

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عمار ثاويجي بالأغواط

UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI-LAGHOUAT

كلية التكنولوجيا

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

قسم الهندسة الميكانيكية

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Support de cours pour les étudiants

1^{ère} année master énergétique, énergie renouvelable
—Semestre 2—

Production et stockage d'énergie

Préparé par:

Dr. REGUE Hanane Maria

AVANT-PROPOS

Ce polycopié est destiné à être utilisé comme un manuel par les étudiants en première année master énergétique et énergie renouvelable dans le domaine de production, transport et stockage d'énergie. Il a été rédigé dans le but de permettre d'avoir un outil de travail et de référence recouvrant les connaissances qui leur sont demandées. Le manuscrit est constitué de cours, il est conforme aux programmes agréés par le ministère. Son contenu résulte de la lecture de nombreux ouvrages et documents dont les plus importants sont cités dans les références bibliographiques. L'énergie n'a d'intérêt que si on peut l'utiliser. Pour cela, il faut des dispositifs permettant d'une part d'acheminer l'énergie primaire vers les consommateurs et d'autre part, de la transformer et de la stocker (avec le meilleur rendement possible) en une forme directement utilisable par le consommateur. En effet, les ressources énergétiques ne se situent généralement pas dans les régions à forte consommation (pour le pétrole et le gaz par exemple) et la consommation d'énergie n'est pas la même selon la saison et l'heure de la journée (pour l'électricité par exemple). De fait, la capacité d'une énergie à être transportée et stockée facilement, et à un coût acceptable, influe sur sa consommation. Ainsi, la relative facilité de stocker et aussi de transporter sur de grandes distances le charbon, le pétrole et le gaz a été l'un des facteurs primordiaux du développement de l'industrie depuis deux siècles. Par ailleurs, la commodité d'utilisation et la compétitivité économique de l'électricité ont permis à ce vecteur énergétique de s'imposer dans le secteur résidentiel et tertiaire, et d'obtenir une place importante dans l'industrie. Aujourd'hui, le stockage demeure néanmoins encore un point faible du domaine énergétique notamment pour les sources intermittentes qui ne sont pas raccordées au réseau (photovoltaïque, éolien).

En tenant compte de la nature de cette matière, de l'aspect pédagogique et du programme officielle, j'ai pensé qu'il est utile d'organiser ce polycopié en trois chapitres de développement assez inégaux. Le premier chapitre comprend Différents formes d'énergie, Le second chapitre est consacré à **Gestion de l'énergie : (production, transformation, transport et stockage)**, **Transport de l'énergie est présentée en détails** dans le troisième chapitre

Table des matières

Liste des figures	5
Liste des tableaux	6
Chapitre IV : Production et Transport de l'énergie électrique.....	7
IV.1 Introduction :	7
IV.2 Définitions :	7
IV.3 Appel de puissance d'un réseau :	8
IV.4 Modes de production de l'énergie électrique :	9
IV.5 Centrale thermique :	9
IV.5.1 Introduction	9
IV.5.2 Définition et principe de fonctionnement :	11
IV.5.3 Types de centrales thermiques :	12
IV.5.3.1 Les centrales à turbine à vapeur :	12
IV.5.3.2 Les centrales à turbine à combustible :	13
IV.5.3.3 Les centrales à cycle combiné au gaz naturel :	14
IV.5.4 Les avantages et les inconvénients des centrales thermiques :	15
IV.6 Centrale nucléaire :	15
IV.6.3 Avantages et inconvénients :	19
IV.7 Centrale hydraulique :	19
IV.7.1 Introduction :	19
IV.7.2 Principe de fonctionnement :	20
IV.7.2.1 Puissance disponible :	20
IV.7.2.2 Différentes centrales hydrauliques :	21
IV.7.2.3 Parties principales d'une centrale hydraulique :	23
IV.7.3 Avantages et inconvénients :	24
IV.8 Energie éolienne :	25
IV.8.1 Introduction :	25
IV.8.3 Fonctionnement d'une éolienne :	27
IV.8.4 Avantages et inconvénients de l'éolienne a axe vertical :	27
IV.8.5 Avantages et inconvénients de l'éolienne a axe horizontal :	28
IV.8.6 Fonctionnement d'une éolienne :	28
IV.8.7 Avantages et inconvénients :	30

IV.9	Energie de la biomasse :	30
IV.9.1	Introduction :	30
IV.9.2	Principe de fonctionnement :	31
IV.9.3	Avantages et inconvénients :	33
IV.10	L'énergie de la géothermie :	34
IV.10.1	Introduction :	34
IV.10.2	Principe de fonctionnement :	35
IV.10.3	Avantages et inconvénients :	37
IV.12	L'énergie solaire :	38
IV.11.1	Introduction :	38
IV.11.2	Principe de fonctionnement :	39
IV.11.3	Technologie :	40
IV.11.3.1	Cellule photovoltaïque :	40
IV.11.3.2	Technologie de capteurs :	41
IV.11.4	Comparaison des trois principales technologies de capteurs :	42
IV.11.4	Avantages et inconvénients :	42
Chapitre V: Stockage de l'énergie		44
IV.1	Introduction :	44
V.2	Intérêt :	44
V.3	Efficacité énergétique d'un stockage d'énergie	45
V.4	Formes de stockage d'énergie	50
V.4.1	Stockage mécanique :	51
V.4.1.1	Stockage gravitaire :	51
V.4.1.2	Stockage inertiel (volant d'inertie) :	53
V.4.1.3	Air comprimé	56
V.4.2	Stockage électrochimique et électrostatique (batteries)	59
V.4.2.1	Définition	59
V.4.2.2	Principe de fonctionnement :	60
V.4.3	Technologies	61
V.4.3	Stockage chimique (hydrogène où pile à combustible)	67
V.4.3.2	Moyen de stockage de l'hydrogène	68
V.4.3.3	4.3.3.3 Pile à combustibles	70
V.4.3.5	Nouvelles technologies de stockage d'énergie	79
V.4.3.6	Stockage de la chaleur par un fluide artificiel	79
V.4.3.5.2.1	Domaine d'utilisations des batteries Lithium-Ion	81
V.4.3.5.3	Hydrogène	82

Liste des figures

figure I. 1 : les différentes formes d'énergie	11
figure I. 2 : chaines et système énergétiques	12
figure I. 3: les sources d'énergie.....	12
figure I. 4 : transformation de l'énergie.....	17
figure I. 5 : Différents types d'énergie	21
figure III . 1 : Gazoducs	30
figure III . 2 : Méthanier	31
figure III. 3 : Pipelines.....	32
figure III . 4 : Les wagons citernes.....	34
figure III . 5 : Schéma des plaques avec « code de danger »	35
figure III . 6 : Les camions mono cuves.....	37
figure III . 7 : Les camions multicuves	38
figure III . 8 : des navires pétroliers	40

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Les sources énergies primaires renouvelables	16
Tableau I. 2 : les avantages et les inconvénients d'énergie renouvelable	16
Tableau I. 3: les avantages et les inconvénients de l'énergie fossiles.....	17
Tableau I. 4 : les avantages et les inconvénients de l'énergie fissiles.....	18
Tableau III . 1 : description des codes de danger (6).....	40
Tableau III . 2 : avantages de chaque mode de transport (9)	45
Tableau III . 3 : inconvénients de chaque mode de transport(9).....	45

Chapitre IV : Production et Transport de l'énergie électrique

IV.1 Introduction :

L'énergie électrique est un facteur essentiel de développement économique, dans tous les pays du monde. Son importance relative s'accroît avec les progrès techniques, l'industrialisation et le besoin de confort moderne. L'augmentation de sa production est synonyme d'amélioration de la qualité de vie et de création de richesse. La production d'électricité, ramenée au nombre d'habitants, est donc un bon indicateur permettant de mesurer les écarts de développement entre les différentes régions de monde.

IV.2 Définitions :

- **La production de l'énergie électrique** consiste en la transformation de l'ensemble des énergies primaires en énergie électrique.
- **Une centrale électrique** est un site industriel destiné à la production d'électricité. Elle transforme diverses sources d'énergie primaire en énergie électrique en établissant des chaînes énergétiques.
- **Tranche de production** Elle correspond à l'unité de production standard d'une centrale électrique. On parle généralement de tranche pour qualifier les unités de production des centrales nucléaires ou des centrales thermiques, qui peuvent contenir plusieurs tranches sur un même site.
- **Moyen de production « dispatchable »** Ce terme désigne un moyen de production d'énergie considéré comme flexible vis-à-vis du gestionnaire de réseau. Les moyens de production « dispatchables » peuvent notamment réagir de manière commandée à une sollicitation du gestionnaire de réseau en injectant à la hausse ou à la baisse, ceci dans un temps imparti.
- **Moyens de production centralisé et décentralisé** Les termes centralisé et décentralisé rendent compte du niveau de dissémination d'un parc de production d'énergie. Sans qu'il y ait de distinction univoque entre les deux catégories, on parlera de moyens centralisés lorsque la production énergétique est concentrée en quelques points du réseau (centrales nucléaires, centrale thermique à flamme, etc.) et de moyens

décentralisés lorsqu'il existe une multitude de points d'injection avec des systèmes de tailles unitaires réduites (éolienne, panneau solaire, etc.).

- **Pointe électrique** Elle correspond à un maximum de puissance électrique sur le réseau, et donc à un pic de consommation d'électricité. Les profils de consommation d'électricité suivent une trame globalement périodique avec un pas journalier, hebdomadaire ou saisonnier. Ainsi, on parlera de pointe journalière pour désigner le maximum de puissance appelée sur une journée. Le niveau de la pointe saisonnière, désignant le maximum de puissance appelée sur une année, permet quant à lui de dimensionner en puissance le parc de production d'électricité.
- **Réactivité** La réactivité d'un moyen de production d'énergie qualifie sa capacité à répondre plus ou moins vite à une consigne de fonctionnement. La définition précise d'un indicateur de réactivité dépend du type de consigne considéré (réactivité au démarrage ou en fonctionnement, temps de montée en charge partielle ou totale, vitesse de montée en charge, etc.).

IV.3 Appel de puissance d'un réseau :

La puissance demandée par l'ensemble des clients d'un réseau subit de grandes fluctuations selon l'heure de la journée et selon les saisons.

Ces fluctuations de l'appel de puissance obligent les compagnies d'électricité à prévoir trois classes de centrales de génération :

- **Les centrales de base** de grande puissance qui débitent leur pleine capacité en tout temps. Les centrales nucléaires et les centrales thermiques sont particulièrement aptes à remplir ce rôle.
- **Les centrales intermédiaires** de puissance moyenne qui peuvent réagir rapidement aux fluctuations de la demande. C'est le cas des centrales hydrauliques dont le débit est facilement contrôlable.
- **Les centrales de pointe** de puissance moyenne qui ne débitent leur pleine capacité que pendant de courtes périodes. C'est pourquoi les compagnies d'électricité encouragent les usagers à limiter leur charge de pointe.

Considéré (réactivité au démarrage ou en fonctionnement, temps de montée en charge partielle ou totale, vitesse de montée en charge, etc.).

IV.4 Modes de production de l'énergie électrique :

Une des souplesses signalées du système électrique est de pouvoir disposer de moyens de production alimentés par les sources d'énergie les plus diverses, dont les caractéristiques techniques et économiques sont suffisamment variées pour satisfaire à tous les aspects de la demande, et dont les localisations géographiques peuvent être très différentes, imposées soit par la source d'énergie, soit pour le bon équilibre dynamique du réseau. Un groupe de production se caractérise par de nombreux paramètres techniques dont on ne cite ici que les principaux :

- sa puissance unitaire nominale ;
- son domaine de fonctionnement en tension et en fréquence ;
- son minimum technique (sa puissance minimale en fonctionnement continu) ;
- son temps de démarrage, son aptitude à participer au réglage de la fréquence
- sa capacité de suivi de charge.

Les modes de production se classent en grandes catégories selon le principe de la transformation en électricité de l'énergie primaire utilisée.

Le choix d'un système de production d'électricité dépend principalement de la disponibilité des ressources énergétiques. Par exemple, la majorité des centrales de production d'énergie électrique en Algérie utilise le gaz naturel comme énergie primaire. Le choix du système peut aussi dépendre de l'impact environnemental des différentes ressources énergétiques.

IV.5 Centrale thermique :

IV.5.1 Introduction :

Malgré que l'Algérie commence à envisager des solutions écologiques en investissant dans les énergies renouvelables visant une puissance de 22 000 MW d'ici 2030 selon le Programme algérien de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (PENREE) de 2012, sept ans après ce plan, les réalisations sont modestes : le solaire n'a produit que 0,7 % de l'électricité du pays en 2017, et l'éolien 0,01 %.

L'Algérie en 2019 est le 16^e producteur de pétrole, le 10^e producteur de gaz naturel et le 7^e exportateur de gaz naturel au monde, donc en effet la production et la consommation

d'énergie, y compris dans le secteur de l'électricité, sont tirées des hydrocarbures à plus de 99 %.

Une centrale énergétique est le point de départ de notre consommation d'énergie. Il existe différents types de centrales énergétiques : Les centrales thermiques, solaires, éoliennes, nucléaire....etc. Dans ce qui se suit, nous détaillerons les centrales thermiques, leurs types et la production d'énergie électrique en Algérie. La production d'électricité à partir des centrales thermiques est la plus répandue et la plus ancienne dans le monde. En effet, le gaz, le charbon et le fioul, utilisés comme combustibles, sont des ressources naturelles abondantes.

Les centrales thermiques, grâce à leur flexibilité et réactivité, constituent l'un des moyens les plus efficaces pour faire face aux variations de la demande d'électricité, et notamment aux pics de consommation.

Elles sont capables de produire de l'électricité très rapidement et peuvent donc être sollicitées à tout moment. Dans une centrale thermique, une chaudière chauffe de l'eau et la transforme en vapeur. L'énergie calorifique est obtenue en brûlant le plus souvent du charbon, du pétrole ou du gaz.

La chaleur dégagée par la combustion vaporise l'eau qui atteint alors une très haute température. Cette vapeur se détend progressivement dans les corps haute, moyenne et basse pression de la turbine avant de se liquéfier dans le condenseur et d'être renvoyée dans le générateur de vapeur. L'énergie mécanique engendrée par la vapeur circulant dans la turbine, entraîne l'alternateur qui la transforme en énergie électrique.

Les centrales thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel. La plupart ont une capacité comprise entre 200 MW et 2000 MW afin de réaliser les économies d'une grosse installation. On la trouve souvent près d'une rivière ou d'un lac, car d'énormes quantités d'eau sont requises pour refroidir et condenser la vapeur sortant des turbines.

En fonctionnement nominal, le rendement de ces centrales se situe entre 40 et 42%. Leur minimum technique est de l'ordre de 20 %. Elles peuvent participer au réglage primaire et secondaire de la fréquence.



figure IV. 1 : Centrale thermique

IV.5.2 Définition et principe de fonctionnement :

La centrale thermique est une centrale électrique qui produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur (charbon, gaz, fioul, biomasse ou déchets municipaux).

La source de chaleur chauffe un fluide (souvent de l'eau) qui passe de l'état liquide à l'état gazeux (vapeur).

Cette vapeur entraîne une turbine couplée à un alternateur qui transforme l'énergie cinétique contenue dans la vapeur en énergie mécanique de rotation, puis en énergie électrique grâce à une génératrice découvrant.

Les centrales thermiques fonctionnent à partir de ressources naturelles: charbon, fioul ou gaz. Le combustible, une fois brûlé, chauffe l'eau située dans des tubes qui tapissent les parois de la chaudière. La chaleur transforme ainsi l'eau en vapeur pressurisée, qui actionne la turbine, qui elle-même entraîne l'alternateur.

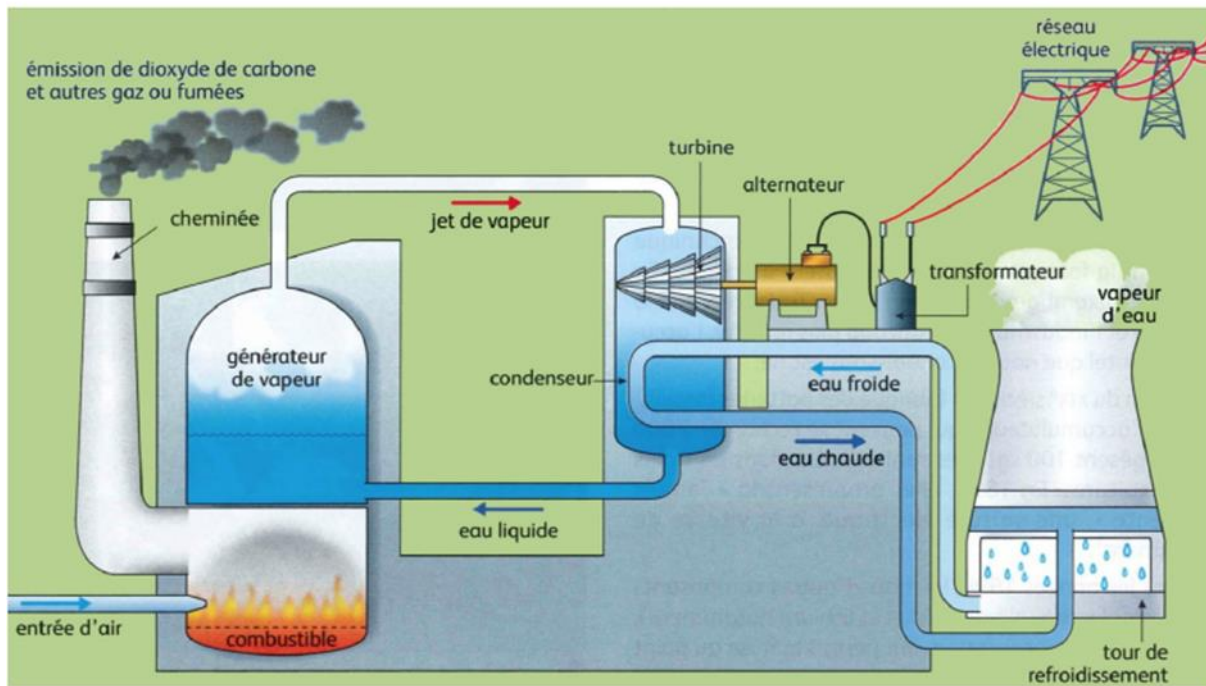


figure IV. 2 : Schéma d'une centrale thermique

IV.5.3 Types de centrales thermiques :

IV.5.3.1 Les centrales à turbine à vapeur :

La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit de Clausius-Rankine. Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant le fluide moteur qui est en général de la vapeur d'eau.

Elle transforme l'énergie thermique de la vapeur d'eau pendant la détente en énergie mécanique de rotation d'arbre pour entraîner un dispositif mécanique tournant.

- **La combustion :**

Un combustible (gaz, charbon, fioul) est brûlé dans les brûleurs d'une chaudière pouvant atteindre jusqu'à 90 mètres de hauteur et un poids de 9000 tonnes.

Dans les centrales à charbon, le combustible est broyé sous forme de poudre, puis brûlé dans la chaudière pour dégager de la chaleur. Dans les centrales au fioul, le combustible est chauffé pour le rendre liquide puis vaporisé en fines gouttelettes puis injecté par les brûleurs dans la chaudière.

Quant au gaz, il est utilisé sous deux formes: naturel pour les cycles combinés au gaz naturel ou sidérurgique pour les centrales traditionnelles.

- **La production de la vapeur :**

La chaudière contient des tubes à l'intérieur dans les quels circule de l'eau froide. L'eau se transforme en vapeur de pression élevée sous l'effet de la chaleur, qui est alors envoyée vers les turbines, où sa dilatation entraîne la rotation de cette dernière.

- **La production d'électricité :**

La vapeur fait tourner une turbine qui entraîne à son tour un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.

Un transformateur de puissance augmente la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à très haute et haute tension.

- **Le recyclage :**

La vapeur qui a été utilisée est envoyée vers un condenseur, dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve.

Au contact de celle-ci, la vapeur se transforme en eau, qui est récupérée et envoyée à nouveau dans la chaudière pour recommencer un autre cycle. L'eau utilisée pour le refroidissement est restituée au milieu naturel ou renvoyée dans le condenseur.

IV.5.3.2 Les centrales à turbine à combustible :

Dans une turbine à combustion (TAC), l'électricité est générée grâce à la circulation de gaz d'échappement issus d'une chambre de combustion et traversant directement la turbine.

La chambre de combustion est le plus souvent interne à la turbine, elle génère de la chaleur à partir d'un mélange d'air initialement comprimé et de fioul ou de gaz.

Alors que le fioul apporte une sécurité de fourniture, le développement des TAC gaz est aujourd'hui privilégié, notamment pour des raisons environnementales (émissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants moindres). Ce type de centrale démarre en seulement quelques minutes.

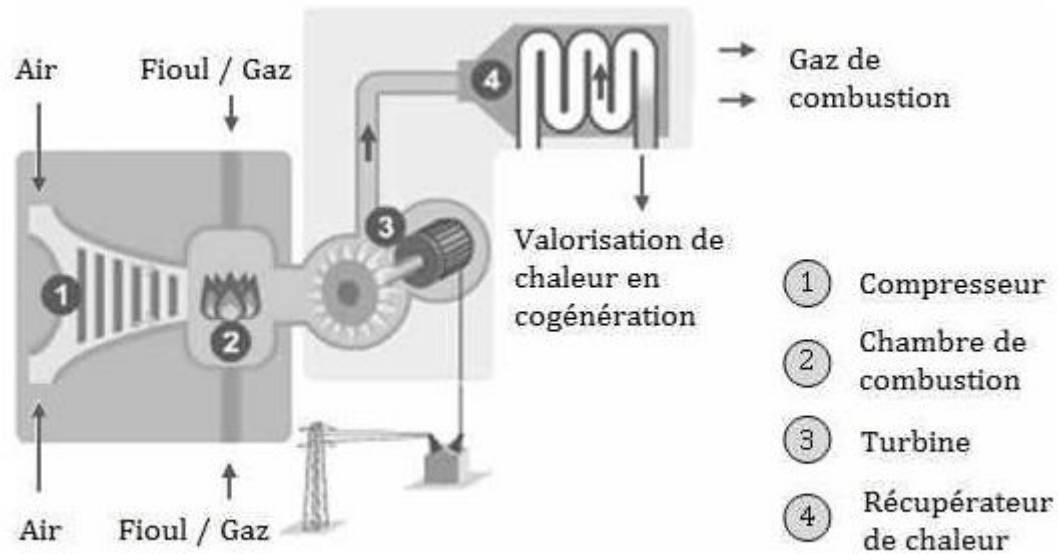


figure IV. 3 :Turbine à combustible

IV.5.3.3 Les centrales à cycle combiné au gaz naturel :

Un cycle combiné consiste à produire de l'électricité sur deux cycles successifs. Le premier cycle est semblable à celui d'une TAC: le gaz brûlé en présence d'air comprimé actionne la rotation de la turbine reliée à l'alternateur.

