه الآن. [105]

### 6.4 \_ تعليمات الأمان للهيدروجين: Consignes De Sécurité Pour L'hydrogène

تعتبر تعليمات الأمان التي تعطيها وكالة NASA و هي أكثر هيئة تستخدم الهيدروجين في العالم أساساً في الوقاية من أخطاره:

✓ إن الهيدروجين يشتعل بلهب غير مرئي ذو درجة حرارة عالية لذلك يجب الحذر الشديد من أن يمس الجلد، و أبسط طرق الكشف عنه عند الشك بوجوده هو استخدام مكنسة من القش ذات ذراع طويلة لنتفحص بها مكان التسرب.

- ✓ إن الهيدروجين السائل و بسبب الحرارة المنخفضة جداً له يؤدي إلى حدوث ما يسمى بالحرق البارد و هو أشد تأثيراً من الحرق المعروف و يؤدي إلى حدوث وذمة تتضخم بشكل كبير و سريع ، و علاجها سهل من الطيب و لكن شريطة أن لا يمسه المصاب بتاتاً .
- ✓ إن الهيدروجين من أكثر العناصر نفوذاً على الإطلاق لذلك يجب ارتداء الملابس الواقية و القفازات و واقيات الوجه عند عمليات التعبئة و التفريغ أو عند صيانة الشبكة و الصمامات و عند فك كل ما يمر به الهيدروجين.
- ✓ استنشاق الهيدروجين خطير يسبب حرقاً في الجهاز التنفسي. و بالتالي نجد ضرورة الحذر عند التعامل مع الهيدروجين مع العلم أن الالتزام التام بتعليمات الأمان يضمن بشكل كامل سلامة الشخص فالهيدروجين عنصر أمين بمدى إدراكنا لكيفية التعامل معه.

#### 7.4. الملخص:

تحدثنا في هذا الفصل على الاستخدامات الهيدروجين و المجالات التي يمكن أن تستخدم الهيدروجين و ذلك عن طريق الاستخدام المباشر أو الاستخدام الغير المباشر، إضافة إلى التعرف على خلايا الوقود و أنواعها.

### الاستنتاجات:

في هدي الدراسة تم وصف و تحليل لتقنيات مختلفة لإنتاج واستخدام وتوزيع وتخزين الهيدروجين، إذا نظرنا فقط من وجهة نظر الاستخدام، يبدو أن الهيدروجين هو الحل المعجزة للخروج من أزمة الطاقة والبيئة الحالية، لذلك يبدو الهيدروجين مثاليًا، ولكن هذه الرؤية مبسطة للغاية ولا تأخذ في الاعتبار الصعوبات المختلفة التي تتعلق بالإنتاج والتخزين والتوزيع والاستخدام.

- إن من أفضل الطرق الواعدة لتوفير طاقة نظيفة محلية خالية من الكربون، هي طريقة التحليل الكهربائي التي تكمن بإنتاج الطاقة الكهربائية من تقنيات الشمسية و الريحية.
- يتم استخدام التخزين الهيدروجين حاليا على شكل السائل والغازي، أما التخزين على شكل صلب مازال في حالة البحث والتطوير ولكنها واعدة للمستقبل، و منه من الصعب تحديد أفضل طريقة للتخزين، و بالنسبة لطرق توزيع الهيدروجين فإنها تختلف من حالة لأخرى.

للهدروجين تطبيقات عديدة و مختلفة حيث يمكن يدخل في مركبات استخدمه مباشرة في محركات ذات الاحتراق الداخلي أما الاستخدام الغير مباشر يخص خلايا الوقود الهيدروجين، كما يمكنه أن يكون وسيلة فعالة لتخزين الطاقة من مصادر متجددة حيث تعتمد استخدامات الفرعية للهيدروجين اليوم في صناعات مختلفة.

**Bibliographie:**

- [1]. The Feynman lectures on physics; volume1.U.S.A: Addison Wesley.
- [2]. Robert Gasch, jochen Twele (ed.), wind power plants.fundamentals, design, construction and operation, springer2012. ISBN 978-3-642-22937.
- [3]. World Nuclear Association.Another drop in nuclear generation World Nuclear News, 05 May 2010. Waybachch.
- [4]. مصادر\_الطاقة &Oid=72277 <https://ar.wikibooks.org/w/index.php?title=>
- [5]. التقرير السنوي عن الفحم الحجري 2007، صفحة 50.
- [6]. التقرير السنوي للجمعية الألمانية للفحم الحجري
- [http://www.gvst.de/site/steinkohle/pdf/2007\\_Annual\\_Report.pdf](http://www.gvst.de/site/steinkohle/pdf/2007_Annual_Report.pdf)
- [7]. مصادر الطاقة النظيفة .الكاتب وهيب عيسى الناصر و حنان مبارك البوقلاسة ص34.
- [8]. مميزات و عيوب الطاقة المدية /mawdoo3.Com.
- [9]. معاجم لبنان ناشرون.
- [10]. مجلة " دويتشلاند " أون لاين النسخة العربية.
- [11]. <https://www.almrsal.com/post/451773.4>
- [12]. صحيفة الشروق الأوسط.
- [13]. موقع موضوع كوم .مقال آلا جابر 8 فيفري 2018.
- [14]. الطاقة الشمسية –إيجابيات و سلبيات /www.alghad.com/m/articels/875405/
- [16]. موقع العلوم الخفيفة.
- [15]. Biomasse.
- [16]. IEA Bioenergy.
- [17]. Pudukudy M., Yaakob Z., Mohammad M., Narayanan B., Sopian K. Renewable hydrogen economy in Asia–Opportunities and challenges: an overview. Renew Sustain Energy Rev, 2014; 30, 43–757.
- [18]. Cau G., Cocco D., Petrollese M., Knudsen S., Milan C. Energy management
- [19]. strategy based on short-term generation scheduling for a renewable microgrid using a
- [20]. hydrogen storage system. Energy Conversion and Management, 2014; 87, 820–831.
- [21]. H. Derbal , M. Belhamel et A. M’Raoui, “ L’hydrogène, vecteur énergétique Solaire“, revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen (2007) 235
- [22]. Dufoix Mathieu, Mastrangelo Jean-François, Val mage François, “Quelle place Pour l’hydrogène dans les systèmes énergétiques“, Atelier Changement Climatique, 2003-2004.
- [23]. Mounir Sahli, “Etude de la production d’hydrogène et pile à combustible», Magister en physique option : Energies Renouvelables, Année Académique 2009-2010.
- [24]. J.P. JONCHÈRE – Mémento de l’hydrogène : fiche 3.1.1 – octobre 2003 - Association Française de l’Hydrogène : <http://www.afh2.org/>

- [25]. G. BOURBONNEUX, Chapitre « Production d'hydrogène » dans « Procédés de transformation » par P. LEPRINCE, Technip, 1998.
- [26]. Andresen K. « Hydrogen production by electrolysis » Hydrogen Power: Theoretical
- [27]. DARKRIM-LAMARI (Chargée de recherche au CNRS) et P. MALBRUNOT (Directeur du comité technique à l'AFH2) – Techniques de l'ingénieur : article BE8565 et BE8566 : Combustible hydrogène : Production et utilisation – 2006
- [28]. Association Energies Solidaires, «Le futur : l'H2 l'Hydrogène ?». Dossier Thématique – Parc des- Vignes – 27 rue Panhard Levassor 78570 Chante loup-les-Vignes Courrier ES n°20 – Septembre 2006.
- [29]. ALPHEA HYDROGÈNE – Veille thématique n°2 – Bulletin mensuel sur un sujet thématique lié à l'hydrogène et ses applications : Production d'hydrogène – avril 2006 - Association Lorraine pour la Promotion de l'Hydrogène Et de ses Applications (A.L.P.H.E.A.) : [www.alphea.com](http://www.alphea.com)
- [30]. L. Schlapbach, A. Züttel: “Hydrogen-storage materials for mobile applications”, Nature, 414 (15 Nov. 2001), p. 353-357
- [31]. F. WERKOFF (CEA) – Mémento de l'hydrogène : fiche 3.2.2 – mars 2007 - Association Française de l'Hydrogène : <http://www.afh2.org/>
- [32]. TH. ALLEAU – Mémento de l'hydrogène : fiche 3.2.3 – mars 2007 - Association Française de l'Hydrogène : <http://www.afh2.org/>
- [33]. The Online Bookshop  
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/hydrogen.pdf>
- [34]. A. Pettinau, F. Ferrara, C. Amorino, “CO2-free hydrogen production in a coal Gasification pilot plant“. 1st International Conference on Sustainable Fossil Fuels for Future énergy, S4FE 2009.
- [35]. GÉRARD CLAUDET (CEA) – Mémento de l'hydrogène : fiche 3.3.1 – octobre 2003 - Association Française de l'Hydrogène : <http://www.afh2.org/>
- [37]. Wired-Mutant Algae Is Hydrogen Factory .
- [38]. كتاب تكنولوجيايات الطاقة البديلة – تأليف د. يوسف سعود عياش .
- [39]. [http://www.science.org.au/nova/newscientist/111ns\\_002.htm](http://www.science.org.au/nova/newscientist/111ns_002.htm).
- [40]. ALPHEA HYDROGÈNE – Veille thématique n°2 – Bulletin mensuel sur un sujet thématique lié à l'hydrogène et ses applications : Production d'hydrogène – avril 2006 - Association Lorraine pour la Promotion de l'Hydrogène Et de ses Applications (A.L.P.H.E.A.) : [www.alphea.com](http://www.alphea.com)
- [41]. Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) : revue Clefs CEA n°50/51 : L'hydrogène, les nouvelles technologies de l'énergie : Hiver 2004-2005 – <http://www.cea.fr/>
- [42]. J. Labbé, L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés, Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole des Mines de Paris Spécialité —Énergétique, 2006
- [43]. Hashimoto A and al., Development of PEM water electrolysis type hydrogen production system for WE-NET, proceedings of 14th WHEC, Montreal, 2002.
- [44]. Kauranen P.S, Lund P.D, Vanhanen J.P, Development of a self-sufficient solar hydrogen energy system, International Journal of Hydrogen Energy, 1994, Vol. 19, p. 99-106.