Dans le second cycle, la chaleur récupérée en sortie de la TAC alimente un circuit vapeur qui produit également de l'électricité avec une turbine à vapeur (TAV).

Les centrales à Cycle Combiné Gaz (CCG) présentent l'avantage d'atteindre des rendements élevés, notamment par rapport aux TAC en cycle simple, ils permettent de réduire les émissions atmosphériques (dioxyde de carbone, oxyde d'azote, oxydes de soufre). Ces nouvelles installations contribuent à améliorer les performances environnementales.

- **La cogénération :**

La cogénération est un système de production simultanée de chaleur et d'électricité. La chaleur dégagée lors de la production d'électricité est récupérée pour chauffer des locaux ou utilisée pour alimenter des procédés industriels.

Cette production combinée permet d'économiser 15 à 20% d'énergie primaire par rapport à la production séparée des mêmes quantités de chaleur et d'électricité. En outre, elle réduit de façon significative les émissions de CO₂ par kWh produit.

La cogénération est donc une manière de valoriser les pertes d'énergie et d'optimiser l'efficacité énergétique d'un système.

IV.5.4 Les avantages et les inconvénients des centrales thermiques :

➤ **Les avantages :**

- Les centrales sont rapides à construire.
- Cette technologie offre une grande flexibilité d'utilisation qui permet de répondre rapidement et précisément à la demande.
- Le thermique permet de construire des centrales de grande puissance.
- La production ne dépend pas de conditions extérieures autres que l'approvisionnement en combustible.

➤ **Les inconvénients :**

Cette technologie engendre des émissions de produits polluants et de gaz à effet de serre.

Le thermique utilise souvent des sources fossiles (charbon, fioul, gaz) dont les réserves sont physiquement limitées par la géologie terrestre et non-renouvelables à court et moyen terme.

IV.6 Centrale nucléaire :

Introduction :

Les centrales nucléaires produisent l'électricité à partir de la chaleur libérée par une réaction nucléaire. Ce phénomène est provoqué par la division du noyau d'un atome, procédé que l'on appelle fission nucléaire.

Une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique à vapeur, sauf que la chaudière est remplacée par un réacteur contenant le combustible nucléaire en fission.

Une telle centrale comprend donc une turbine à vapeur, un alternateur, un condenseur, etc. comme dans une centrale thermique conventionnelle. Le rendement global est semblable (entre 30 % et 40 %) et l'on doit encore prévoir un système de refroidissement important, ce qui nécessite un emplacement près d'un cours d'eau ou la construction d'une tour de

refroidissement. A cause de ces similitudes, nous nous limiterons à l'étude du principe de fonctionnement et des caractéristiques du réacteur lui-même.

La première production d'électricité d'origine nucléaire (1951). Ainsi, en une vingtaine d'années, l'énergie nucléaire est passée de la connaissance de ses premiers principes à sa démonstration pratique. Après cette première application de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité aux États-Unis, le Royaume-Uni (1953), la Russie (le 27 juin 1954, la première centrale nucléaire civile fut connectée au réseau électrique à Obninsk en Union soviétique), la France (1956) et l'Allemagne (1961) lui ont emboîté le pas. Ainsi, cinq pays ont exploité cette source d'énergie pour produire de l'électricité dans la première décennie qui a suivi sa démonstration pratique.

Les centrales nucléaires peuvent produire des quantités considérables d'électricité à partir d'une très petite quantité de combustible. Une seule pastille de combustible nucléaire de 2,5 cm produit autant d'énergie que 807 kilogrammes de charbon, 677 litres de mazout ou 476 mètres cubes de gaz naturel.



figure IV. 4 : centrale nucléaire

la réaction nucléaire : (la fission)

La plupart des réacteurs utilisent comme combustible un uranium contenant entre 3 et 5 % d'uranium 235. L'uranium naturel (U238) n'en contient que 0,7 %. Il convient donc d'augmenter la concentration en uranium 235 pour obtenir une matière utilisable dans les réacteurs nucléaires (c'est l'enrichissement).

Deux procédés industriels sont actuellement exploités au niveau mondial : la diffusion gazeuse et la centrifugation.

- Un noyau d'uranium 235 est bombardé par un neutron. Ce choc va rendre le noyau d'U 235 instable qui va se rompre en deux nouveaux noyaux : c'est la fission. Cette réaction libère beaucoup d'énergie sous forme de chaleur. De nouveaux éléments apparaissent, on les appelle "produit de fission". En plus de ces éléments, des neutrons sont libérés. Les neutrons libérés vont pour la plupart aller frapper d'autres noyaux d'uranium qui, à leur tour, vont se rompre en libérant d'autres neutrons : c'est la réaction en chaîne.

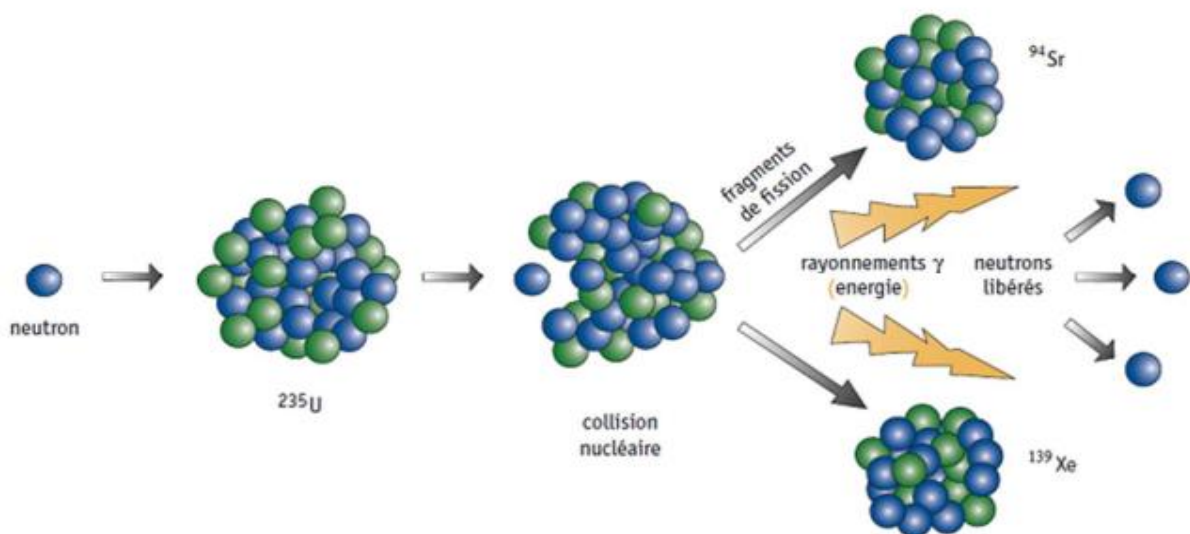


Fig.12 Principe d'une réaction en chaîne

I.5.3 Fonctionnement d'une centrale nucléaire

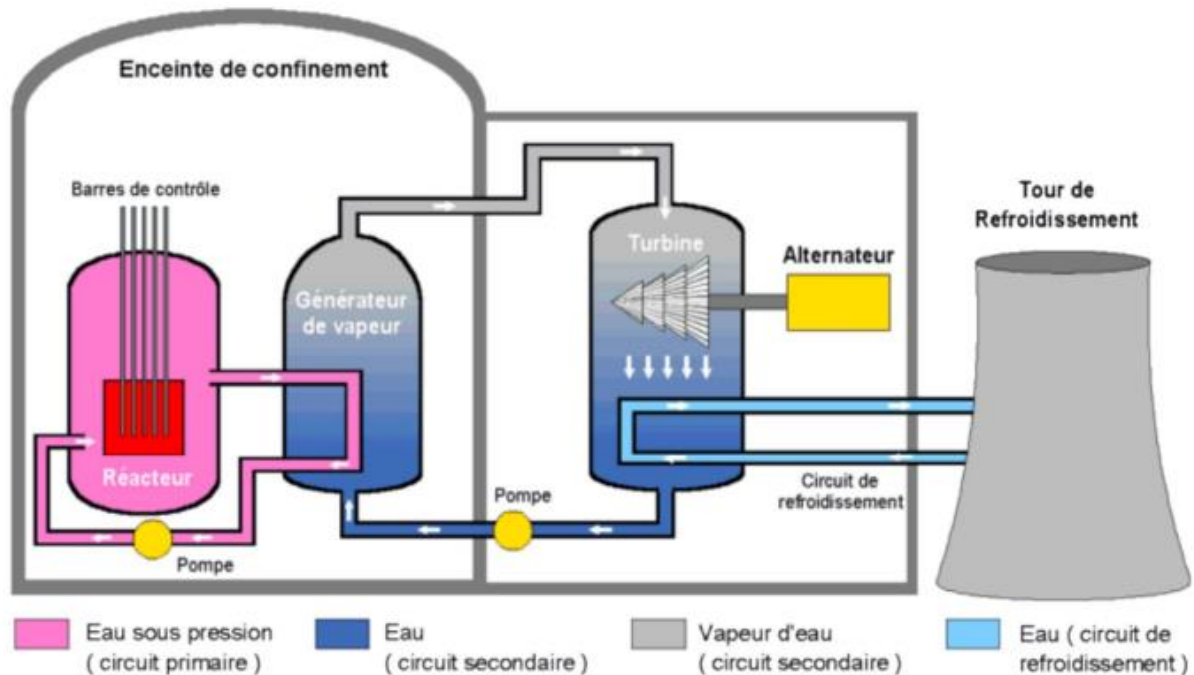


Fig 13 : schéma de principe de fonctionnement d'une centrale thermique nucléaire.

Le réacteur nucléaire permet de produire à volonté une réaction de fission en chaîne et d'en régler l'intensité. L'énergie considérable produite par cette réaction est évacuée hors de la réaction vers un échangeur de chaleur (générateur de vapeur qui transforme de l'eau en vapeur) grâce à un fluide dit « caloporteur ». A l'intérieur de la centrale électronucléaire, la force motrice de cette vapeur actionne un turbo-alternateur et produit de l'électricité. A la sortie du turboalternateur, la vapeur est retransformée en eau dans un « condenseur » refroidi par l'eau de mer ou de rivière ou encore par l'air frais et humide qui s'engouffre dans les tours en béton appelées « aéroréfrigérants ». Cette eau est ramenée vers le réacteur nucléaire pour être à nouveau transformée en vapeur refermant ainsi le cycle. Une centrale nucléaire regroupe l'ensemble des installations permettant la production d'électricité sur un site donné. Elle comprend fréquemment plusieurs réacteurs (appelés "tranches"), identiques ou non ; chaque tranche correspond à un groupe d'installations conçues pour fournir une puissance électrique donnée (par exemple 990 MWe, 1 300 MWe ou 1 450 MWe).

IV.6.3 Avantages et inconvénients :

Avantage :

- Combustible nucléaire peu onéreux.
- Indépendance par rapport au prix du pétrole.
- Exportation d'énergie électrique vers les pays limitrophes.

Inconvénient :

- Risque des centrales nucléaires (explosion, fuite, ext).
- Stockages des déchets nucléaires radioactifs (période de désintégrations des éléments radioactifs très variables, jusqu'à plusieurs millions d'années).
- Durée de vie des centrales nucléaires limitées (20 à 30ans).

IV.7 Centrale hydraulique :

IV.7.1 Introduction :

L'hydroélectricité ou énergie hydroélectrique exploite l'énergie potentielle des flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins, etc.). L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur.

L'hydroélectricité constitue la première source renouvelable et la troisième source - toutes filières confondues - de production électrique au monde (15,8% en 2018) derrière le charbon (38%) et le gaz (23,2%).



figure IV. 4 : centrale hydraulique

IV.7.2 Principe de fonctionnement :

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique. Cette turbine entraîne un alternateur dans lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique.

IV.7.2.1 Puissance disponible :

La puissance P que met en jeu une chute d'eau, d'une hauteur h et d'un débit q est donnée par :

$$P = 9,81 \cdot q \cdot h$$

Puissance en KW
Hauteur de chute en m
Débit en m³/s

Le choix de l'emplacement d'une centrale hydro-électrique dépend donc de ces facteurs.

A cause des pertes, la puissance mécanique que l'on peut recueillir sur l'arbre de la turbine est inférieure à la puissance fournie par l'eau. Cependant, le rendement des turbines hydrauliques

est élevé : de l'ordre de (80 à 94)% pour les grosses unités. Dans les alternateurs, la transformation de puissance se fait à un rendement de (97 à 98.5)%.

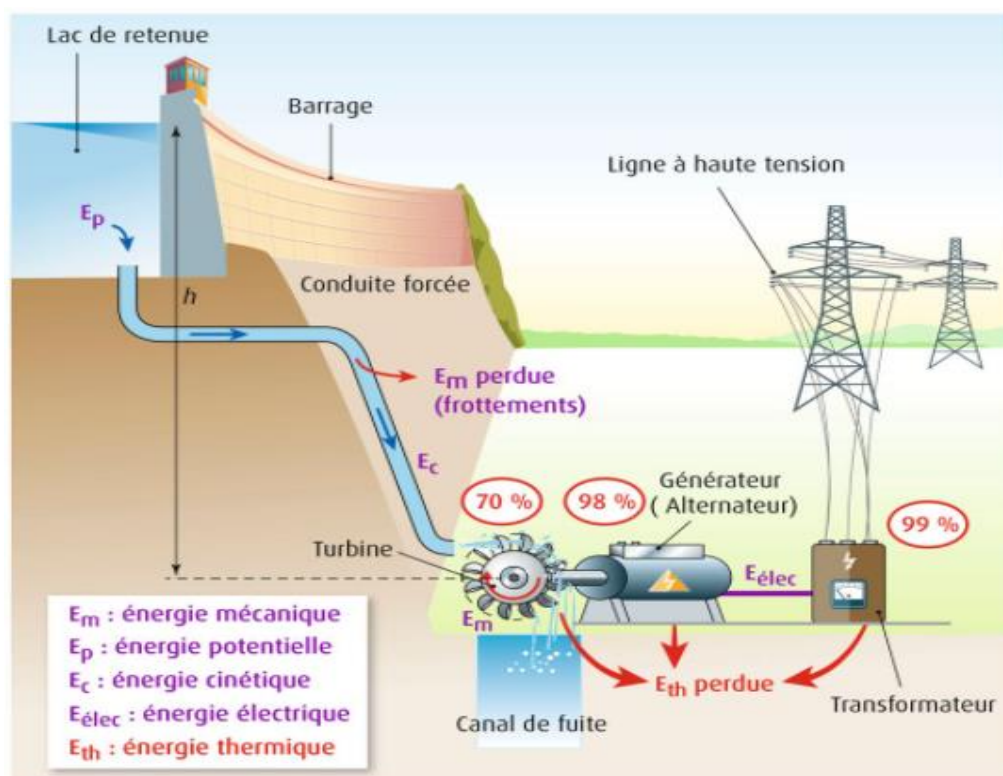


figure IV. 5 : principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

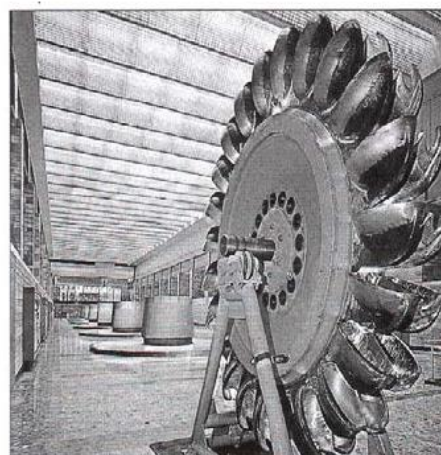
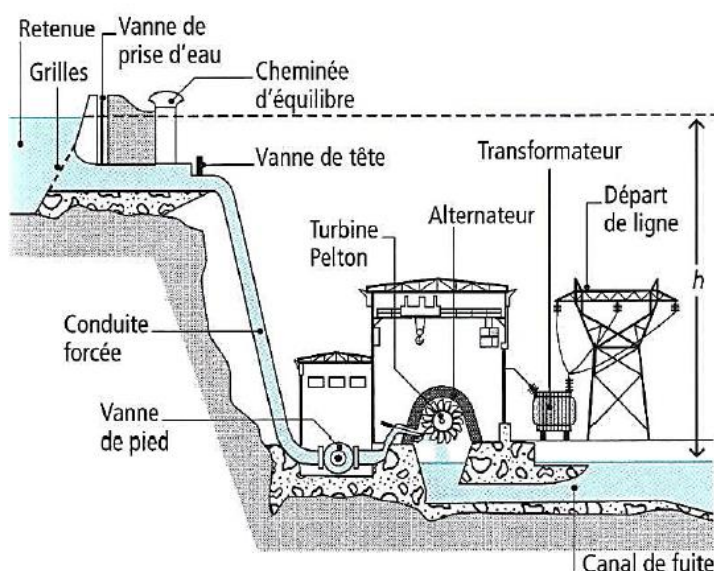
IV.7.2.2 Différentes centrales hydrauliques :

Tableau IV. 1 : différentes centrales hydrauliques

Centrale	Hauteur de chute	Turbine	Situation de la Centrale
Haute chute	$h > 300 \text{ m}$	Pelton	à quelques km de la prise d'eau
Moyenne chute	$30 \text{ m} < h < 300 \text{ m}$	Francis	implantée dans le barrage
Basse chute ou fil de l'eau	$h < 30 \text{ m}$	Kaplan	implantée au fil de l'eau

- les centrales de hautes chutes : $h > 300\text{M}$:

Elles sont situées en montagne. L'alimentation en eau des turbines s'effectue grâce à une conduite forcée. L'énergie produite par ces centrales sert généralement aux heures de pointe, du fait de la rapidité de sa mise en production. Les turbines utilisées sont de type Pelton.

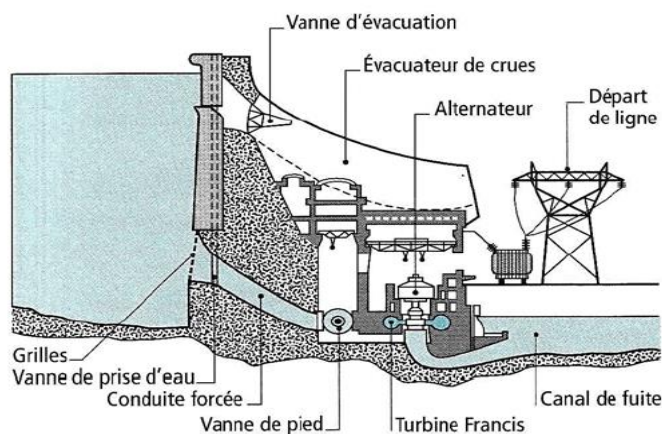


Turbine Pelton

figure IV. 6 : centrale de haute chutes avec turbine Pelton

- **Les centrales de moyennes chutes: $30M < h < 300M$:**

Elles sont situées en moyenne montagne. L'énergie produite par ces centrales sert à la régulation quotidienne ou hebdomadaire de la production. Elle utilise des turbines de types Francis



Turbine Francis

figure IV. 7 :Les centrale de moyennes chute avec turbine francis

- **les centrales de basses chutes : $h < 30M$:**

On les appelle aussi centrales au fil de l'eau. Elles sont caractérisées par une faible chute, et un débit important. Ces centrales fournissent de l'énergie en permanence. Elles utilisent des turbines de type Kaplan

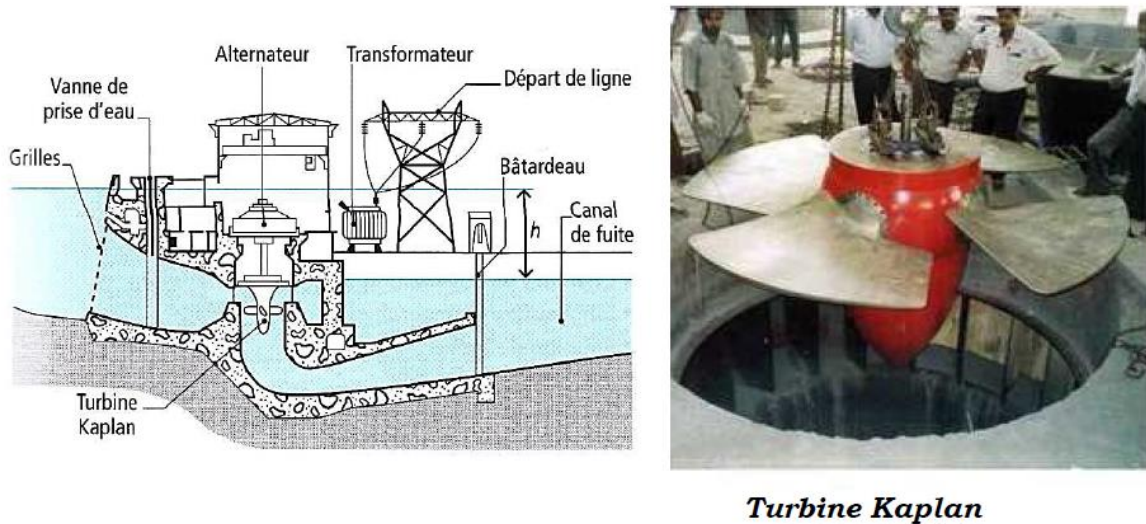


figure IV. 8 : centrale de basse chute avec turbine Kaplan

- **les stations de pompages :**

Ces centrales sont équipées de deux bassins. Aux heures de pointe, l'eau passe du bassin supérieur au bassin inférieur entraînant au passage en rotation une turbine couplée à un alternateur. Pendant les heures creuses, l'eau du bassin inférieur est pompée vers le bassin supérieur pour y être de nouveau stockée.

IV.7.2.3 Parties principales d'une centrale hydraulique :

Une centrale hydro-électrique comporte essentiellement :

- **barrage**

Les barrages de retenue sont établis en travers du lit des rivières ils servent à concentrer les chutes près des usines et à former des réservoirs d'emmagasinement. On peut ainsi créer des

réserves d'eau pour compenser l'insuffisance de débit pendant les périodes de sécheresse et assurer à l'usine une alimentation en eau plus uniforme.

Les barrages peuvent être en béton, en enrochement ou en terre. Les barrages du type poids sont les plus utilisés, ils s'opposent à la poussée des eaux par leur masse même.

- **conduite d'amenée :**

Elle conduit l'eau du barrage jusqu'aux turbines. A l'extérieur de l'usine, elle est constituée par un canal, un tunnel ou un tuyau, la partie intérieure appelée conduite forcée est en béton, en acier ou en fonte. On dispose à l'entrée de la conduite forcée, des vannes qui permettent de contrôler l'admission de l'eau. Ces vannes sont commandées par le régulateur de vitesse.

- **conduite d'échappement :**

Après être passée dans les turbines, l'eau retourne dans la rivière par la conduite d'échappement. Cette dernière comporte une cheminée de succion et un canal de fuite qui peut être le lit même de la rivière.

- **salle de commande**

Les appareils de commande et de contrôle sont groupés ensemble dans une salle d'où le personnel peut surveiller la marche des groupes générateurs.

IV.7.3 Avantages et inconvénients :

➤ **avantage :**

- Usage de ressources renouvelables, sans émission de gaz à effet de serre pour la production d'électricité
- Forte réactivité (Démarrage en quelques secondes)
- Longue durée de vie (plus de 50 ans)
- Coût de production d'électricité faible

➤ **inconvénients :**

- Raréfaction des sites exploitables (contraintes géographiques)
- Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (impact sur la continuité écologique des cours d'eau)
- Production d'électricité fatale pour les centrales sans stock

IV.8 Energie éolienne :

IV.8.1 Introduction :

De nombreux pays dans le monde aspirent aujourd'hui à une transition écologique, motivés principalement par les problèmes environnementaux causés par l'exploitation outrancière des ressources traditionnelles d'énergie telle que le pétrole, le gaz naturel ou le charbon, mais aussi et surtout par les effets écologiques qu'ont engendrés ces ressources, à savoir : le réchauffement climatique, la pollution de l'air etc., provoquant d'inquiétants changements dans les écosystèmes

L'Algérie, bien que n'étant pas l'un des pays les plus industrialisés, connaît néanmoins un élan démographique relativement important, ce qui laisse prévoir une augmentation dans la Demande d'énergie, d'un autre côté, ses réserves en hydrocarbures s'approchent à grands pas de leur fin, ce qui justifie la nécessité de se tourner vers les énergies renouvelables.

Aussi bien de par sa superficie que de par sa localisation et ses spécificités géographiques, le potentiel de l'Algérie en matière de production d'énergies renouvelables est, indéniablement, assez prometteur.

L'énergie éolienne ou l'énergie du vent, bien que n'étant classée que deuxième de par sa disponibilité en Algérie (le soleil étant la ressource la plus présente), n'en figure pas moins dans le programme des énergies renouvelables élaboré en 2011, et révisé en 2015, en vue de la réalisation de 22000 MW en 2030.



figure IV. 9 : Energie éolienne

IV.8.2 qu'est-ce que l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne qui doit son nom au dieu grecque responsable des vents nommé Eole, est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Il est possible ainsi de produire deux sortes d'énergies. Premièrement, l'hélice peut se relier à des systèmes mécaniques servant à moudre le grain ou à pomper l'eau (il s'agit du principe des moulins à vent). Il est aussi possible de rattacher l'hélice à un générateur transformant l'énergie mécanique en énergie électrique.

La quantité d'énergie produite dépend en premier lieu de la vitesse du vent élevé au carré, puis de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air.

Une masse du vent animée d'un mouvement rectiligne renferme un énergie sous forme cinétique. On l'exprime par la relation bien connue :

$$E_c = \frac{1}{2} M V^2$$

où M est la masse du vent et V sa vitesse.

Or la masse instantanée du vent qui traverse la surface balayée par les pales d'une éolienne vaut : $M = A \rho V$

où A est la surface balayée par les pales, ρ la densité de l'air et V sa vitesse.

La puissance théorique qu'une éolienne pourrait retirer de l'action du vent est donc :

$$P_{\max} = \frac{1}{2} A \rho V P^3$$

IV.8.3 Fonctionnement d'une éolienne :

L'éolienne, appelée aussi aérogénérateur, permet une transformation de l'énergie cinétique produite par le vent en énergie mécanique de rotation dans le but de produire de l'électricité.

Il existe deux types d'éoliennes : certaines ont un axe horizontal, parallèle au sol, et d'autres avec un axe vertical, perpendiculaire au sol.

L'éolienne à axe horizontal est munie de pales (généralement deux ou trois) qui tournent dans un plan vertical. Ainsi l'éolienne doit s'orienter face au vent pour une bonne efficacité. Les pales des éoliennes à axe vertical tournent quant à elles dans un plan horizontal et prennent alors le vent plus facilement.



Type Savonius



Type Darrieus



Type Darrieus

figure IV. 10 : Eolienne à axe vertical

IV.8.4 Avantages et inconvénients de l'éolienne à axe vertical :

- Générateur au sol
- Structure / construction simplifiée
- Peu bruyantes, plus petites et esthétiques

- Résistance forte aux variations climatiques
- Démarrage à faible vitesse (Savonius)
- Rendement faible
- Masse non négligeable



figure IV. 11 : Eolienne à axe horizontal

IV.8.5 Avantages et inconvénients de l'éolienne a axe horizontal :

- Stabilité de la structure
- Bon rendement
- Bruyantes, peu esthétiques
- L'éolienne à axe horizontal est pourtant beaucoup plus courante. C'est pourquoi nous expliquons son fonctionnement en détail.

IV.8.6 Fonctionnement d'une éolienne :

Le vent actionne les pales. Cette rotation fait tourner le rotor de l'alternateur, ce qui produit donc de l'énergie électrique. En général, il suffit d'un vent d'une dizaine de kilomètres à l'heure pour mettre les pales en mouvement.

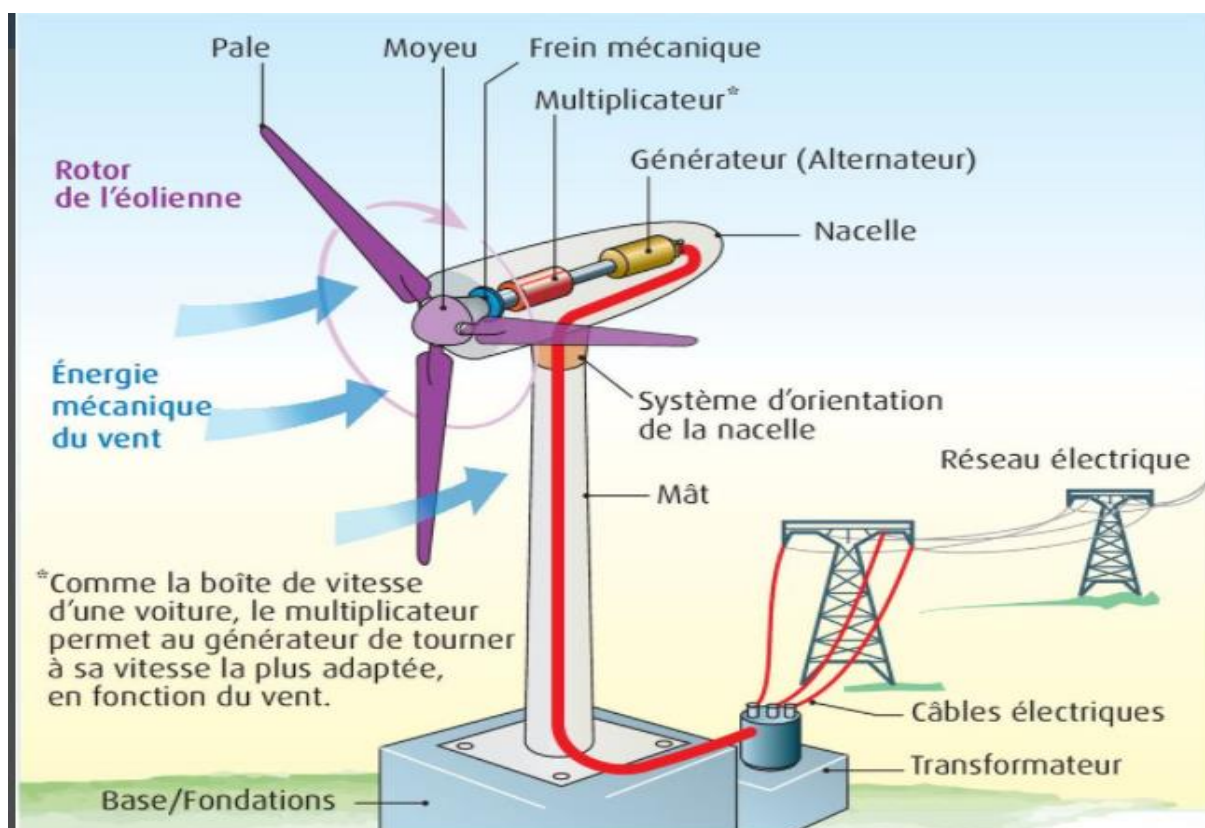


figure IV. 12 : schéma de Fonctionnement d'une éolienne

Tableau IV. 2 : Tableau des rendements.

	Diamètre du rotor	Rendement (%)	Ordres de grandeur des puissances électriques fournies
Petit éolien	< 35 m	22	1 kW à 350 kW
Éolien moyen	35 à 100 m	30	350 kW à 5 MW
Grand éolien	> 100 m	35	Autour de 5 MW
Hydrolien	Entre 10 et 20 m	Environ 40	300 kW à 1,2 MW

Le rendement des éoliennes et hydroliennes dépend de paramètres comme la taille du rotor (pales et moyeu), mais également de variables comme la vitesse du vent ou des courants. On peut cependant estimer un rendement moyen, donné ici pour différents diamètres de rotor.

IV.8.7 Avantages et inconvénients :

➤ Avantages

- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité
- Intermittence de production pouvant être compensée en partie par le foisonnement des régimes de vent sur le réseau.
- Conception, installation et maintenance aisée
- Coût marginal de production d'électricité très faible ("gratuité de la ressource")

➤ inconvénients :

- Intermittence et caractère fatal de la production d'électricité (variabilité dans le temps et dans l'espace de la ressource)
- Incertitude dans la prévision de la ressource
- Contraintes géographiques sur les sites éligibles (topographie, obstacles, etc.)
- Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (impact paysager, biodiversité, etc.)

IV.9 Energie de la biomasse :

IV.9.1 Introduction :

Le terme biomasse comprend une grande diversité de matières organiques, d'origine végétale ou animale, parfois insoupçonnées. La plupart sont en fin de vie et peuvent être transformées pour produire de l'électricité, de la chaleur ou du carburant. Il s'agit d'un gisement d'énergie local, renouvelable et propre. Une exploitation durable et équilibrée des gisements de biomasse (tout en préservant la durabilité des ressources) contribue considérablement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et au développement pérenne d'une économie locale.



figure IV. 13 : Energie de la biomasse

IV.9.2 Principe de fonctionnement :

L'énergie issue de la biomasse est une source d'énergie renouvelable qui dépend du cycle de la matière vivante végétale et animale. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasse. Une centrale est composée de 3 parties :

- la chaudière dans laquelle est brûlé le combustible ;
- la salle des machines qui produisent l'électricité ;
- les lignes électriques qui la transportent.

Déchets de bois utilisés comme combustibles dans la centrale de gazéification de biomasse à Güssing (Autriche) L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. En France, plusieurs centrales produisent de l'électricité grâce à la biomasse, essentiellement du bois. Elles sont le plus souvent installées au plus près des lieux mêmes de stockage des déchets. Le bois est également utilisé pour le chauffage collectif et industriel. L'énergie biomasse n'émet presque pas de polluants et n'a pas d'impact sur l'effet de serre. La quantité de CO₂, un gaz

à effet de serre, qu'elle rejette, correspond à la quantité absorbée par les végétaux pendant leur croissance. De plus, la valorisation du biogaz en électricité évite l'émission de méthane, un autre gaz à effet de serre, dans l'atmosphère.

Principe de fonctionnement :

1/ La combustion La biomasse est brûlée dans une chambre de combustion.

2/ La production de vapeur En brûlant, la biomasse dégage de la chaleur qui va chauffer de l'eau dans une chaudière. L'eau se transforme en vapeur, envoyée sous pression vers des turbines. Une partie de la vapeur est aussi récupérée pour être utilisée pour le chauffage. C'est ce que l'on appelle la cogénération.

3/ La production d'électricité La vapeur fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne et haute tension.

4/ Le recyclage À la sortie de la turbine, la vapeur est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve. L'eau ainsi obtenue est récupérée et re-circule dans la chaudière pour recommencer un autre cycle. Les fumées de combustion sont dépoussiérées grâce à des filtres et sont évacuées par des cheminées

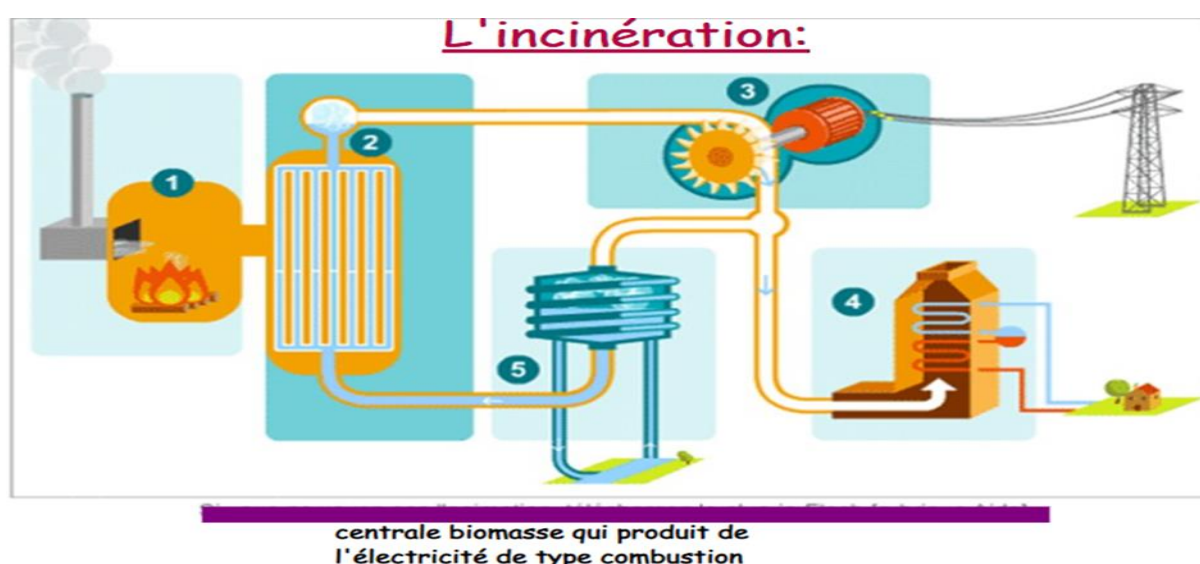


figure IV. 14 : Schéma de principe des installations de biogaz

Il existe 2 méthodes de production de l'électricité avec de la biomasse, suivant sa nature.

- **L'incinération**

Les déchets sont directement brûlés en produisant de la chaleur, de l'électricité ou les deux (cogénération). Cela concerne le bois, les déchets des industries de transformation du bois et les déchets végétaux agricoles (paille, canne à sucre, arachide, noix de coco...)

- **La méthanisation**

Les déchets sont d'abord transformés en un biogaz, par fermentation grâce à des micro-organismes (bactéries). Le biogaz est ensuite brûlé. Ce biogaz est proche du gaz naturel et majoritairement composé de méthane. Cela concerne les déchets ménagers, le fumier et lisier d'animaux, les boues de stations d'épuration, les papiers et cartons... En France, 10% de la production d'électricité d'origine biomasse provient de la combustion du biogaz. Il représente un potentiel énergétique très important, en provenance principalement des décharges, mais aussi des boues d'épuration et des déchets urbains et agricoles. Aujourd'hui seulement 1/4 de ce potentiel est réellement utilisé pour la production d'électricité et/ou de chaleur. L'électricité d'origine biomasse est surtout produite localement, le plus souvent en cas de besoins simultanés et sur une même zone de chauffage et de courant électrique. La combustion de la biomasse répond à la fois : au problème de la gestion des déchets urbains ou agricoles ;

- à la production d'électricité ;
- à la production de chaleur.

Centrale en cogénération d'Edison à Candela (Italie). Elle fonctionne avec du gaz naturel et du méthane récupéré dans les déchetteries. La chaleur de la vapeur qui fait tourner les turbines et est utilisée pour chauffer des serres d'horticulture.

Les centrales sont donc le plus souvent situées près des sites de production de la matière première ou de stockage des déchets (urbains ou agricoles). Certaines industries, telles que la papeterie ou la scierie, sont équipées de centrales dans lesquelles elles brûlent directement les résidus de bois liés à leur activités. 70% de l'électricité d'origine biomasse est produite à partir de la combustion du bois

IV.9.3 Avantages et inconvénients :

- **Avantages**

- Usage de ressources renouvelables avec approvisionnement principalement local

- Emissions de gaz à effet de serre limitées pour la production d'électricité (bilan carbone neutre de la biomasse énergie)
- Synergies locales possibles (valorisation des résidus de biomasse sur site papetier, etc.)
- Conversion de centrales charbon à la biomasse possible
- Coûts d'investissement de la biomasse forestière relativement faibles et stables.
- Source d'énergie continue, contrairement à l'éolien ou au solaire photovoltaïque.

➤ **Inconvénients**

- Contraintes d'approvisionnement en biomasse (gestion des parties prenantes, sécurisation sur de longues périodes)
- Qualité variable du combustible (taux d'humidité, etc.)
- Traitement des fumées spécifique (poussières...)
- Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération
- Gestion des cendres
- Densité énergétique moindre que celle des combustibles fossiles.

IV.10 L'énergie de la géothermie :

IV.10.1 Introduction :

Actuellement, le développement durable s'intéresse à d'autres filières énergétiques, plus respectueuses de l'environnement et quasiment inépuisables pour l'homme, comme la géothermie. L'énergie géothermique est un mot composé (du grec géo = la terre et thermie = la chaleur) qui désigne l'énergie provenant de la chaleur naturelle présente dans la croûte terrestre et dans les couches superficielles de la terre.



figure IV. 15 : L'énergie de la géothermie

L'énergie géothermique est une source d'énergie qui dépend de la chaleur de la Terre. La température des roches augmente en moyenne de 1°C tous les 30 m de profondeur. En certains points du globe, en particulier dans les régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans la croûte terrestre, cela peut aller jusqu'à 100°C par 100 m.

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans les centrales géothermiques, grâce à l'eau très chaude des nappes dans le sous-sol de la Terre.

Une centrale est composée de 3 parties :

- la pompe ;
- l'usine qui produit l'électricité ;
- les lignes électriques qui la transportent. C'est une énergie qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, la chaleur de la Terre, est totalement gratuite

IV.10.2 Principe de fonctionnement :

1/ L'infiltration d'eau : De l'eau de pluie ou de mer s'infiltré dans les fractures de la croûte terrestre pour constituer un réservoir dans le sous-sol, appelé nappe aquifère, à haute température, de 150 à 350°C .

2/ Le pompage de l'eau : Grâce à un forage dans le sous-sol, l'eau chaude est pompée jusqu'à la surface. Pendant sa remontée, elle perd de sa pression et se transforme en vapeur.

3/ La production d'électricité

La pression de cette vapeur fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.

4/ L'adaptation de la tension : Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à haute tension. Les zones de production Seule la centrale de Bouillante en Guadeloupe produit de l'électricité géothermique. Un programme initié en 2000 en Alsace a pour but de perfectionner la technique géothermique par extraction de la chaleur des roches. D'autres sites dans le Massif central et dans le Languedoc-Roussillon, ainsi qu'à la Martinique et à la Réunion ont un potentiel pour l'installation de sites géothermiques. Ils correspondent aux zones les plus volcaniques de France.