- [45]. Dufoix Mathieu, Mastrangelo Jean-François, Valmage François, "Quelle place pour l'hydrogène dans les systèmes énergétiques", Atelier Changement Climatique, 2003-2004.
- [46]. Ram B. Gupta, "Hydrogen fuel production, transport, and storage", CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742, International Standard Book Number, 13: 978-1-4200-4575-8) (Hardcover.
- [47]. WYLD GROUP PTY LTD. Hydrogen Technology Roadmap, Australian, 2008. Persistence Market Research "Hydrogen Market - Global Study on Hydrogen"
- [48]. New York City, 2014. N. Lymberopoulos, "Hydrogen Production from Renewables," Center for Renewable Energy Sources (C.R.E.S), Pikerimi Attiki, Project Technical Assistant.
- [49]. Framework Contract EESD Contract No: NNE5-PTA-2002-003/1, September 2005. "Technology Brief: Analysis of Current-Day Commercial Electrolyzers,"
- [50]. NREL, Golden, CO NREL/FS-560-36705, September 2004. P. Hoffman, "Tomorrow's Energy - Hydrogen, Fuel Cells, and the Prospects for
- [51]. a Cleaner Planet," The MIT Press, 2001. R. Foster, R. Tison, and W. Escher, "Solar/Hydrogen Systems for the 1985-
- [52]. 2000 Time Frame," Final Report Jet Propulsion Laboratory, June 1980.
- [53]. Tishreen University Journal. Eng. Sciences Series 2016) (المجلد الهندسية العلوم (العدد) 4 4  
تشرين جامعة مجلة □ □
- [54]. Rachid BENCHRIFA, Abdelaziz BENNOUNA et Driss ZEJLI : Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique Unité technologies économies des énergies renouvelables (Algérie) – Rôle de l'hydrogène dans le stockage de l'électricité à base des énergies renouvelables – Octobre 2007
- [55]. Fondation pour l'appui technologique canadien au développement durable du Canada – Rapport d'investissement du développement durable : Carburant renouvelable – hydrogène Analyse d'investissement – Version 1 : novembre 2006
- [56]. Benjamin DESSUS (Global Chance) – Petit mémento des énergies renouvelables : Éléments pour un débat sur les énergies renouvelables en France – Septembre 2007.
- [57]. T. Riis, E. F. Hagen, P. J. Vie and Ø. Ulleberg, "Hydrogen Production & Storage - R&D Priorities and Gaps," International Energy Agency, 2006.
- [58]. S. Franzky, "High-pressure 825 bar hydrogen storage," Fuel Cells Bulletin, vol. 2002, no. 9, pp. 9-10, 2002.
- [59]. E. Tzimas, C. Filiou, S. d. Peteves and J.-b. Veyret, "Hydrogen Storage: State-Of the-Art and Future Perspective," European Commission, Joint Research Centre, 2003.
- [60]. Hydrogen CARS NOW," [Online]. Available: <http://www.hydrogencarsnow.com/index.php/hydrogen-fuel-tanks/>. [Accessed 4th April 2017.
- [61]. L. Schlapbach, A. Züttel: "Hydrogen-storage materials for mobile applications", Nature, 414 (15 Nov. 2001.
- [62]. E. Tzimas, C. Filiou, S. d. Peteves and J.-b. Veyret, "Hydrogen Storage: State-Of The-Art and Future Perspective," European Commission, Joint Research Centre, 2003.