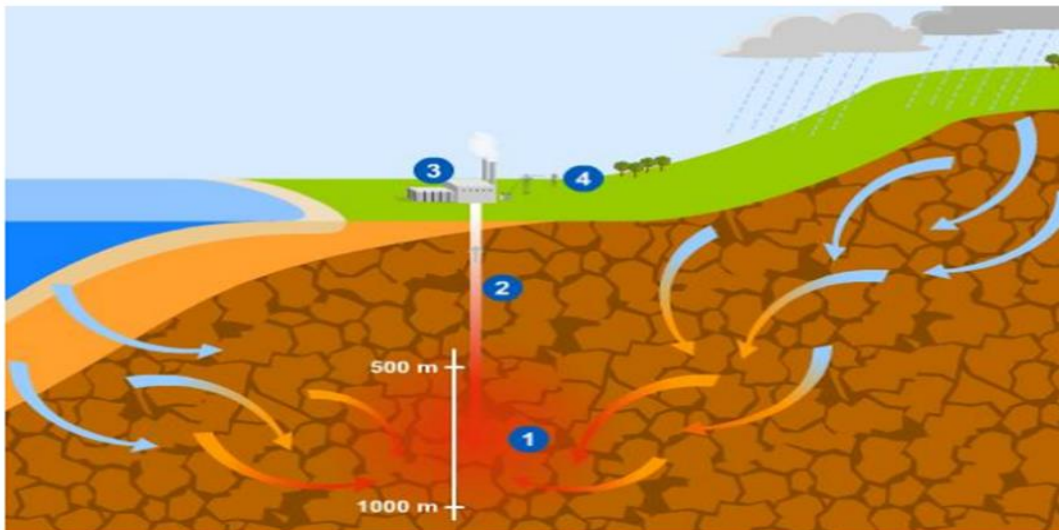


figure IV. 16 : Principe de fonctionnement d'une centrale géothermie

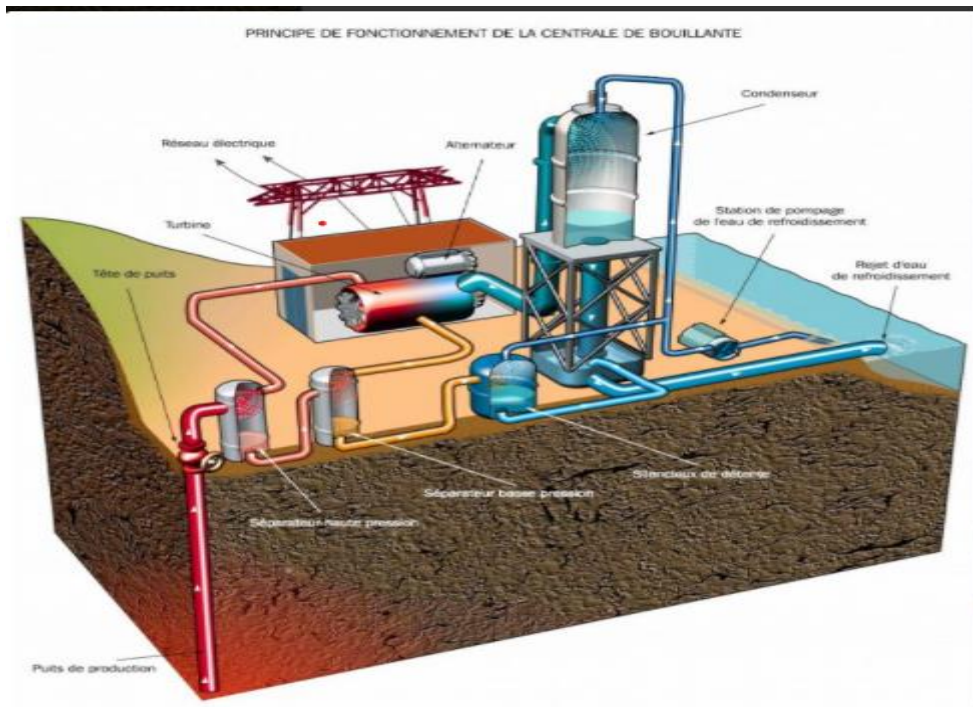


figure IV. 17 :Schéma d'une centrale géothermique

IV.10.3 Avantages et inconvénients :

- Avantages :
 - Les puissances produites peuvent être importantes
 - La technologie de production d'électricité est bien maîtrisée (turbine/alternateur)
- inconvénients :
 - Seules les régions volcaniques sont pour l'heure concernées par la géothermie moyenne/haute température
 - Le coût des forages très élevé
 - Les forages doivent être bien réfléchis pour préserver la ressource en eau souterraine et ne pas la polluer.

IV.12 L'énergie solaire :

IV.11.1 Introduction :

C'est quoi l'énergie solaire ? L'énergie solaire est une source d'énergie propre, disponible dans tous les endroits du monde et aussi longtemps que le soleil brillera. C'est un progrès important afin de sauver l'environnement. Cette énergie contribue au développement durable. Elle n'émet pas de pollution. Elle est inépuisable.



figure IV. 18 : L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

Le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente. C'est une énergie propre qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil, est disponible partout dans le monde, gratuite et inépuisable.

IV.11.2 Principe de fonctionnement :

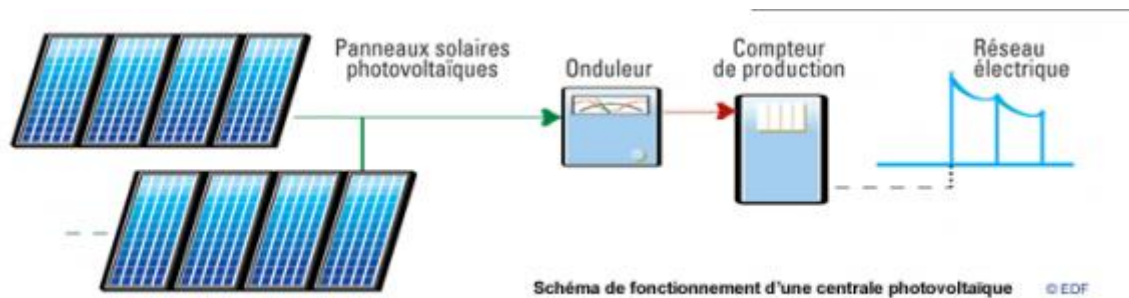


figure IV. 19 : schéma de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque

1/ Le captage des rayons Les panneaux solaires installés en rangées et reliés entre eux, captent la lumière du soleil.

2/ La production d'électricité Sous l'effet de la lumière, le silicium, un matériau conducteur contenu dans chaque cellule, libère des électrons pour créer un courant électrique continu.

3/ La transformation du courant Un onduleur transforme ce courant en courant alternatif pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne tension du réseau.

Transformer le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque.

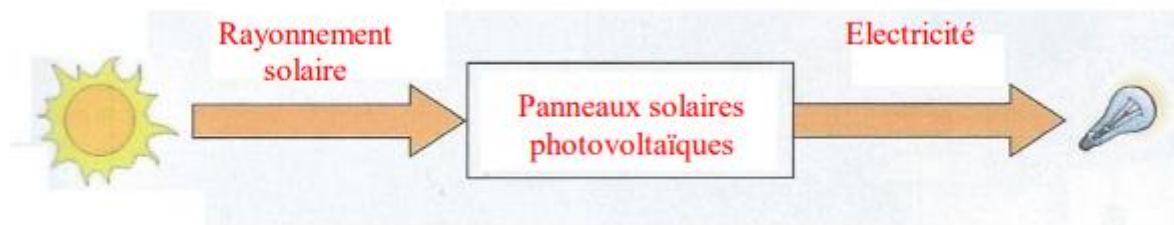


figure IV. 20 : Transformation du rayonnement solaire en électricité

- **L'éclairement ou irradiance (G)** est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en Watt/m^2 . Le S.I. (système international d'unités) recommande d'utiliser le symbole E.
- **L'irradiation ou rayonnement(H)** est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en J m^{-2} . D'autres unités plus courantes sont le Wh/m^2 .

Signalons que l'irradiation solaire dépend de:

- l'orientation et l'inclinaison de la surface,
- la latitude du lieu et son degré de pollution,
- la période de l'année,

- l'instant considéré dans la journée,
- la nature des couches nuageuses.

IV.11.3 Technologie :

IV.11.3.1 Cellule photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est la création d'une force électromotrice liée à l'absorption d'énergie lumineuse dans un solide.

C'est le seul moyen connu actuellement pour convertir directement la lumière en électricité.

La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques, il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 V.

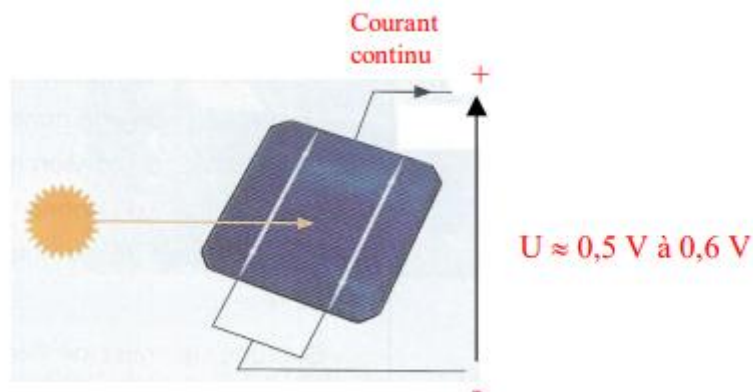


figure IV. 21 : La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi-conducteur):

- Une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, (05 é dont 03 CP), cette zone est donc dopée positivement (zone P),
- Une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium (15 é dont 05 CP), cette zone est donc dopée négativement (zone N).

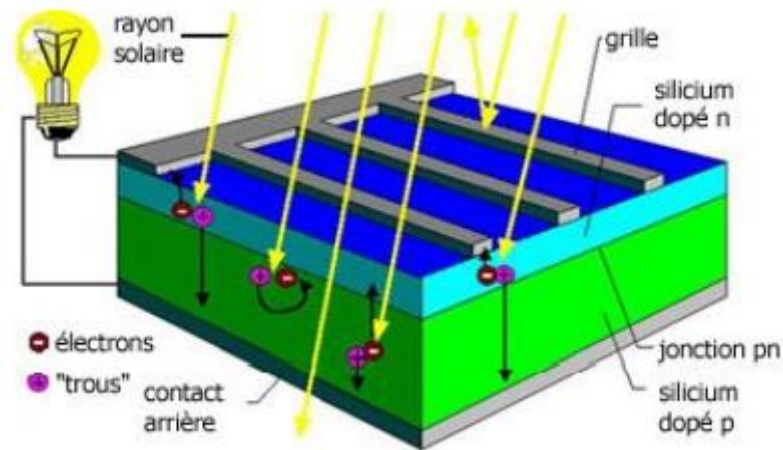


figure IV. 22 : La cellule photovoltaïque

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque

A la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium.

Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit les pertes par réflexion. C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu foncé.

IV.11.3.2 Technologie de capteurs :

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. Il doit être purifié afin d'obtenir un silicium de qualité photovoltaïque. Il se présente alors sous la forme de barres de section ronde ou carrée appelée lingots.

Les lingots sont ensuite découpés en wafers : fines plaques de quelques centaines de microns d'épaisseur. Ils sont ensuite enrichis en éléments dopants pour obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N.

IV.11.4 Comparaison des trois principales technologies de capteurs :

Tableau IV. 3 : comparaison des trois principales technologies de capteurs

TECHNOLOGIE	MONOCRISTALLIN	POLYCRISTALLIN	AMORPHE
Cellule et module			
Caractéristiques	✓ Très bon rendement : 14 à 20 %. ✓ Durée de vie : importante (30 ans) ✓ Coût de fabrication : élevé. ✓ Puissance : 100 à 150 Wc/m². 7 m²/kWc. ✓ Rendement faible sous un faible éclairement. ✓ perte de rendement avec l'élévation de la température. ✓ Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal ✓ Couleur bleue uniforme.	✓ Bon rendement : 11 à 15 %. ✓ Durée de vie : importante (30 ans) ✓ Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins ✓ Puissance : 100 Wc/m². 8 m²/kWc. ✓ Rendement faible sous un faible éclairement. ✓ perte de rendement avec l'élévation de la température. ✓ Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux. ✓ Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux.	✓ Rendement faible : 5 à 9%. ✓ Durée de vie : assez importante (20 ans) ✓ Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies ✓ Puissance : 50 Wc/m². 16 m²/kWc. ✓ Fonctionnement correct avec un éclairement faible. ✓ Peu sensible aux températures élevées. ✓ Utilisables en panneaux souples. ✓ Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium. ✓ Rendement faible en plein soleil. ✓ Performances diminuant avec le temps. ✓ Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.
Part de marché	43 %	47 %	10 %

IV.11.4 Avantages et inconvénients :

➤ Avantages

- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.
- Génère l'énergie requise.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.

- L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
 - La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
 - Entretien minimal.
 - Aucun bruit.
- inconvénients
- La fabrication des panneaux photovoltaïques relèvent de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
 - Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
 - Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
 - Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

Chapitre V: Stockage de l'énergie

IV.1 Introduction :

Pour la « production d'énergie », le stockage est essentiel : en réalité, ce qu'on appelle couramment et économiquement « production d'énergie » est :

- soit la transformation d'un stock d'énergie potentielle (combustible fossile, eau stockée en hauteur, matière fissile...) en une énergie directement utilisable pour un travail (électricité, travail mécanique) ou un usage thermique.
- soit la transformation directe de flux d'énergie naturels, flux sur lesquels l'humain n'a aucun contrôle. Ce sont les énergies renouvelables, souvent issues du rayonnement solaire. Du point de vue physique, il n'y a jamais "production d'énergie", mais transformation d'une énergie disponible dans la nature.

Le stockage est la constitution d'un stock d'énergie potentielle à partir de flux d'énergie dont on n'a pas l'usage immédiat, pour en disposer plus tard, quand la demande sera plus importante.

La nature stocke naturellement de l'énergie par exemple avec la biomasse "neuve" (non fossile), le cycle climatique de la Terre (pluie, neige...), les marées... Certains stockages naturels n'ont eu lieu qu'à l'échelle de temps géologique (création du charbon, du pétrole et du gaz, formation des étoiles et des éléments radioactifs dans les noyaux des planètes...). Aujourd'hui, les stocks d'énergies fossiles s'épuisent, leur renouvellement étant infinitésimal à l'échelle de temps de la vie humaine, raison pour laquelle ces ressources sont appelées non-renouvelables et fossiles.

V.2 Intérêt :

Le stockage d'énergie est un enjeu vital pour les sociétés humaines et l'industrie. Pour les États, l'indépendance énergétique est stratégique et économiquement essentielle. Pour les individus et les entreprises, l'énergie doit impérativement être disponible à la demande, sans coupure inopinée. Toute rupture d'approvisionnement a un coût économique et social élevé et en termes de santé et de sécurité, etc ; par exemple, une coupure de courant dans un hôpital peut avoir des conséquences désastreuses, ce pourquoi il est muni de plusieurs groupes électrogènes de secours et de stocks de carburant.

Le stockage d'énergie répond à trois motivations principales :

- sécurisation de l'approvisionnement en énergie d'un pays ou d'un groupe de pays ;
- ajustement de la production d'énergie en fonction de la demande ;
- compensation de l'irrégularité de la production des énergies dites intermittentes.

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie (mécanique, thermique, électrique...) en cas de la suffisance pour une utilisation en cas de besoin. Le stockage d'énergie joue un rôle capital sur les plans économique, environnemental, géopolitique et technologique

V.3 Efficacité énergétique d'un stockage d'énergie

Le stockage d'énergie est toujours suivi par l'opération inverse afin de récupérer l'énergie stockée (le déstockage) ; ces deux opérations de stockage/déstockage constituent un cycle de stockage. A la fin de chaque cycle de stockage le système retrouve son état initial (idéalement vide). Donc le rendement d'un cycle de stockage correspond au rapport entre la quantité d'énergie récupérée sur la quantité d'énergie stockée initialement.

Sauf pour les moyens naturels de stockage d'énergie ambiante, comme la lumière solaire dans la biomasse, le vent ou la pluie, le stockage d'énergie est associé à l'opération inverse : l'opération consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage d'énergie). Ces deux opérations de stockage/déstockage constituent un cycle de stockage. À la fin d'un cycle, le système de stockage retrouve son état initial (idéalement "vide") ; on a alors régénéré le stockage.

L'efficacité énergétique d'un cycle correspond au rapport entre la quantité d'énergie récupérée sur la quantité d'énergie que l'on a cherché initialement à stocker. Ce rapport est généralement inférieur à 1, sauf pour les moyens naturels de stockage d'énergie ambiante où il peut être considéré comme infini (division par zéro), puisque personne ne fournit l'énergie à stocker, qui est de fait gratuite.

L'efficacité énergétique d'un cycle de stockage d'énergie dépend énormément de la nature du stockage et des systèmes physiques mis en oeuvre pour assurer les opérations de stockage et de déstockage.

Dans tous les cas, chacune des deux opérations de stockage et de déstockage induit invariablement des pertes d'énergie ou de matière : une partie de l'énergie initiale n'est pas réellement stockée et une partie de l'énergie stockée n'est pas réellement récupérée. Mais pour de l'énergie ambiante naturelle, ces pertes influent surtout sur l'amortissement économique des investissements éventuellement nécessaires : la lumière du soleil arrive même si l'humain ne la capte pas.

1. stockage des produits pétroliers

1.1 Introduction générale :

L'industrie pétrolière a pour principale caractéristique la mise en œuvre de tonnages très importants d'hydrocarbure. Sous forme liquide ou gazeuse, elle se trouve dans l'obligation de prévoir d'énormes capacités de stockage. Cette tendance va s'accroître avec l'obligation faite par les nouvelles réglementations qui prévoient de constituer un stock équivalent à trois mois de consommation pour chaque pays en vue de se mettre à l'abri des pénuries éventuelles. À cet effet, on utilise des réservoirs de stockage de 30 000 à 50 000 m³ voire même 1 000 000 m³. Compte-tenu du coût élevé de ces réservoirs, les activités de stockage sont considérées dans la plupart des cas comme des activités commerciales générant des ressources à travers des droits d'enlèvement pour rentabiliser les investisseurs de départ. Pour l'exploitation des réservoirs de stockage, il faut également prendre des précautions pour éviter l'évaporation des produits ou pour maintenir la fluidité de certains produits par réchauffage.

1.2 Présentation des réservoirs de stockage :

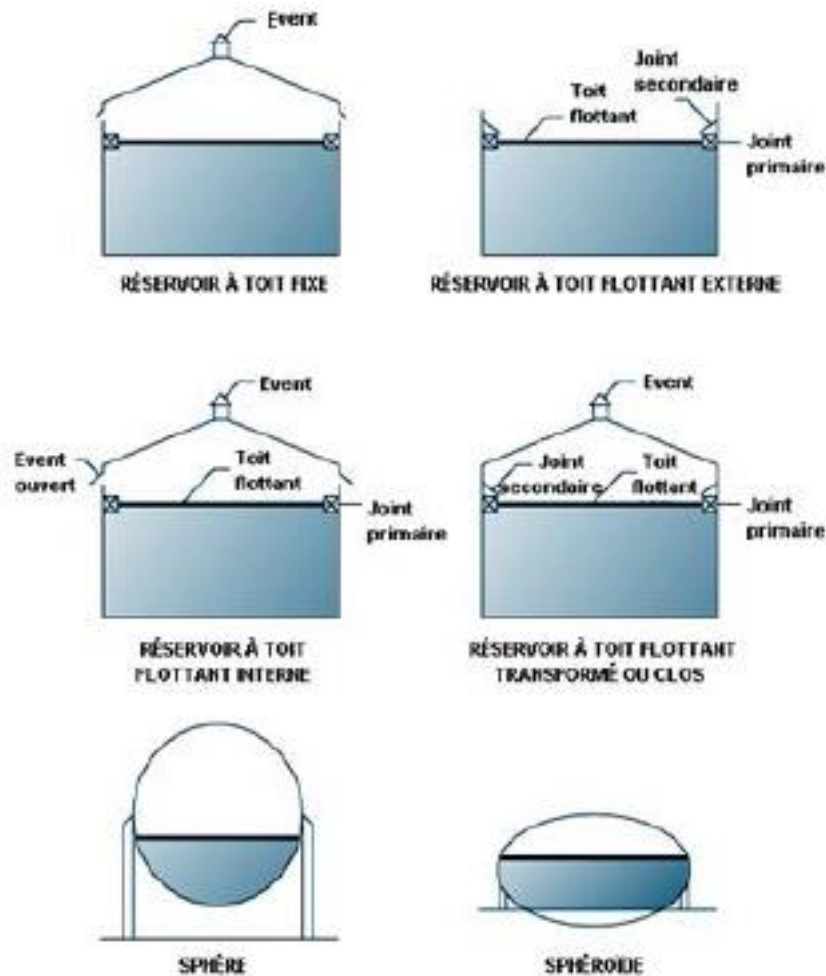


Figure 7: Les différents types de réservoirs

1.2.1 Equipements et accessoire des bacs

1.2.1.1 Définition

Un bac est un réservoir cylindrique et vertical destiné au stockage des hydrocarbures liquides.

1.2.1.2 Equipements des bacs

- La lobe : C'est une paroi verticale constituée de tôles cintrées au diamètre du réservoir.
- La virole : C'est un anneau constitué de tôles dont la succession donne la lobe.
- La cuvette : C'est un compartiment construit autour d'un bac ou d'un ensemble de bacs destiné à recevoir le contenu du bac ou de l'ensemble de bacs en cas de fuite accidentelle.
- Le fond : C'est la hase du réservoir et il est fait également d'un ensemble de tôles.
- L'assise : C'est la fondation sur laquelle repose le réservoir.
- Le toit : C'est la partie supérieure du réservoir, il est fait d'un assemblage de tôles.

Il peut être fixe ou flottant.

1.2.1.3 Accessoire des bacs

■ Accessoire de lutte contre la surpression

- Les évents : ce sont des ouvertures permanentes situées dans la partie supérieure du réservoir destinées à évacuer l'excédent de vapeur d'hydrocarbures par temps chauds
- Les soupapes : ce sont des dispositifs automatiques qui laissent s'échapper l'excédent de vapeur une fois que la pression de la phase gazeuse à l'intérieur du réservoir atteint une valeur limite ou critique. Cette pression est appelée pression de tarage.

■ Accessoire de lutte contre l'incendie

- La couronne de mousse : extincteur de feux d'hydrocarbures (jaune-orangée).
- La couronne d'eau à refroidissement : refroidissement du bac (bleu ou rouge).
- Cuvette de rétention : circonscrit In lutte contre l'incendie à un périmètre limite

■ Accessoire de mesure de niveau de produit

Sur certains réservoirs (bac de stockage de fioul et de bitume), des accessoires appelés indicateurs de niveau à flotteur sont installés. Ils permettent de lire directement une règle graduée fixée sur la robe, la valeur du niveau de produits dans le réservoir grâce à un index se déplaçant devant la règle graduée.

■ Accessoires de visite et nettoyage

Il s'agit des trous d'homme, des gardes de corps, des escaliers et des échelles.

■ Accessoires de réchauffage

Dans le cas des fiouls, un système de réchauffage est prévu (serpentins tapissant le fond du réservoir). Le stockage du bitume en plus du système de réchauffage. Il est aussi prévu un calorifugeage (isolation thermique) couplé au réservoir.

1.2.2. Equipements et accessoire des sphères

1.2.2.1 Définition

Ce sont des capacités sphériques destinées au stockage du GPL et particulièrement du butane.

1.2.2.2 Equipements

- Equipements d'accès : escaliers, gardes de corps et les échelles.
- Equipement de visite trous d'homme
- Equipement de mesure de niveau de produit : télé jauge (sphères équipées de télé jauges).

- Equipements de sécurité : les soupapes, les couronnes d'eau et de mousse, les paratonnerres

1.3 classification des réservoirs :

Les réservoirs utilisés sont classés selon trois critères :

- ✓ La pression développée par les produits stockés et supportable par le réservoir
- ✓ La durée de vie du réservoir.
- ✓ Les capacités des réservoirs.

1. 3.1 classification des réservoirs selon le critère de pression :

Les produits pétroliers sont classés en quatre groupes suivant leur pression de Vapeur. Chaque classe ou groupe correspond des types particuliers de réservoirs qui se différencient essentiellement par la pression de service. La pression supportée par le réservoir est la somme de la pression hydrostatique créée par le liquide et la pression de vapeur. La pression de vapeur doit varier dans les limites pour ne pas provoquer l'explosion du réservoir. Elle est maintenue entre ces limites par des soupapes.

CLASSEMENT DES PRODUITS STOCKES			Types de réservoir correspondant
N ^o de classe	Pression de vapeur aux T ⁰ de stockage	Exemple de Produits	
1	Pression de vapeur toujours	Propane	Cigares
2	Pression de vapeur parfois légèrement inférieure à un bar.	Butane	Sphères
3	Pression de vapeur toujours inférieure à Un bar mais non négligeable.	Pétrole brut. Essences	Réservoirs dits « haute pression critique soupapes= 180g/cm ² . Réservoir dits « moyenne pression » : Pression critique soupapes =25g/cm ² .
4	Pression de vapeur négligeable.	Pétrole lampant. GO, Huile de graissage. Fioule. Bitume.	Réservoirs à événements.

1.3.2. Classification des réservoirs selon la nature des toits

Selon l'utilisation du réservoir, il peut être à toit fixe, toit flottant ou toit fixe avec écran flottant.

❖ Toit fixe

Le toit fixe est solidaire de la robe. Ces réservoirs à toit fixe se présentent sous deux aspects :

- Aspect.
- Aspect de dôme.

Ils sont destinés à la classe quatre (04)

❖ Réservoirs a toit flottant

Ce type de toit est utilisé pour les réservoirs contenant des produits volatils. Ces réservoirs sont destinés à la classe trois (3). Le toit coulisse verticalement dans la robe et repose directement sur le produit dont il suit les niveaux de variation empêchant la formation de la phase gazeuse.

Toit fixe avec écran flottant

Ce type de toit va combiner les avantages du toit fixe et du toit flottant. Le toit fixe met le produit à l'abri de l'action des agents atmosphériques (eaux de pluie), l'écran interne comporte comme le toit flottant. Ce type de toit est utilisé pour le stockage du Jet A₁.

1.3.3 Classification selon la capacité des réservoirs

Selon l'utilisation des réservoirs on distingue deux types de réservoirs :

- Les réservoirs de stockage : ce sont des réservoirs de grandes tailles qui sont affectés aux activités de réception de produits en provenance de la raffinerie. Leurs capacités sont supérieures à 20000m³.
- Les réservoirs d'exploitation : ce sont des réservoirs de petites tailles destinés à des activités d'enlèvement de produits. Ils sont destinés à l'alimentation des postes de déchargement de wagons-citernes et ou de camions -citernes. Ils reçoivent du produit en provenance des réservoirs de stockage.

V.4 Formes de stockage d'énergie

Les technologies de stockage varient selon les sources d'énergie, par exemple, à mesure que la source d'énergie thermique est existante, on trouve le stockage thermique. Le

classement de ces technologies est basé sur les phénomènes physico-chimiques qu'elles font intervenir. Le tableau suivant résume les différentes technologies de stockage :

Tableau V. 1 Différentes technologies de stockage

Origine de l'énergie stockée	Technologie
Mécanique	Hydraulique (gravitaire) - Volant d'inertie - Air comprimé
Electrochimique	Batteries - Hydrogène (piles à combustibles)
Thermique	Chaleur sensible - Chaleur latente - Energie par sorption

V.4.1 Stockage mécanique :

Il existe plusieurs types de stockage mécanique ; stockage gravitaire, stockage inertiel et stockage par air comprimé.

V.4.1.1 Stockage gravitaire :

Les installations de turbinage-pompage il consiste à pomper l'eau vers un réservoir située en altitude à l'aide d'une pompe électrique (phase de stockage). En phase de déstockage, l'énergie gravitaire hydraulique disponible est récupérée à travers une turbine couplée par un générateur comme (Figure 4.1.). Ce type de stockage présente un bon rendement (70 à 80%) et un faible coût, mais il nécessite des sites adaptés.

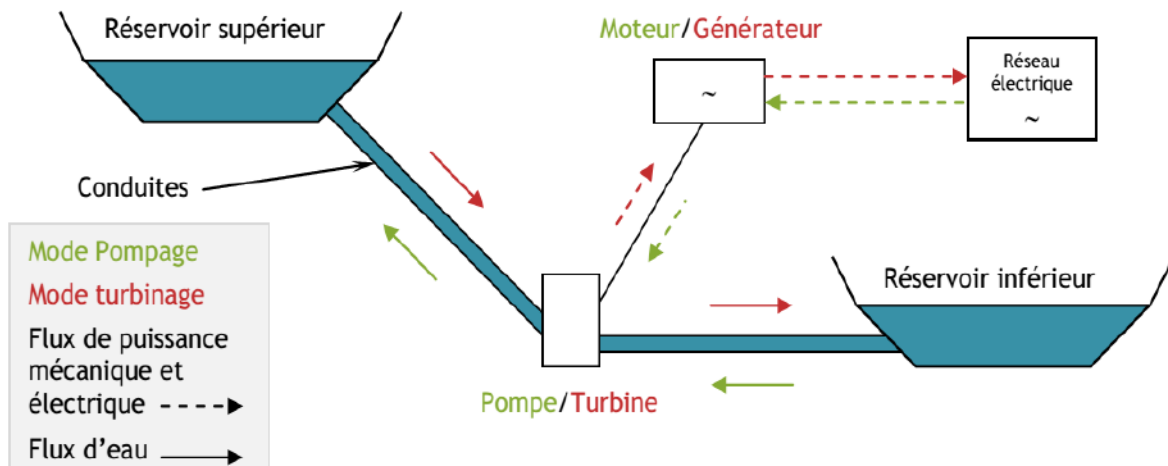


Figure V. 1 Principe de fonctionnement d'un stockage gravitaire [18]

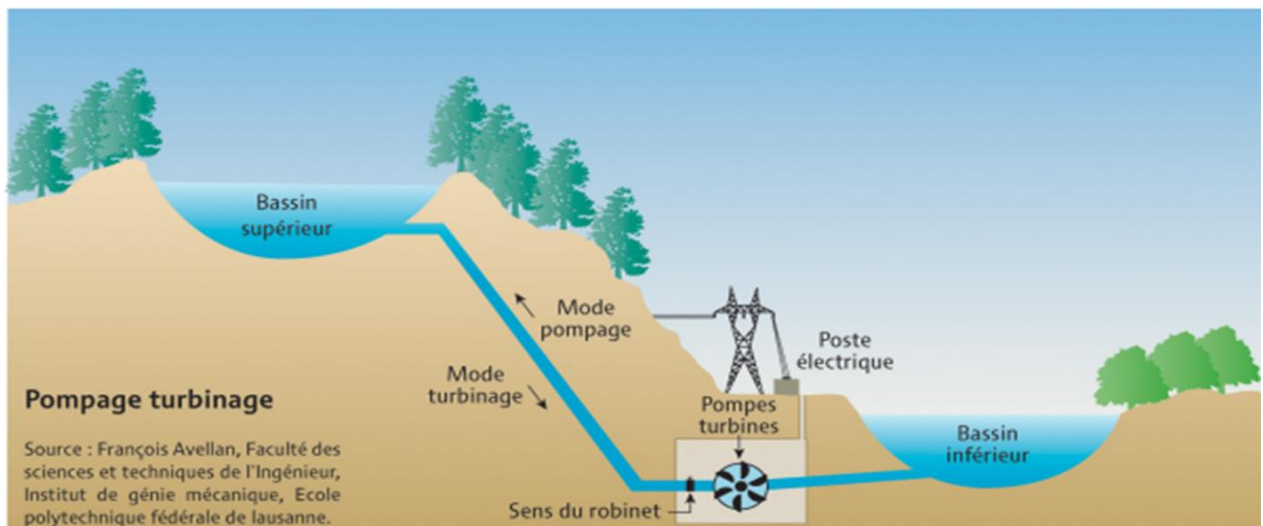


Figure V. 2 Le fonctionnement des STEP

- **Avantages des STEP :**

Technologie éprouvée et écologique : C'est une solution qui s'inscrit dans le cadre du développement durable. Le fonctionnement des STEP est éprouvé et totalement écologique. Il ne dépend d'aucun combustible, dans la limite où le pompage ne fait pas appel à de l'électricité d'origine thermique, haute densité de stockage ;

- optimisation de la gestion de stocks ;
- sécurité des personnels ;

- Réduction des coûts (diminution des coûts globaux résultant des réglages, des manutentions...).
- **Inconvénients des STEP**
- Coûts d'exploitation élevés
- La spécificité des sites à équiper et les investissements correspondants, leur éloignement par rapport aux grands centres de consommation, en particulier de ceux qui provoquent des pics de consommation, nécessite un transport d'énergie électrique sur d'assez grandes distances ce qui renchérit les coûts d'exploitation.
- Impact possible sur le paysage ;
- pertes d'énergie allant de 15% à 30%.

La durée de stockage de l'eau dans le bassin supérieur est quelconque et la quantité peut être importante (pouvant atteindre une centaine de millions de m³ d'eau). L'ensemble des matériels fait appel à une technologie classique, robuste, de très grande disponibilité.

V.4.1.2 *Stockage inertiel (volant d'inertie) :*

Un volant d'inertie est un système rotatif qui confère l'énergie cinétique à un élément (disque, cylindre...) de moment d'inertie J tournant à une vitesse Ω (voir figure 4.2). La quantité d'énergie cinétique est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation, donc :

$$E = \frac{1}{2}(J\Omega^2)$$

Avec J est le moment d'inertie qui dépend de la masse et du rayon du volant :

$$J = KmR^2$$

K est un constant dépendant de la géométrie d'élément tournant (pour un cylindre à paroi mince $K=1$). R et m sont respectivement le rayon et la masse du volant.

Afin de limiter les pertes de frottement, on place le volant dans une enceinte à vide et on utilise des paliers magnétiques pour assurer la rotation du volant sans contact. Un dispositif moteur/générateur monté directement sur l'arbre permet d'entraîner la masse à des vitesses très élevées (entre 8000 et 16000 tour/min) par l'application d'un couple de moteur électrique

(phase de stockage). Par la suite, la masse continue à tourner même si le couple est nul (le moteur à l'état d'arrêt). L'énergie cinétique emmagasinée dans le volant d'inertie est récupérée par le générateur (phase de déstockage) ce qui par la suite ralentir progressivement la vitesse du volant.

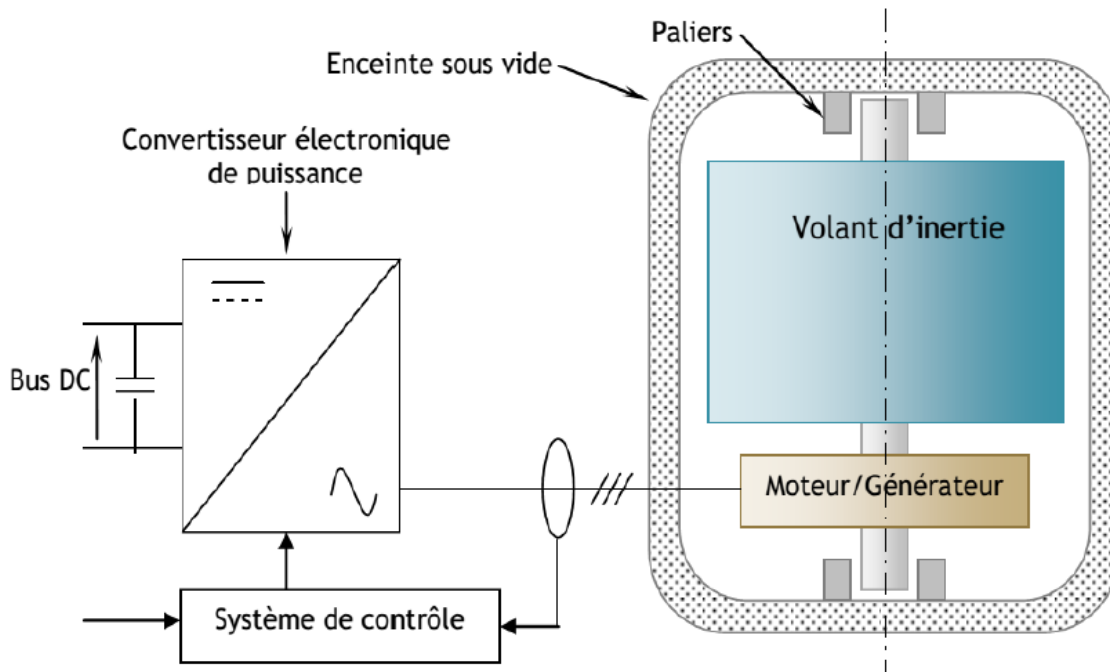


Figure V. 3: principe de fonctionnement de Volant d'inertie [18]

Pour fabriquer un volant d'inertie, on prend par considération les forces centrifuges qui ne peuvent dépasser les contraintes de traction de matériau, donc, le choix du matériau est déterminé par sa résistance et sa vitesse périphérique maximale. Dans le tableau 4. 2, on cite les données des différents matériaux utilisés pour fabriquer un volant d'inertie en forme d'un cylindre vide et mince avec un rayon interne $R_i = 20$ cm, un rayon externe $R_e = 25$ cm et d'épaisseur $h = 40$ cm.

- **Les avantages de ce type de stockage sont:**

- Rendement élevé (peut atteindre 90%)
- Phase de stockage très rapide par rapport à une batterie électrochimique
- Temps de réponse très court, permettant de réguler la fréquence du réseau
- Aucune pollution : ni combustible fossile, ni produits chimiques
- Technologies simples, fiabilité et peu d'entretien

- **Ses inconvénients sont:**

- Temps de stockage limité (environ 15 minutes).

Durée d'utilisation faible (durée de récupération d'énergie est de 15 à 30 min).

- Risque des forces centrifuges dues à des vitesses de rotation importantes

Tableau V. 2: Matériaux utilisés pour fabriquer un volant d'inertie [19]

Materiau	Fibre kevlar	Fibre de carbone	Fibre de verre	Alliage de titane	Acier de grande résistance	Alliage d'aluminium
Masse volumique (kg/m ³)	1800	1500	2000	4500	7800	2700
Résistance à la rupture (MN/m ²)	4800	2400	1600	1215	1300 à 2100	594
Vitesse maximal (m/s)	1633	1265	894	519	400 à 520	470
Densité énergétique (Wh/kg)	148.7	89.3	44.6	15.1	8.9 à 15.1	12.2

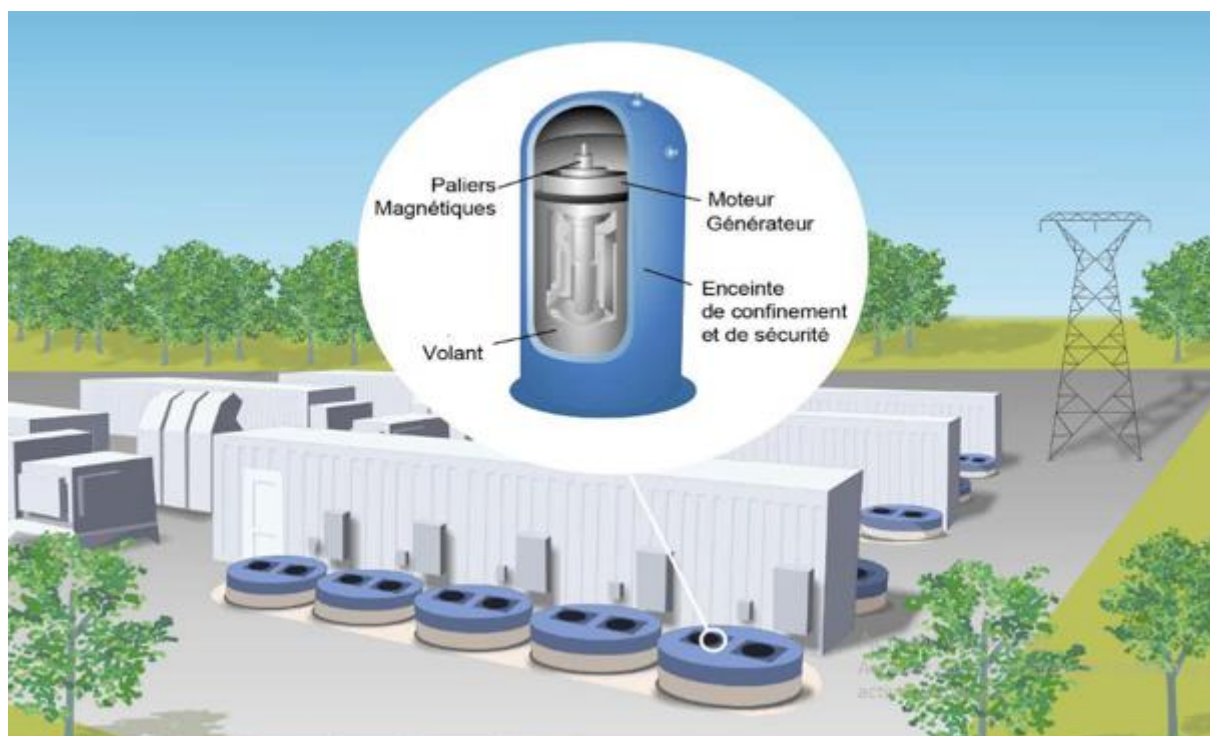


Figure V. 4 Volant d'inertie

V.4.1.3 Air comprimé

Cette technique est basée sur la compression de l'air dans une enceinte (énergie stockée sous forme d'air à sous pression) qui peut être utilisé pour produire un travail mécanique. L'air est stocké soit dans de grande cavités géologiques (mines de sel, voir figure 4.3), soit dans des petites enceintes, dans des bouteilles ou réservoirs (compresseurs utilisés dans la menuiserie, voir figure 4.4).

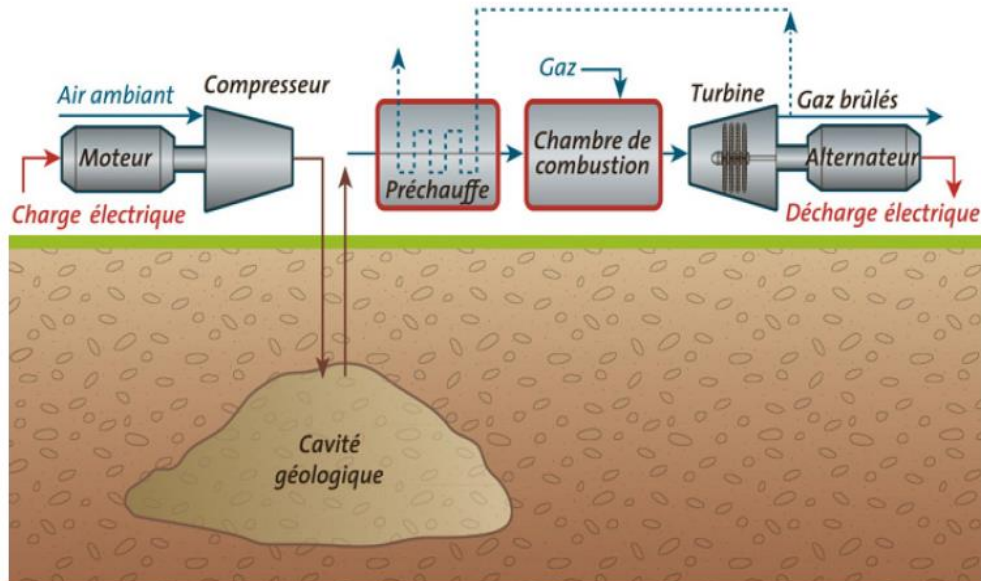


Figure V. 5 : Centrale électrique couplée avec une cavité géologique d'air comprimé [20]

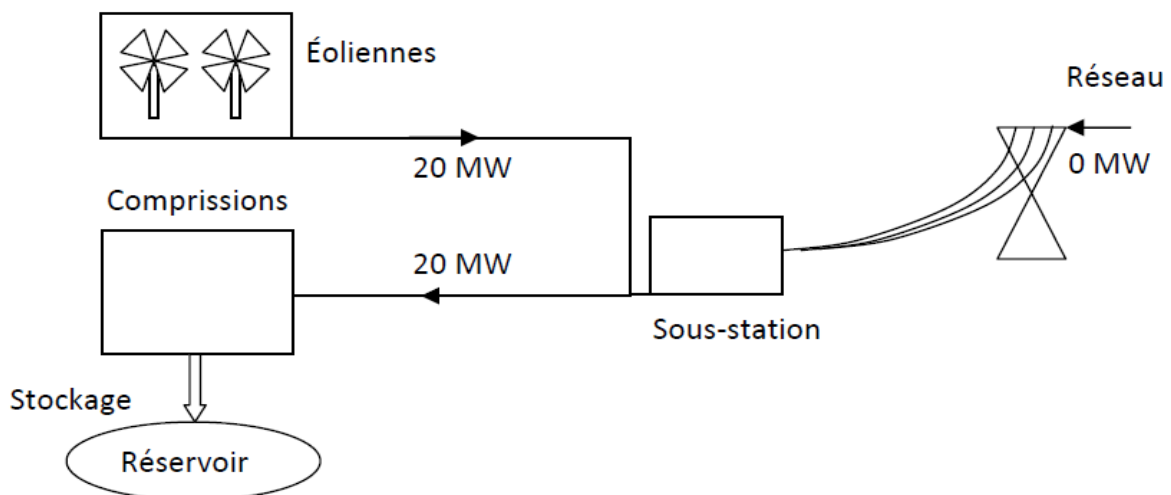


Figure V. 6 : Compresseurs avec un petit réservoir utilisé dans la menuiserie, ..., etc. [21].