- [63]. B. Sakintuna, F. L. Darkrim and M. Hirscher, "Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 32, pp. 1121-1140, 2007.
- [64]. Dinger, G.P. 1988. Hydrogen: The ultimate fuel and energy carrier. *J Chem Educ* 65:688–691.
- [65]. Dinger, G.P. 1988. Hydrogen: The ultimate fuel and energy carrier. *J Chem Educ* 65:688–691.
- [66]. Source: Autrey et al, DOE EERE Program Review, 20045.
- [67]. Bogdanovic´ B, Schwickardi M (1997) Ti-doped alkali metal aluminium hydrides as Potential novel reversible hydrogen storage materials. *J Alloy Compd* 253–254:1–9.
- [68]. Bogdanovic, B.; Reiser, A.; Schlichte, K.; Spliethoff, B. & Tesche, B. (2002) Thermodynamics and dynamics of the Mg–Fe–H system and its potential for thermochemical thermal Energy storage, *J Alloys Compds* 345, pp. 77-89 .
- [69]. Jensen C, Yang Y, Chou MY (2008) Alanates as hydrogen storage materials. In: Walker G (ed) *Solid-state hydrogen storage: materials and chemistry*. Woodhead Publishing, Cambridge.
- [70]. Lohstroh W, Fichtner M, Breitung W (2009) Complex hydrides as solid storage materials: First safety tests. *Int J Hydrogen Energy* 34:5981–5985. Orimo S, Nakamori Y, Eliseo JR, Züttel A, Jensen CM (2007) Complex hydrides for Hydrogen storage. *Chem Rev* 107:4111–4132.
- [71]. Orimo S, Nakamori Y, Eliseo JR, Züttel A, Jensen CM (2007) Complex hydrides for hydrogen storage. *Chem Rev* 107:4111–4132.
- [72]. Züttel A, Rentsch S, Fischer P, Wenger P, Sudan Mauron P, Emmenegger C (2003) Hydrogen storage properties of LiBH<sub>4</sub>. *J Alloy Compd* 356–357:515–520.
- [73]. D. Chandra, J. J. Reilly and R. Chellapa, "Metal Hydrides for Vehicular Applications: The State of the Art," *Journal of Materials*, no. February, pp. 26-32, 2006.
- [74]. M. V. Lototsky, V. A. Yartys, B. G. Pollet and R. C. Bowman Jr., "Metal hydride hydrogen compressors: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 39, pp. 5818-5851, 2014.
- [75]. Yürüm Y, Taralp A, Veziroglu TN (2009) Storage of hydrogen in nanostructured carbon Materials. *Int J Hydrogen Energy* 34:3784–3798.
- [76]. Rzepka M, Lamp P, de la Casa-Lillo MA (1998) Physisorption of hydrogen on microporous Carbon and carbon nanotubes. *J Phys Chem B* 102:10894–10898.
- [77]. Jordá-Beneyto M, Suárez-García F, Lozano-Castelló D, Cazorla-Amorós D, Linares-Solano (2007) Hydrogen storage on chemically activated carbons and carbon nanomaterials at High pressures. *Carbon* 45:293–303.
- [78]. Fan, Y.-Y., Liao, B., Liu, M., Wei, Y.-L. Liu, M.-Q., Cheng, H.-M. 1999. Hydrogen uptake in vapor grown carbon nanofibers. *Carbon* 37:1649–1652.
- [79]. J. Miyamoto, Y. Hattori, D. Noguchi, H. Tanaka, T. Ohba, S. Utsumi, H.
- [80]. Kanoh, Y.A. Kim, H. Muramatsu, T. Hayashi, M. Endo, K. Kaneko, "Efficient H<sub>2</sub> adsorption by nanopores of highpurity Double-walled carbon nanotubes." *J. Am. Chem. Soc.*, 128 (2006) 12636 – 12637.