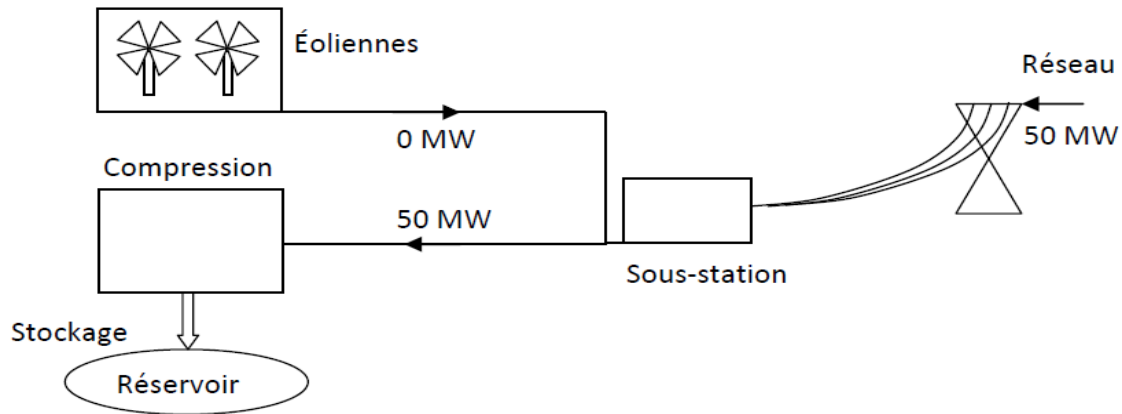
Pendant les périodes où il y a une forte demande d'électricité, on utilise l'air qui a été précédemment comprimé vers 200 bars et stocké pour mettre en mouvement une turbine à gaz. Cette énergie est améliorée en chauffant l'air dans une chambre de combustion avant de le restituer sous forme électrique grâce à un alternateur. (Voir Fig. IV.3).

- **Couplage air comprimé/éolienne**

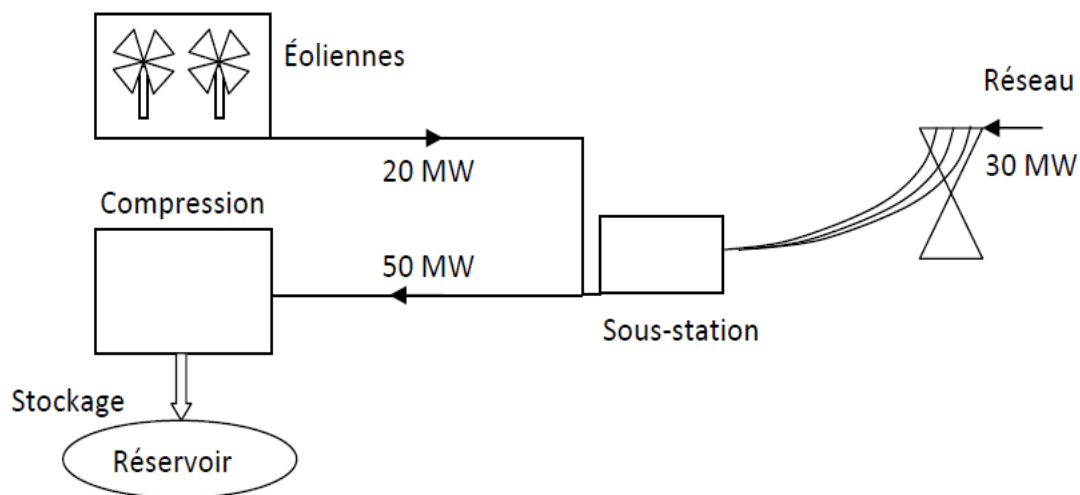
On peut réaliser une centrale flexible en associant une source de l'air comprimé avec une éolienne. Cette centrale peut être utilisée d'une manière quasi-permanente et bénéficiant du faible coût de fonctionnement de l'éolienne. La compression d'air (phase de stockage) est effectuée par l'un des trois différentes manières suivantes [22]:



- Compression : réseau utilisé pour comprimer l'air sans utiliser l'éolienne:

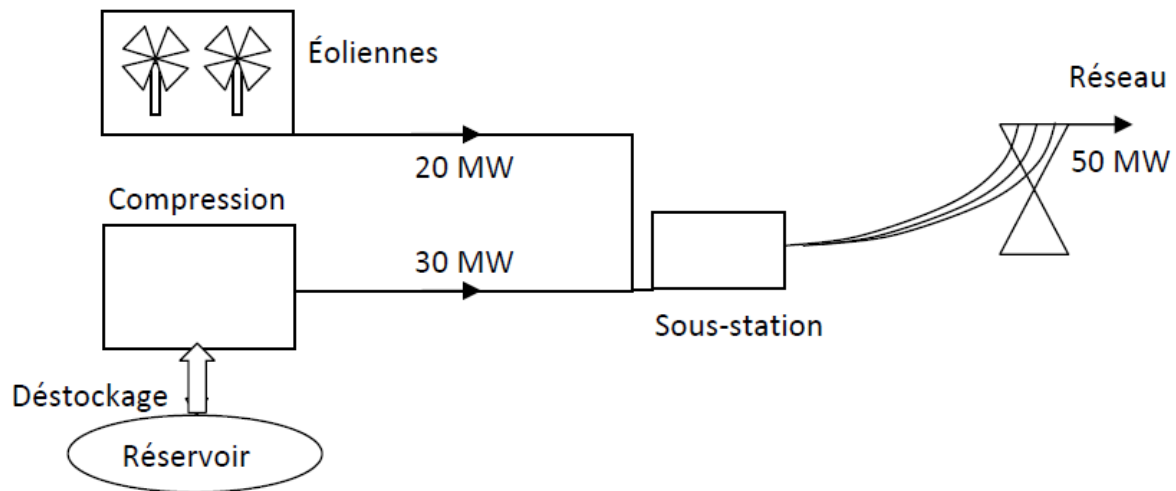


- Compression : réseau et l'éolienne utilisés pour comprimer l'air:



La génération de l'énergie est effectuée par la récupération d'énergie stockée dans l'air comprimé (phase de déstockage) plus l'énergie produite par les éoliennes, donc l'éolienne et l'air comprimé alimentent le réseau.

- Génération ; réseau et l'éolienne utilisés pour alimenter le réseau



- **Avantages et inconvénients**

Cette technique a des avantages importants, on en cite :

- faible coût;
- pas de pollution pour les échappements d'air et les fuites ;
- utilisation idéale en milieu explosif ;
- capacité de refroidissement ;
- peu sensible aux grands écarts de température (cas des forges et fonderies) ;
- peu sensible aux vibrations ;
- plus sécurisant que l'emploi de l'électricité.

Comme on a des avantages, cette technique a aussi des inconvénients dignes de mentionner

- difficulté d'obtenir des puissances constantes du fait de la compressibilité de l'air et des variations de pression lors de sa détente ;
- bruit des échappements ;
- opération de la compression n'est pas gratuite

V.4.2 Stockage électrochimique et électrostatique (batteries)

V.4.2.1 Définition

Une batterie c'est un dispositif capable de fournir une énergie électrique à partir d'une réaction chimique d'oxydoréduction. Ce type de stockage d'électricité est largement utilisé dans l'industrie, dans les équipements des véhicules automobiles. Une batterie est composée d'un ensemble d'accumulateurs électroniques en série où chacun ayant trois constituants de base (Fig. 4.5) :

- L'électrode négative (l'anode) : qui fournit les électrons au circuit extérieure par la réaction de réduction est généralement c'est un métal ;
- L'électrode positive (cathode) : qui accepte les électrons de circuit extérieur par la réaction de l'oxydation est généralement c'est un oxyde métallique ;
- L'électrolyte (siège de réaction électrochimique) : c'est un conducteur ionique de conductivité nulle pour les électrons, le passage du courant est assuré par le déplacement des ions sous l'effet du champ électrique résultant entre les deux électrodes, généralement c'est une solution aqueuse ;
- Séparateur (membrane séparatrice) : perméable à l'électrolyte.

V.4.2.2 *Principe de fonctionnement :*

Les réactions chimiques sont spontanées dans un accumulateur et mettent en jeu deux couples d'oxydoréduction de potentiels différents (cathode et l'anode). Durant la charge de l'accumulateur (phase de stockage), l'électrode positive (cathode) est le siège d'une réaction d'oxydation du couple de plus faible potentiel. Par contre, l'électrode négative (anode) est le siège d'une réaction de réduction de couple de plus haut potentiel. Durant la décharge (phase de déstockage) le phénomène s'inverse l'électrode positive se réduit tandis que l'électrode négative s'oxyde.

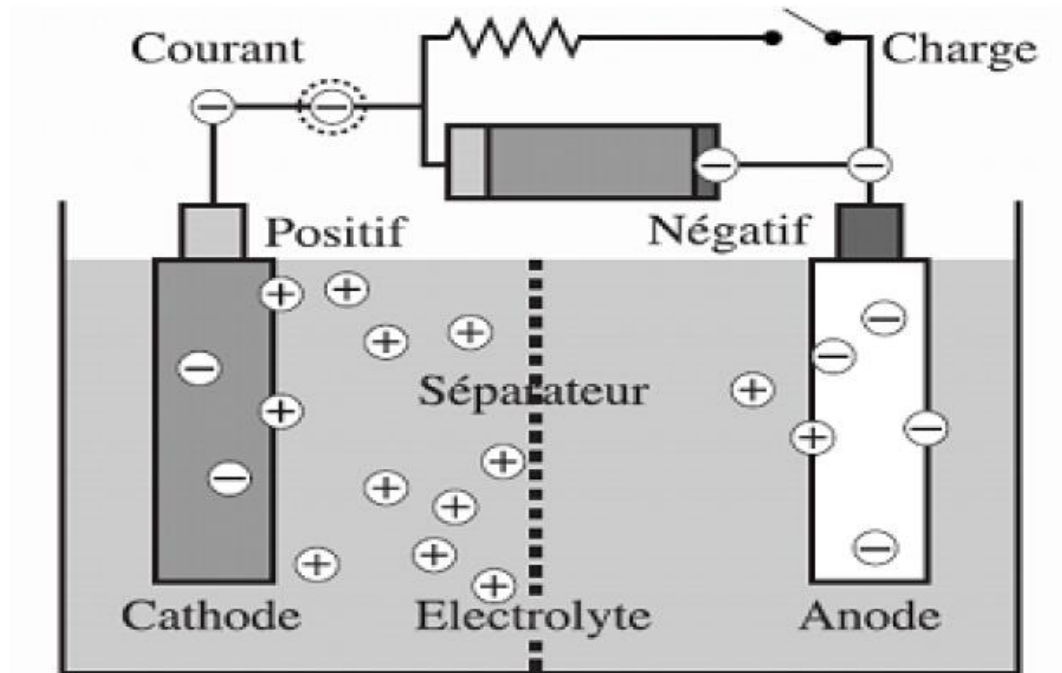


Figure V. 7 : Schéma représentative un accumulateur électrochimique [23]

V.4.3 Technologies

Il existe diverses technologies d'accumulateurs électrochimiques, accumulateur au plomb, Accumulateur au nickel et accumulateur au lithium.

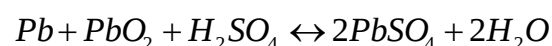
a- Accumulateur au plomb-acide

L'accumulateur au plomb acide a été inventé par Gaston Planté en 1839. On distingue différentes technologies d'électrodes (plaque plane ou plaque tubulaire) et d'électrolyte (liquide ou gélifié).

Composition électrochimiques

- Electrode négative : Pb
- Electrode positive : PbO₂
- Electrolyte H₂SO₄ : (acide sulfurique)

Réaction électrochimiques



Pour ce type des accumulateurs (au plomb), il est très intéressant d'éviter une décharge supérieure de 80% pour d'éviter le phénomène sulfatation de l'accumulateur (accumulation de

sulfate sur l'électrode qui empêche la réaction sur l'électrode). On donne dans le tableau suivant les caractéristiques d'un accumulateur plomb-acide :

Tableau V. 3: Caractéristiques d'un accumulateur plomb acide [24]

Tension a vide	2-2.1V
Capacité spécifique pratique	7 a 20 Ah/kg
Densité énergétique massique	15 à 40 Wh/kg
Densité énergétique volumique	40 à 100 Wh/dm ³
Durée de vie	200 à 400 cycles en version plaquent 600 à 1000 cycles en version tubulaire
Température d'utilisation	De -20°C à +60 °C
Rendement faradique global	Entre 85 et 90%
Autodécharge	0.5% par jour

L'avantage de l'accumulateur au plomb est son faible coût. Ses inconvénients sont :

- Une faible densité énergétique massique (car sa masse est élevée) ;
- Un faible courant de charge ;
- L'utilisation d'un liquide corrosif ;
- La nocivité due au plomb.

b- Accumulateur au nickel

Il existe plusieurs types d'accumulateur au nickel on en cite :

b.1. accumulateur Nickel-Cadmium

- composition électrochimique
- électrode négative Cd (solide)
- électrode positive NiO(OH) (solide, hydroxyde de nickel)
- électrolyte KOH (solution alcaline de potasse)

Réaction électrochimique

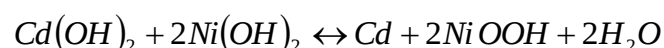


Tableau V. 4: Caractéristiques d'un accumulateur Nickel-Cadmium [24]

Tension à vide	1.25 – 1.3 V
Capacité spécifique pratique	30 à 50 Ah/kg
Densité énergétique massique	30 à 60 Wh/kg
Densité énergétique volumique	80 à 160 Wh/dm ³
Durée de vie	500 à 1000 cycles quant la décharge est 100% à chaque cycle. 500 à 10000 quant la décharge est 25% à chaque cycle
Température d'utilisation	Stockage -20°C à +45 °C Charge 0°C à +45 °C Décharge -20°C à +60 °C
Rendement faradique global	Entre 75 et 80%
Autodécharge	2% par jour

Les avantages des accumulateurs Ni-Cd sont :

- Une grande capacité
- De bonnes performances à faible température
- Un bon niveau de fiabilité
- Une durée de vie élevée
- Une charge complète rapide de l'ordre de 15 min
- Possibilité de la récupération de toute l'énergie stockée (décharge complète)

Ses inconvénients sont les suivants

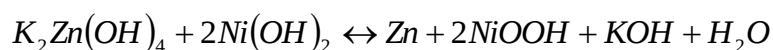
- Batterie très chère (coût environ de 1.5 fois plus chère que la batterie au Pb)
- Toxicité due au Cd.

b.2. Accumulateur Nickel-Zinc

L'accumulateur Ni-Zn a été développé en 1930, sa composition électrochimique est :

- Électrode négative Zn
- Électrode positive NiO(OH) (solide, hydroxyde de nickel)
- Électrolyte KOH (solution alcaline de potasse)

Réaction électrochimique



Les caractéristiques d'un accumulateur Ni-Zn sont données dans le tableau suivant :

Tableau V. 5: Caractéristiques d'un accumulateur Nickel-Zinc [24]

Tension à vide	1.7 V
Capacité spécifique pratique	45 Ah/kg
Densité énergétique massique	60 à 70 Wh/kg
Densité énergétique volumique	120 Wh/dm ³
Durée de vie	600 à 1000 cycles
Température d'utilisation	-20°C à +60 °C

Les avantages de l'accumulateur au Ni-Zn sont :

- Son coût moins cher que Ni-Cd
- Une tension d'utilisation 25% supérieure à celle de Ni-Cd
- Fiable

Son principal inconvénient, c'est qu'il présente une faible durée de vie.

c- Accumulateur au lithium

Pour les accumulateurs au lithium, on distingue quatre technologies selon la construction de l'électrode négative et la composition de l'électrolyte. On résume ces technologies dans le tableau suivant :

Tableau V. 6 Technologies d'accumulateur au lithium

technologie	Li-métal	Li-ion	Li-métal polymère	Li-métal polymère ou plastique
Electrode négative	Lithium métallique	Matériau à insertion de Li	Lithium métallique	Matériau à insertion de Li
électrolyte	liquide	Liquide	polymère	polymère

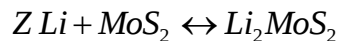
c-1. Accumulateur lithium-métallique

Les batteries basées sur la technologie lithium-métallique ont été exploitées dans les années 1980. Leur composition électrochimique est :

- Electrode négative : lithium métallique (Li) ;

- Electrode positive : composée d'insertion de lithium, ce qui permet aux ions lithium Li^+ de passer d'une électrode à l'autre ;
- Electrolyte : l'électrolyte est une solution d'un sel de lithium dans un solvant organique ou un sel de LiAsF_6 (n'est pas aqueux car le lithium est très réactif vis-à-vis de l'eau).

Réaction électrochimique (avec une cathode à base de sulfure de molybdène) :



Durant la charge, électrode positive (cathode) est le siège d'une oxydation. Les ions Li^+ traversent l'électrolyte et vont à l'anode (ou électrode négative) où ils se soumettent une réduction. Les électrons produits lors de la réduction alimentent alors le circuit électrique extérieur et durant la décharge, la réaction s'inverse. A l'électrode négative, il y a donc insertion de l'ion lithium lors de la décharge et désinsertion lors de la charge.

Les inconvénients de l'accumulateur lithium-métal sont :

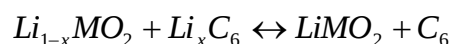
- problème de sécurité due aux dendrites qui peuvent provoquer une instabilité jusqu'à l'emballement thermique ;
- phase de charge relativement lente.

c-2. Accumulateur lithium-ion

La technologie de l'accumulateur lithium-ion est réalisée en 1991 par Sony. Sa composition électrochimique est :

- Electrode négative : matériau permettant l'insertion de lithium (graphite LiC_6 , coke $\text{Li}_{0.5}\text{C}_6$, titane LiTiS_2 ...etc.) ;
- Electrode positive : un composé permettant l'insertion ou la désinsertion de l'ion Li^+ , (oxydes de métaux de transition lithiés LiCoO_2 , LiNiO_2 et LiMn_2O_4 ;
- Electrolyte : un liquide qui n'est pas aqueux et qui ne peut contenir ou fournir des protons pour éviter de dégrader les électrodes très réactives (LiPF_6)

Réaction électrochimique : (M est un métal, pouvant être Ni, Co ou Mn par exemple)



La technologie d'un accumulateur Li-ion est la même que celle-ci d'un accumulateur Li métal sauf que l'électrode négative est également un composé d'insertion, empêchant le contact direct du Lithium à l'état métal avec l'électrolyte.

Les avantages de l'accumulateur Lithium-ion sont :

- une densité énergétique massique très élevée (de 2 à 5 fois que celle pour Ni-MH) ;

- un faible encombrement ;
- une faible autodécharge.

Ses inconvénients sont les suivants :

- sécurité (échauffements qui peuvent conduire à l'explosion) ;
- coûteuses.

c-3. Accumulateur lithium- Li-métal polymère

L'accumulateur Lithium-métal Polymère (LMP) remplace les accumulateurs Li-ion afin de résoudre les problèmes en termes de sûreté de fonctionnements provoqués par l'électrolyte liquide. La composition électrochimique de ce type d'accumulateur est :

- Electrode négative : Li sous forme de films fins métalliques ;
- Electrode positive : composé d'insertion réversible (exemple : l'oxyde de vanadium V_6O_{13} , LiV_3O_8 ou TiS_2) ;
- Electrolyte : membrane polymère POE-LiX (poly-oxyde d'éthylène chargé en ions lithium) associée à un solvant aprotique liquide.

Pour assurer un fonctionnement optimal de ce type d'accumulateur, il devrait maintenir l'électrolyte à la température de 80 à 100°C.

Les avantages de l'accumulateur LMP sont les suivants :

- une faible masse ;
- performances spécifiques élevées ;
- autodécharge : 10% par mois ;
- une longue durée de vie (ordre de 10 ans) ;

permet d'éviter des problèmes de sécurité que l'on peut enregistrer pour les accumulateurs à électrolytes liquides.

Ses inconvénients sont :

- un risque de dendrites associé à l'électrode de lithium.

c-3. Accumulateur lithium- Li-ion polymère

La technologie de ce type d'accumulateur (Lithium-ion Polymère) est basée sur l'insertion de lithium pour les deux électrodes.

Composition électrochimique

- Electrode négative : idem Li-ion
- Electrode positive : idem Li-ion
- Electrolyte : plastifié, constitué d'une matrice poreuse telle que le copolymère PVDF-HFP (polyfluorure de vinylidène et hexafluoropropylène).

Les avantages de l'accumulateur Lithium-ion polymère sont :

- une faible masse ;
- un nombre de cycles élevé ;
- pas d'effet mémoire ;
- une faible autodécharge.

Dans le tableau suivant, on donne une synthèse des caractéristiques (tension à vide et énergie spécifique) des accumulateurs :

Tableau V. 7 : Caractéristiques de différents accumulateurs [24]

type	Pb-acide	Ni-Cd	Ni-MH	Ni-Zn	Li-ion	LMP	LiPo
Tension (V)	2	1.3	1.3	1.7	3.7	3.7	3.7
Energie (Wh/kg)	15-40	30-60	60-90	60-70	90-180	110	120-140

V.4.3 Stockage chimique (hydrogène ou pile à combustible)

Au même titre que les moyens de stockage électrochimique, le stockage par la filière hydrogène nécessite une transformation d'énergie électrique en dihydrogène H_2 puis une deuxième transformation du dihydrogène en électricité (stockage indirect de l'énergie).

Ce système de stockage comprend donc trois composants essentiels qui sont :

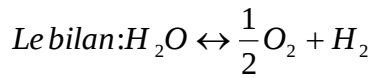
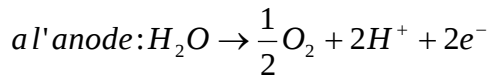
- l'électrolyseur (transformation de l'énergie électrique en dihydrogène) ;
- le moyen de stockage de l'hydrogène ;
- la pile à combustible (permet la génération d'électricité à partir de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air).

V.4.3.1 Electrolyseur

L'électrolyseur permet de transformer l'énergie électrique en dihydrogène par l'électrolyse de l'eau. Il existe deux catégories de l'électrolyseur :

- Solide : où bien un polymère utilisant une membrane échangeuse de proton (PEM : Proton Exchange Membrane) et une céramique haute température (SO : Solid Oxyde).
- liquide, électrolyte acide ou basique du type hydroxyde de potassium (KOH).

Réaction électrochimique en milieu acide :



V.4.3.2 *Moyen de stockage de l'hydrogène*

- Dans les années 1980, une production de masse d'hydrogène avait été envisagée pour stocker de façon indirecte l'énergie électrique. L'idée consistait à profiter des heures creuses de consommation pour faire fabriquer par les centrales nucléaires de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.

Cela présentait l'avantage d'assurer une marche sans contraintes thermiques des équipements de génération de vapeur des centrales nucléaires et à maintenir constante leur production d'électricité.

Ce projet a été rapidement abandonné pour des raisons économiques et technologiques. (à l'époque on ne savait pas reconvertir l'hydrogène en énergie électrique sans utiliser de piles à combustibles).

- Aujourd'hui on sait brûler l'hydrogène dans des centrales électriques spécialement équipées, et l'hydrogène stocké peut être considéré comme un stockage indirect de l'électricité.

Il s'agit de la conversion de l'électricité en hydrogène. En cas de surplus de production, l'électricité est utilisée pour séparer des molécules d'eau (H_2O) en hydrogène (H_2) et en oxygène (O_2) (électrolyse de l'eau). Contrairement à l'électricité, l'hydrogène converti en méthane est stockable sur de longues durées. L'hydrogène ainsi produit peut alors être valorisé de différentes manières :

être injecté dans les réseaux de gaz naturel, en l'état (dans une limite d'environ 20%), ou après avoir été associé à du CO_2 pour le convertir en méthane de synthèse alimenter des véhicules à hydrogène ; être consommé à des fins industrielles ; être reconverti en électricité via une pile à combustible. La conversion en hydrogène est en cours d'expérimentation et montre un intérêt technique.

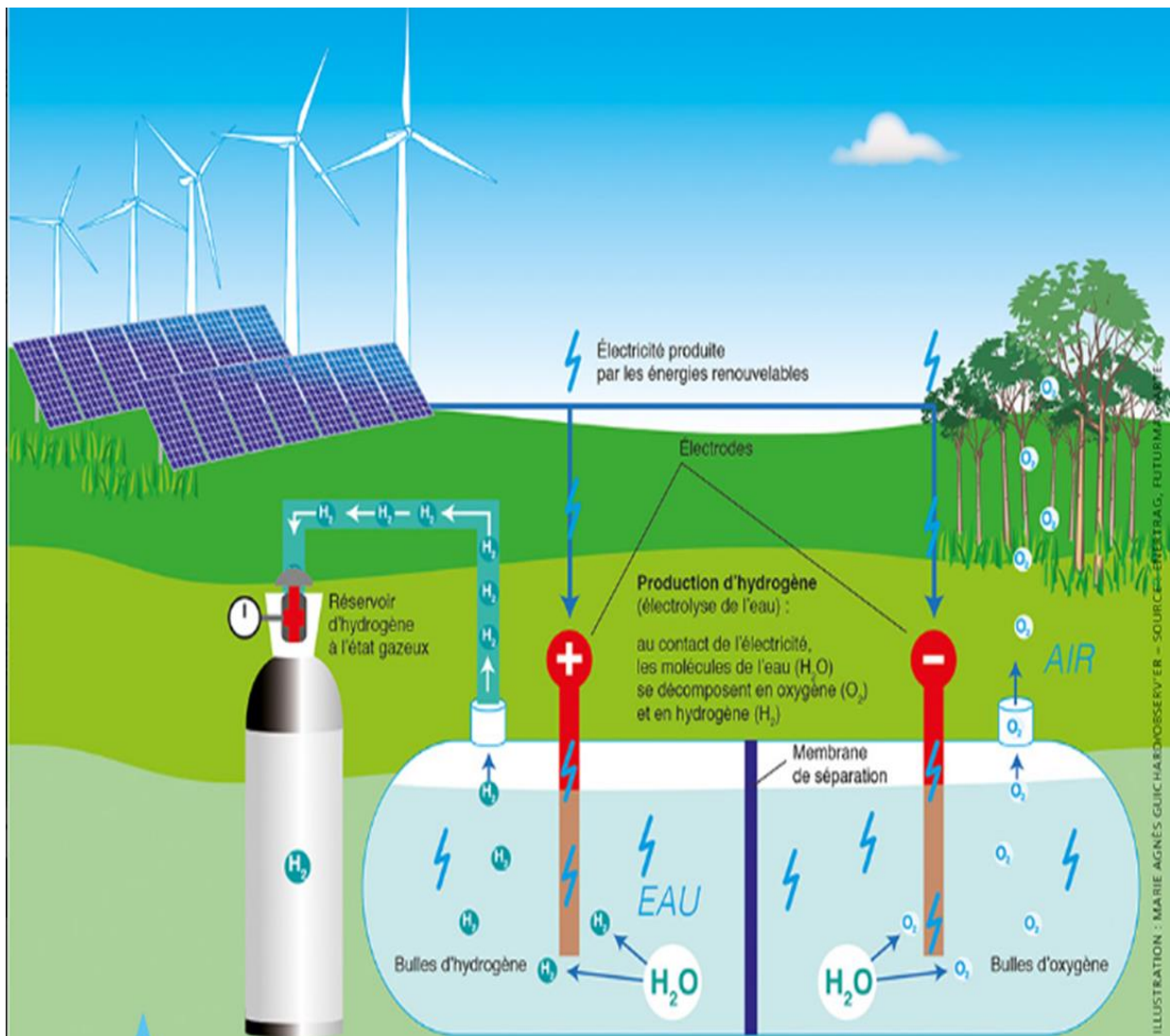


Figure V. 8

Le stockage de l'hydrogène peut être effectué sous plusieurs formes :

- **forme gazeuse** : elle consiste à comprimer le gaz afin de minimiser le volume de stockage ce qui conduit à l'utilisation des réservoirs capables de résister à des pressions allant jusqu'à 700 bar. L'élévation de température due à la compression rapide du gaz nécessite l'emploi des systèmes de refroidissement. Cette façon de stockage consomme environ 10% de l'énergie primaire.
- **forme liquide** : pour maintenir l'hydrogène à l'état liquide il faudra abaisser sa température au voisinage de -253°C ce qui exige donc un équipement cryogénique. Dans ce cas là, l'énergie utilisée pour maintenir l'hydrogène à cette température est de l'ordre de 30% de l'énergie stockée. Ce moyen de stockage nécessite les aspects de sécurité, ainsi que les pertes lors du stockage (autodécharge) doivent être prises en compte.
- **forme solide** : C'est une forme de stockage très complexe qui permet à celui-ci de se stocker entre les atomes d'un métal (ou alliages).

Le stockage de l'hydrogène et sa distribution représente un défi important notamment avec l'existence des contraintes supplémentaires, telles que la haute diffusivité, la très faible densité (forme gazeuse ou liquide), et l'inflammabilité

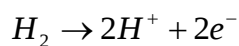
V.4.3.3 4.3.3.3 Pile à combustibles

a- Historique et principe de fonctionnement

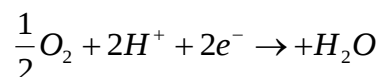
Le premier énoncé de principe de l'électrolyse inverse est lancé en 1802 par Sir Henry David. Cet énoncé met en évidence la possibilité de produire de l'électricité et de la chaleur à partir de la réaction chimique entre le dioxygène et le dihydrogène. En 1839, L'anglais Sir William-Robert Grove réalise la première pile à combustible produisant de l'électricité, de la chaleur et de l'eau en utilisant des électrodes de platine poreux et de l'acide sulfurique comme électrolyte. Bien que leur principe soit connu depuis longtemps (plus de 200 ans) mais les applications sont encore aujourd'hui au stade du développement. Donc, une pile à combustible est un générateur qui convertit directement l'énergie de la combustion de l'hydrogène avec l'oxygène en énergie électrique.

Réaction électrochimique :

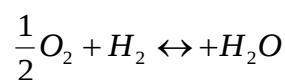
À l'anode, on a donc une oxydation électrochimique de l'hydrogène :



À la cathode, on observe la réduction de l'oxygène



Le bilan global est alors :



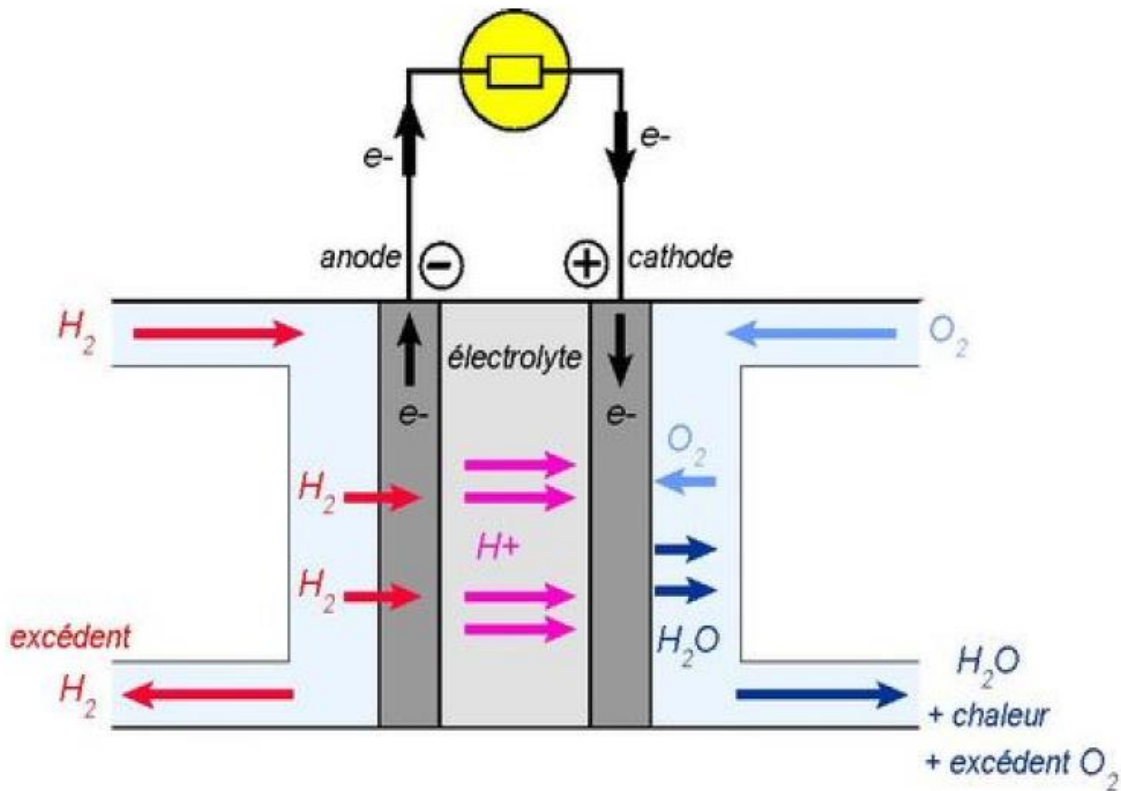


Figure V. 9: Principe de fonctionnement d'une pile à combustible. [24]

b- Différents types des piles à combustibles

Les piles à combustible peuvent être classées selon plusieurs critères qui se sont ; l'électrolyte utilisé, la température de fonctionnement, le dimensionnement et l'application:

- Piles à combustibles à membrane échangeuse de protons (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC*) ; ce type des piles fait l'objet de réalisations dans tous les domaines : stationnaire, automobile et portable.
- Piles à combustibles à oxyde solide (*Solid Oxide Fuel Cell, SOFC*) ; valable dans les applications stationnaires ayant des températures de fonctionnement élevée et du temps de démarrage important. Elle se prête particulièrement bien à la production d'électricité décentralisée et à la cogénération.
- Piles à combustibles à alcaline (*Alkaline Fuel Cell, AFC*) : utilisée comme un générateur d'électricité des sous-marins et dans le domaine des transports (véhicules militaires, taxis hybrides...etc.).
- Piles à combustible à carbonate fondu (*Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC*) : elles sont en concurrence avec les piles à combustible à oxyde solide. Les puissances électriques des

installations actuelles vont de quelques centaines de kilowatts à quelques mégawatts. Les installations de forte puissance forment des centrales électriques. Les installations de puissance moyenne soit utilisées pour alimenter les industries, les bâtiments publics et les bateaux.

- *Piles à combustibles à acide phosphorique (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)* : ce type des piles à combustibles est largement commercialisé. Il est destiné principalement aux applications stationnaires à haute puissance (quelques dizaines de mégawatts) comme les groupes d'habitations ou des bâtiments publics.

Le tableau suivant présente les caractéristiques de différentes technologies des piles à combustibles :

Tableau V. 8 : Caractéristiques des piles à combustibles [23].

Type	Electrolyte	Puissance MW	Température	Rendement
AFC	Hydroxyde de potassium	0.01 a 0.1	60 à 90 °C	60 à 70%
PEMFC	Membrane polymère Nafion-PBI	Jusqu'à 0.5	60 à 220 °C	50 à 70%
PAFC	Acide phosphorique	Jusqu'à 100	Environ de 200°C	55 %
MCFC	Carbonate de métaux alcalins	Jusqu'à 100	Environ de 650°C	55 %
SOFC	Céramique	Jusqu'à 100	800 à 1050 °C	60 à 65 %

c- Avantages et inconvénients des piles à combustibles

Les avantages des piles à combustible sont :

- Elles produisent de bon rendements énergétiques ;
- Elles sont silencieuses ;
- Elles prennent peu de place ;
- Elles peuvent fonctionner à basses et à hautes températures
- Elles permettent une construction modulaire ;
- Elles demandent peu d'entretien ;

- Elles produisent de l'eau et dégagent peu de gaz à effet de serre.

Leurs inconvénients sont les suivants :

- L'inexistence d'hydrogène à l'état nature sur notre planète ;
- Leurs faibles tensions (1 V) nécessitent la mise en série de cellules ;
- La densité du courant reste de l'ordre 1 A.cm² ;
- Coût ; technologie très chère (catalyseurs, membrane, collecteur de courant,etc.) ;
- Gestion thermique (étanchéités à haute température).

V.4.3.4.1 Stockage thermique et thermochimique : (chaleur sensible, chaleur latente)

Le stockage d'énergie thermique peut se faire généralement sous forme de chaleur sensible (accompagnée par une variation de température), chaleur latente (changement de phase à température constante).

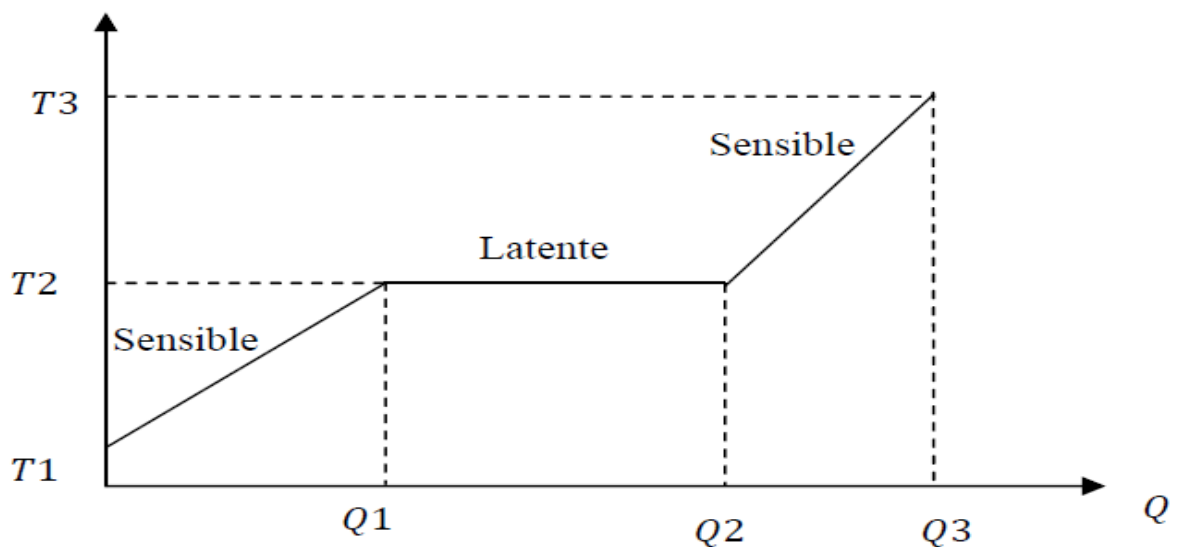


Figure V. 10: Chaleur sensible et latente en fonction de la température

V.4.3.4.1 Stockage par chaleur sensible

Dans le stockage par chaleur sensible, la température du matériau varie avec la chaleur transférée. Si h est l'enthalpie massique du matériau, la variation de la quantité de chaleur Q échangée par le matériau lorsqu'il passe d'un état initial à un état final est

$$Q = m(h_f - h_i) \text{ ou } Q = mC_p (T_f - T_i)$$

Cp est la capacité thermique massique de matériau. Plus la capacité thermique des matériaux est importante, plus il y a possibilité d'emmagasiner un maximum d'énergie. Donc le classement du type de stockage par chaleur sensible dépend du matériau et du milieu de

a- Stockage de chaleur sensible par un fluide

a-1. Stockage par l'eau

Vu la capacité calorifique importante de l'eau (4185 J/kgK à 20 °C, la plus grande par rapport aux autres corps), il représente le meilleur milieu pour le stockage aux faibles températures (25 à 90°C) où il peut stocker 2.5 10⁵ kJ/m³ pour une variation de température de 60°C. De plus, l'eau n'est pas chère et facilement disponible et aussi peu utilisable comme milieu de transport d'énergie.

Réservoir de stockage : pratiquement il y a une compatibilité entre l'eau et plusieurs matériaux pour fabriquer les réservoirs comme l'acier, l'aluminium, le béton, la fibre de verre, etc. et le choix dépend de l'application. Pour l'isolation on utilise généralement la laine de verre, la laine minérale ou le polyuréthane.

a-2. Stockage par les autres fluides

Les liquides utilisés pour le stockage par chaleur sensible sont généralement des huiles organiques ou des sels fondus ayant des capacités thermiques massiques de 25 à 40 % que celle de l'eau. On cite :

- *Les huiles organiques* : elles ont une pression de vapeur plus faible que celle de l'eau elles peuvent être utilisées à des températures supérieures à 300°C mais inférieures à 350°C afin d'éviter leur décomposition.

- *Les sels fondus* : le plus courant est l'hydroxyde de sodium, il a un point de fusion de 320°C et il est possible d'utiliser une température supérieure à 800°C. mais il est fortement corrosif et il est difficile à stocker à fortes températures.

- *Les métaux liquides* : la plupart de leurs propriétés sont similaires à celles de l'eau. Ces liquides ont une grande conductivité thermique.

Réservoirs de stockage : pour éviter la corrosion des réservoirs de stockage due aux sels fondus et aux métaux liquides, l'acier inoxydable 304 est le matériau le plus valable pour ce type de stockage.

b- Stockage de chaleur sensible par un solide

La difficulté due à la grande pression de vapeur d'eau dans le stockage à haute température, conduisent à stocker la chaleur sensible à l'aide d'un solide en éliminant le risques de fuite. Les matériaux utilisés pour le stockage thermique aux faibles et aux hautes températures sont généralement les pierres, les métaux, le béton, le sable et la brique.

La récupération d'énergie thermique se faisant à l'aide d'un flux d'air (convection), la taille des pierres est alors un facteur de choix important (surface d'échange). Les pierres et le béton peuvent stocker de l'ordre 36 kJ/kg ou 105 kJ/m³.

Sur la figure suivante on compare les volumes nécessaires au stockage d'une même quantité d'énergie thermique pour un même écart de température par trois types de corps.

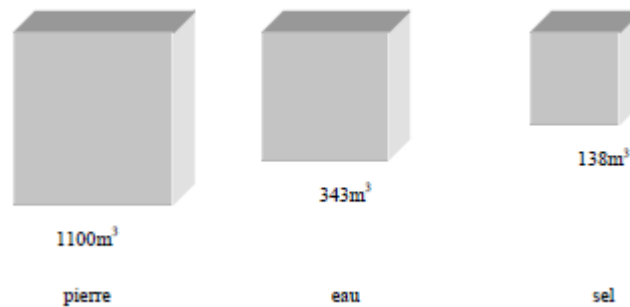


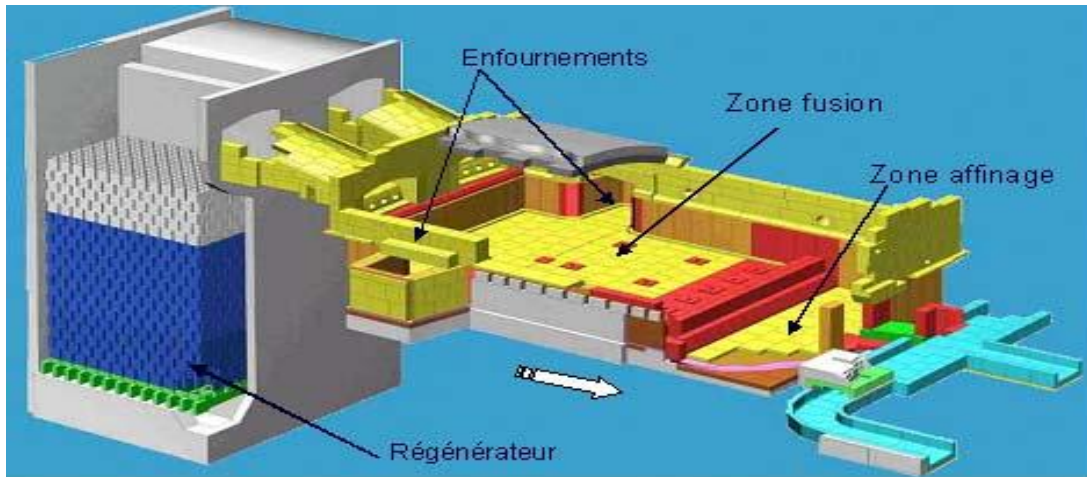
Figure V. 11 : Comparaison des volumes nécessaires au stockage d'une même quantité d'énergie thermique pour différents matériaux.