- [81]. image [Mutli-walled carbon nanotube]. Université Libre de Bruxelles. 7 June 2007  
[http://www.ulb.ac.be/sciences/cpmct/MWNT\\_oblique.gif](http://www.ulb.ac.be/sciences/cpmct/MWNT_oblique.gif)
- [82]. Y. Ren, D.L. Price, "Neutron scattering study of H<sub>2</sub> adsorption in single-walled carbon nanotubes." *Appl. Phys. Lett.*, 79 (22) (2001) 3684 – 3487.
- [83]. Digital image [Carbon nanotubes]. University of Karlsruhe Germany. 7 June 2007.  
<http://www.ipc.uni-karlsruhe.de/mik/download/nt1.jpg>
- [84]. Rao CNR, Nath M (2003) *Inorganic nanotubes*. Dalton Trans 1-24.
- [85]. Pan H, Feng YP, Lin J (2007) Hydrogen adsorption by tungsten carbide nanotubes. *Appl Phys Lett* 90:22310.
- [86]. Lan J, Cheng D, Cao D, Wang W (2008) Silicon nanotubes as a promising candidate for hydrogen storage: from the first principle calculations to Grand Canonical Monte Carlo simulations. *J Phys Chem C* 112:5598–5604.
- [87]. Mpourmpakis G, Froudakis GE, Lithoxoos GP, Samios J (2006) SiC nanotubes: a novel material for hydrogen storage. *Nano Lett* 6(8):1581–1583.
- [88]. D. Simbeck and E. Chang, "Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways -Scoping Analysis," National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2002.
- [89]. <http://www.h2wales.org.uk/documents/4.html>
- [90]. [www.hnei.hawaii.edu>sites>filesxlink.rsc.org>journals>GreenChemistry](http://www.hnei.hawaii.edu/sites/filesxlink.rsc.org/journals/GreenChemistry)
- [91]. [www.hydrogen.energy.gov>enduse](http://www.hydrogen.energy.gov/enduse)
- [92]. S.Srinivasan and J.Ogden *Hydrogen: The Ideal Fuel* plenum press 2005
- [93]. DARKRIM-LAMARI (Chargée de recherche au CNRS) et P. MALBRUNOT (Directeur du comité technique à l'AFH2) – Techniques de l'ingénieur : article BE8565 et BE8566 : Combustible hydrogène : Production et utilisation – 2006
- [94]. R. MOSDALE (Docteur-ingénieur en électrochimie – Chercheur au Laboratoire Hydrogène et Pile à combustible Commissariat à l'énergie atomique-Grenoble) – Techniques de l'ingénieur : article D5570 : Transport électrique routier : Véhicules électriques à pile à combustible – mai 2003
- [95]. AFH2 – Mémento de l'hydrogène : fiche 5.1.1 – mars 2007 - Association Française de l'Hydrogène : <http://www.afh2.org/>
- [96]. Kruse, B, Grinna, S, and Buch,C., (2002) *Hydrogen – Status og Muligneter*, Bellona rapport nt.6-2002 ISBN 82- 92318-0504. or [online] Available from: [http://www.bellona.no/en/energy/hydrogen/report\\_6-2002/index.html](http://www.bellona.no/en/energy/hydrogen/report_6-2002/index.html) Accessed 19 May 2003.
- [97]. Li, H and Karim, G (2004) Knock in spark ignition engines. *International Journal of Hydrogen Energy*.29 859-865. Elsevier Science Ltd.
- [98]. Lakeman, J.B., and Browning, D.J., (2001) *Global Status of Hydrogen Research* London: DTI, ETSU F/03/00239/REP. (98)  
<http://masder.kfnl.gov.sa/bitstream/123456789/23031/2/KACSTMSC79NA08.pdf?1ocale=ar>
- [99]. [https://www.researchgate.net/profile/Yasser\\_Diab4/publication/265599746\\_Electric\\_energy\\_storage\\_courses\\_and\\_exercises/links/54804d8c0cf250f1edc01ac6/Electric-energy-storage-courses-and-exercises.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Yasser_Diab4/publication/265599746_Electric_energy_storage_courses_and_exercises/links/54804d8c0cf250f1edc01ac6/Electric-energy-storage-courses-and-exercises.pdf)
- [100]. *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies: Rev 0, December 2001*

- [101]. <http://www.fnrtop.com/vb/showthread.php?t=878088>
- [102]. [http://mawdoo3.com/%D8%A8%D8%AD%D8%AB\\_%D8%B9%D9%86\\_%D8%AE%D9%84%D8%A7%D9%8A%D8%A7\\_%D8%A7%D9%84%D9%88%D9%82%D9%88%D8%AF](http://mawdoo3.com/%D8%A8%D8%AD%D8%AB_%D8%B9%D9%86_%D8%AE%D9%84%D8%A7%D9%8A%D8%A7_%D8%A7%D9%84%D9%88%D9%82%D9%88%D8%AF)
- [103]. [http://www.saadawi1.net/index.php?view=topics&action=topic\\_art&id\\_art=98](http://www.saadawi1.net/index.php?view=topics&action=topic_art&id_art=98)
- [104]. <http://kawngroup.com/fuel-cells/>
- [105]. الهيدروجين وقود المستقبل . إشراف الأستاذ لؤي حمزة 2015/2014