Technologie de stockage de chaleur par un solide

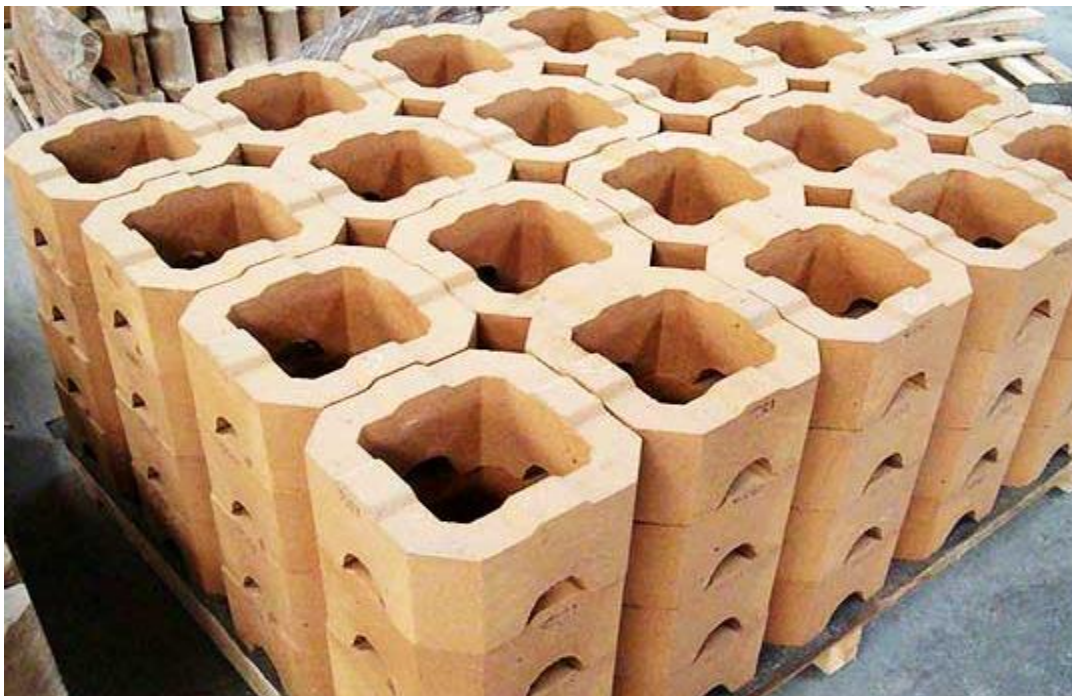
- Régénérateurs des fours à flammes

On trouve l'application de ce type de stockage dans les industries qui contiennent des fours à brûleurs (dites aussi fours à flammes), en particulier, les fours de verreries qui sont la plupart du temps équipés d'un dispositif de recyclage de l'énergie de la combustion par un système de régénérateur afin d'augmenter le rendement thermique des fours. Un régénérateur (voir figure 4.9 : (a)) est composé généralement de deux empilages de briques réfractaires traversés par de nombreux canaux vides. En phase de stockage, les gaz chauds de combustion qui proviennent du four entrent dans le premier empilage du régénérateur et cèdent leur énergie calorifique aux briques de l'empilage. Pendant ce temps, de l'air froid est amenée dans le deuxième empilage chauffé au cours du cycle précédent pour restituer l'énergie calorifique

(phase de déstockage); cet air qui sort chaud de l'empilage est utilisé pour assurer une bonne combustion du carburant. Donc, la phase de stockage et celle de déstockage sont effectuées en même temps.



(a) Four de verre à régénérateurs [25]



(b) Briques réfractaires [26]

Figure V. 12 (a) Four de verre à régénérateurs, (b) Briques réfractaires

- Technologie du mur de TROMBE

La technologie du mur de TROMBE est une installation de captage de l'énergie solaire utilisée dans les domaines de l'habitat pour réduire sa consommation énergétique. Cette technologie est constituée d'un mur plein vertical peint en noir, souvent en béton, exposé au sud afin de recevoir un ensoleillement maximal durant la journée (voir figure 4.10). Ce mur est muni de deux orifices appelés « clapets » permettant la circulation de l'air par convection naturelle entre le local froid et l'espace chaud formée par la surface réceptrice du mur et le vitrage qui va capturer la chaleur émise par le soleil.

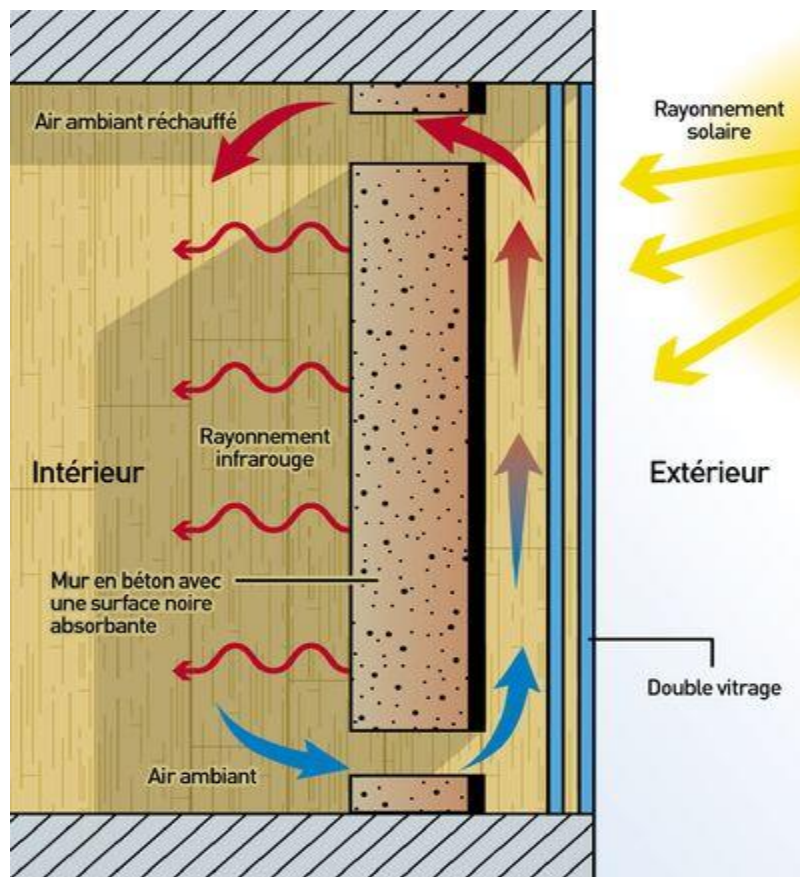


Figure V. 13 : Mur de TROMBE [27]

V.4.3.4.2 Stockage par chaleur latente

Dans ce type de stockage, la chaleur stockée est accompagnée par un changement de phase du matériau (vaporisation, fusion,...etc.) à température constante. Cette température correspondant à la température de la transition de phase. Le stockage par chaleur latente dans les matériaux à changement de phase (MCP) permet de stocker une grande densité d'énergie

Comparativement avec celui par chaleur sensible. Pour donner des ordres des grandeurs, par exemple ; on a besoin de 335kJ pour compléter la fusion de 1kg d'eau en glace à 0°C (chaleur latente) et 4.2 kJ pour augmenter la température de 1Kg d'eau par un degré (chaleur sensible). Alors, l'énergie demandée pour liquéfier 1kg de glace d'eau est 80 fois l'énergie demandée pour augmenter la température par 1°C de la même quantité d'eau liquide. Une autre image, on donne cette figure

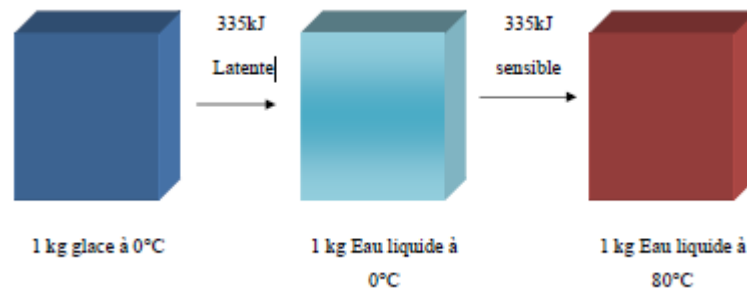


Figure V. 14 : Comparaison entre la chaleur latente et la chaleur sensible

Technologies et matériaux de stockage par chaleur latente

Le stockage sous forme de chaleur latente doit être réservé à des applications qui utilisent directement cette forme dégradée de l'énergie. A titre d'exemple, on en cite :

- Technologie stockage de glace

Cette technique est applicable dans les systèmes de ventilation, chauffage, et air conditionné. Le principe est basé sur le stockage de froid par la congélation d'eau afin de produire la glace. Cette source de froid peut être utilisée (air conditionné) durant les chaudes journées d'été (climatisation).

- Utilisation de MCP dans la construction des bâtiments

Afin d'augmenter l'inertie thermique des parois des bâtiments, l'intégration de MCP dans la construction des ces parois représente la solution la plus moderne. Cette application, consiste à contenir le MCP dans une microcapsule de polymère microscopique (méthode de la micro-encapsulation). Ces microcapsules forment une poudre que l'on peut inclure dans des matériaux de construction. Le matériau le plus séant pour cette application est de la paraffine C21-C50. On donne sur le tableau IV.9 les caractéristiques des certains matériaux à changement de phase.

Tableau V. 9: Caractéristiques des matériaux à changement de phase [28]

	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur latente (kJ/kg)	T chgt. phase (°C)	Densité d'énergie (kWh/m ³)
Eau	1000	2250	100	58
paraffine	820	200	20 a 60	45
Na ₂ S ₂ O ₄ .10H ₂ O	1675	254	32.4	118
CaCl ₂ .6 H ₂ O	-	171	29.7	-
Zn(NO ₃) ₂ 6 H ₂ O	-	147	36.4	-

Critères de sélection d'un MCP

Les principaux critères de choix des matériaux à changement de phase sont les suivants :

- température de fusion adéquate avec l'application ;
- grande chaleur latente de changement de phase;
- grande densité ;
- faible coût ;
- faible dangerosité, compatibilité environnementale ;
- fiabilité et stabilité dans le temps.

V.4.3.5 Nouvelles technologies de stockage d'énergie

Les technologies actuelles pour stocker l'énergie (notamment la chaleur et l'électricité) sont diverses, on cite certaines qui sont en stade de développement ou en industrialisation.

V.4.3.6 Stockage de la chaleur par un fluide artificiel

Récemment (fin 2018), des chercheurs, (en Suède et en Etats-Unis), ont publié des résultats d'une nouvelle technologie pour stocker l'énergie solaire par l'utilisation d'un fluide artificiel [29]. En effet, ce fluide est une molécule sous forme liquide, composée de carbone, d'hydrogène et d'azote, qui permet de capturer l'énergie thermique du soleil, de la conserver pratiquement sans pertes, et de la libérer à la demande. Ce fluide a une particularité intéressante où en phase de stockage (exposé à la chaleur du soleil), La molécule se transforme alors en une nouvelle version énergétique due au changement des liaisons chimiques entre ses atomes, (ce qu'on appelle un isomère baptisé quadri-cyclane). Ainsi

l'énergie thermique du solaire est conservée entre ses liaisons chimiques et reste enfermée même lorsque la molécule se refroidit. À la phase de déstockage (récupération de la chaleur), il suffit de passer le fluide dans un catalyseur pour que la molécule reprenne sa forme initiale, ce changement atomique libère la chaleur solaire prisonnière, provoquant ainsi un réchauffement brutal du liquide (voir figure 4.12). Cette chaleur peut ensuite être récupérée en passant ce fluide dans un échangeur de chaleur et peut être utilisée directement dans les systèmes de chauffage domestique ou d'eau chaude sanitaire.

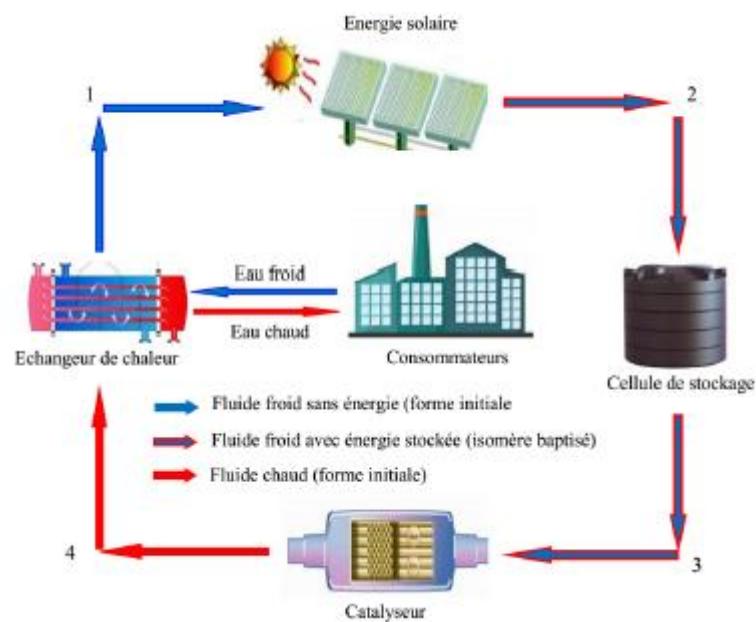


Figure V. 15: Cycle énergétique du stockage de la chaleur par un fluide artificiel [29].

Cette technologie a des nombreux avantages :

- Un temps de stockage presque infini, dans un volume réduit ;
- déperdition d'énergie minimale (beaucoup plus faible que n'importe quel dispositif de stockage) ;
- Rendement élevé (1 kg peut contenir 250 wattheures d'énergie, le double de la capacité énergétique des batteries Power Wall de Tesla).

V.4.3.6 Stockage de l'électricité par batterie Lithium-Ion

Le stockage d'énergie électrique par les batteries Lithium-Ion est toujours considéré la technologie la plus performante et la plus utilisable dans les domaines de stockage

vu la haute densité énergétique de ces batteries (voir figure 4.13). Ces dernières années, des recherches plus intensives se proposent l'amélioration de la technologie des batteries Li-ion. Les performances des nouvelles batteries Li-ion sont les suivantes :

- Peuvent stocker trois à quatre fois plus d'énergie de masse que les autres batteries ;
- Phase de stockage plus vite ;
- Une durée de vie importante (au moins un demi-millier de rechargement à 100 %) ;
- Ils ont les qualités qui les rendent nécessaires à tous les appareils essentiels de notre vie quotidienne

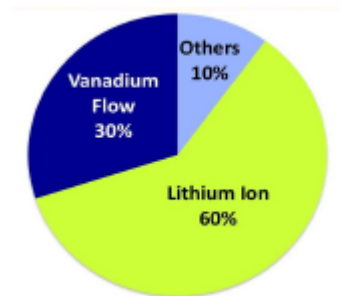


Figure V. 16: Quantité du stockage d'électricité dans différentes technologies des batteries [30].

V.4.3.5.2.1 Domaine d'utilisations des batteries Lithium-Ion

Les domaines d'utilisation des batteries Lithium-ion sont divers, nous les mentionnons :

- *Les appareils électroniques* : où on compte environ de deux milliards de batteries au lithium-ion rien que pour les appareils électroniques et les robots domestiques.
- *La mobilité électrique* : des batteries Lithium-ion performantes sont développées et adaptées aux véhicules électriques (véhicules, engins, machines, trains,...etc.) dans ce domaine on compte environ de un milliard de batteries Lithium-ion utilisées.
- *Eclairage extérieur* : des panneaux photovoltaïques sont combinés avec des batteries Lithium-ion spécifiques permettant en particulier une décharge dans les marges de température de -30 °C à 75 °C afin d'alimenter les lampes de l'éclairage extérieur.

V.4.3.5.3 Hydrogène

Aujourd'hui, l'introduction de l'hydrogène comme vecteur énergétique pour le stockage d'énergie renouvelable à grande échelle, présente le support futur le plus probable selon les scientifiques et les industriels. Dans ce contexte, plusieurs possibilités sont envisagées et profondément étudiées, certaines sont arrivées à maturité technologique et d'autres sont encore au stade du développement. Le grand intérêt de cette technologie du stockage est à cause de :

- Sources principales de production de l'hydrogène (chaleur et électricité) sont faible coût, renouvelables et disponible (voir figure IV.12).
- Cycle de la production de l'hydrogène ne présente aucun danger principal pour l'environnement.
- Réduire la dépendance vis-à-vis des carburants fossiles.
- Représente le carburant qui concentre le plus d'énergie (1 kg d'hydrogène contient 3 fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence).

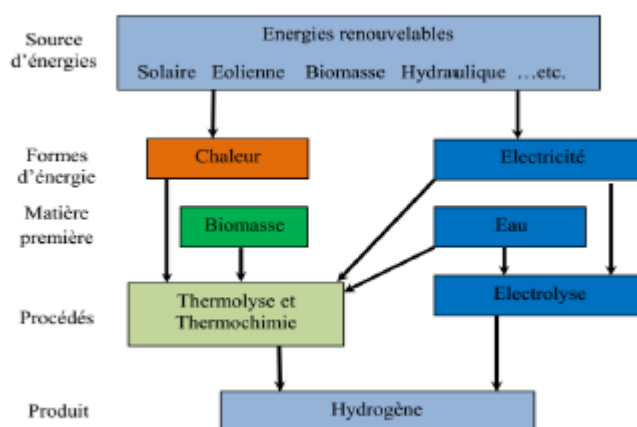


Figure V. 17 : Les modes de production de l'hydrogène.

Domaines d'applications : l'hydrogène représente un vecteur pour la production d'électricité par l'utilisation des piles à combustibles. Cette énergie électrique d'origine hydrogène est utilisée dans plusieurs applications permet ces applications on en cite :

- Transport (véhicules électriques, bus...cet) ;
- Utilisation domestique d'électricité (éclairage, appareils électriques,...cet) ;
- Les appareils électroniques (portable, ordinateur, ...etc.) pour la fabrication de composants électroniques ;

- Usages industriels dans la chimie et le raffinage ;
- Production de chaleur.

V.4.3.6 Coût du stockage d'énergie

L'économie des entreprises de stockage d'énergie est basée sur le coût d'investissement de l'opération stockage/restitution d'énergie où ce coût de cette opération varie d'une technologie à l'autre. Le graphique de la Figure 4. 15 illustre l'état actuel du classement des technologies en termes de coûts par kW, de capacité du stockage (taille des bulles) et de réactivité selon la *Direction Générale de l'Energie et du Climat* (DGEC) et *Electric Power Research Institute* (EPRI). D'après cette figure, on remarque que la technologie des STEP (Stations de Transfert d'Energie par Pompage), est classée en tête de liste des technologies dont son coût d'investissement, ramené à la capacité, est parmi les plus bas et sa durée de vie très longue. Ceci due au fait que la phase de stockage est presque gratuite surtout en hiver (les rivières et les fleuves). Dans la deuxième classe on trouve la technologie de stockage par air comprimé qui a presque le même coût d'investissement que la technologie de STEP mais une capacité moins faible que celle de STEP. Ce faible coût d'investissement est lié avec la simplicité de cette technologie ainsi que la phase de stockage n'est pas coûteuse. La technologie de stockage d'électricité via l'hydrogène présente une capacité énergétique similaire à celle d'air comprimé avec un coût d'investissement triple fois que celui de l'air comprimé due au fait que l'opération de la production/stockage de l'hydrogène est très coûteuse (voir paragraphe 4.3.3.2.). En effet, le stockage par air comprimé et l'hydrogène sont aujourd'hui les deux technologies de stockage les plus prometteuses. Les autres technologies nécessitent davantage d'efforts de recherche, démonstration et développement pour être compétitives pour certaines applications, notamment le stockage électrochimique (batteries) dont les coûts sont encore trop élevés offrant ainsi une faible capacité de stockage

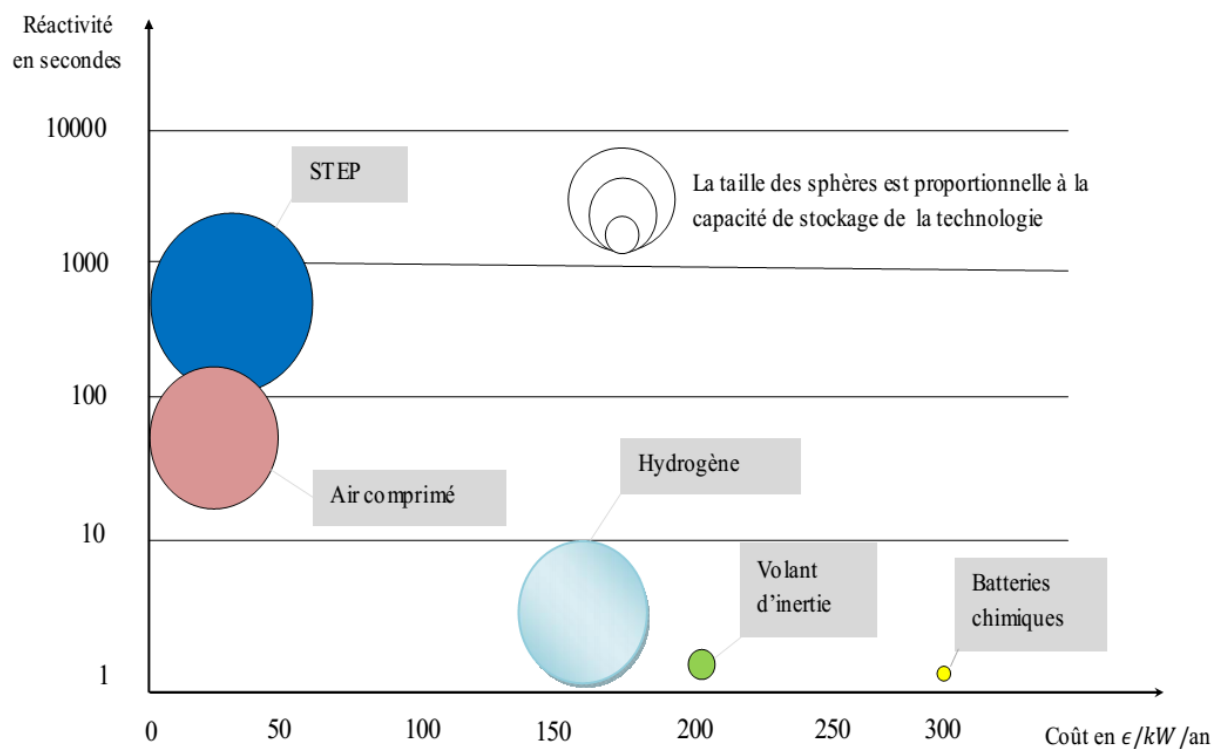


Fig. 4. 15 : Caractéristiques des technologies de stockage, (coût, capacité et réactivité) [31]

STRATÉGIE ÉNERGÉTIQUE 2030

<https://casainvest.ma/fr/j%3Finvestis/strategies-sectorielles/strategie-energetique-2030#:~:text=Strat%C3%A9gie%20%C3%89nerg%C3%A9tique%202030%20La%20nouvelle%20strat%C3%A9gie%20%C3%A9nerg%C3%A9tique%2C%20adopt%C3%A9e,que%20son%20accessibilit%C3%A9%20g%C3%A9n%C3%A9ralis%C3%A9e%20%C3%A0%20des%20co%C3%BBts%20raisonnables.>