الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة حمة لخضر الوادي
Université Hamma Lakhder d'El Oued

Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة الميكانيكية

POLYCOPIE DE COURS

Exploitation des énergies renouvelables

(1er Master Électromécanique)

Dr. AOUN yacine
Maitre de conférences - classe A

Année Universitaire 2023/2024

Préface

En raison de l'importance croissante des énergies renouvelables dans nos sociétés, il est devenu essentiel d'enseigner les principes fondamentaux de ces dernières pour favoriser le progrès des étudiants universitaires dans le domaine de la "science et de la technologie". Ces sources d'énergie non polluantes contribuent à la préservation de l'environnement en réduisant les émissions dangereuses, qu'il s'agisse des gaz à effet de serre ou des substances perturbent la qualité de l'air.

Ce cours, intégré à mon habilitation universitaire, s'adresse essentiellement aux étudiants de première année Master en électromécanique. Son objectif principal est de fournir un large aperçu des différents types d'énergies renouvelables, couvrant leurs sources, leurs technologies et leurs applications. La structure de ce cours se divise en cinq chapitres :

Le premier chapitre est dédié essentiellement à l'introduction aux énergies renouvelables, définissant les types et les sources disponibles.

Le deuxième chapitre se consacre à un type très important d'énergie renouvelable, à savoir l'énergie solaire.

Les troisièmes et quatrièmes chapitres traitent respectivement des énergies éoliennes, hydraulique, géothermique et biomasse, présentant plusieurs applications domestiques et industrielles.

Le cinquième chapitre aborde brièvement les méthodes de stockage d'énergie.

Table de Matière

Table des matières i
Index des figures iv
Liste des tableaux vi
Introduction générale 1

Chapitre I
Introduction aux énergies renouvelables 3
I.1. Introduction 4
I.2. Les énergies renouvelables 4
I.3. Types des énergies renouvelables 5
I.3.1. L'énergie solaire 5
I.3.2. L'énergie hydraulique (hydroélectrique) 5
I.3.3. L'énergie éolienne 5
I.3.4. L'énergie de la biomasse (arbres, plantes, animaux, micro-organismes 5
I.3.5. La géothermie 5
I.4. Gisements et ressources des énergies renouvelables 6
I.4.1. Les ressources Solaires 6
I.4.2. Les ressources éoliennes 8
I.4.3. Les ressources biomasses 8
I.4.4. Les ressources géothermales 9
I.4.5. Les ressources hydrauliques 9
I.5. Conclusion 10

Chapitre II
Exploitation de l'énergie solaire 11
II.1. Introduction 12
II.2. L'exploitation de l'énergie solaire 12
II.2.1. L'énergie solaire thermique 12
II.2.1.1. Les différents types de capteurs solaires thermiques 12
II.2.1.2. Applications 16
II.2.2. L'énergie solaire thermodynamique (CSP) 28
II.2.2.1. Les capteurs cylindro-paraboliques 28
II.2.2.2. Les centrales à tour 29
II.2.2.3. Les concentrateurs paraboliques 29
II.2.2.4. Les concentrateurs linéaires de Fresnel 30
II.2.3. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) 30
II.2.3.1. L'effet photovoltaïque 30
II.2.3.2. Composition d'une cellule PV 34
II.2.3.2.1. Les principales technologies de cellules solaires 34
II.2.3.3. Caractéristique électriques d'une cellule PV 35
II.2.3.4. Les systèmes photovoltaïques 38
II.2.3.4.1. Module solaire ou photovoltaïque 38
II.2.3.4.2. Les différentes installations photovoltaïques 38

II.2.3.5. Domaine d'application 40
II.2.3.5.1. Les applications autonomes 40
II.2.3.5.2. Les applications raccordées au réseau public de distribution d'électricité 40
II.2.3.6. Avantages et inconvénients 41

Chapitre III
Exploitation de L'énergie éolienne 42
III.1. Introduction 43
III.2. L'histoire de l'éolienne 43
III.3. Le vent 43
III.4. Principe de l'aérogénérateur 43
III.5. Les composants de l'aérogénérateur 44
III.6. Les types d'éolienne 46
III.6.1. L'éolienne horizontale 46
III.6.2. L'éolienne verticale 47
III.7. Notions de calculs sur les éoliennes 48
III.8. L'utilisation 49
III.9. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne 50

Chapitre IV
Exploitation d'autres sources renouvelables: hydraulique, géothermique, biomasse 51
IV.1. L'énergie Hydraulique 52
IV.1.1. Introduction 52
IV.1.2. Histoire de l'énergie hydraulique 52
IV.1.3. Les différents types de centrales hydroélectriques 55
IV.1.4. Les différents types de barrages 55
IV.1.5. Les turbines 55
IV.1.6. Les avantages et les inconvénients de la production d'électricité hydraulique 59
IV.1.7. Solutions d'accompagnement 60
IV.2. L'énergie géothermique 60
IV.2.1. Introduction 60
IV.2.2. Les différents types de géothermie 60
IV.2.2.1. La géothermie très basse température 60
IV.2.2.2. La géothermie basse température 63
IV.2.2.3. La géothermie haute/moyenne température 64
IV.2.3. Les différentes applications de la géothermie suivant la température 65
IV.2.4. La production d'électricité géothermique 66
IV.2.5. La disponibilité des ressources géothermiques 66
IV.3. L'énergie de la Biomasse 67
IV.3.1. Définition et catégories 67
IV.3.2. Fonctionnement technique ou scientifique 68
IV.3.3. Procédés de valorisation de la biomasse 68
IV.3.3.1. La voie sèche 68
La voie humide 69
La production de biocarburants 69
IV.3.4. Enjeux par rapport à l'énergie 70
IV.3.5. Zone de présence ou d'application 71

Chapitre V

Stockage, bile à combustibles et hydrogène 72
V.1. Introduction 73
V.2. Le stockage de l'énergie renouvelable 73
V.2.1. Mode de stockage mécanique 73
V.2.2. Mode de stockage électrochimique et électrostatique 75
V.2.3. Mode de stockage thermique 78
V.2.4. Mode de stockage thermochimique 80
V.2.5. Mode de stockage chimique 81
V.2.5.1. Stockage intrinsèque 81
V.2.5.2. Production d'hydrogène 81
V.3. Piles à Combustible 84
V.3.1. Historique 84
V.3.2. Principe de Fonctionnement 84
V.3.3. Les types de pile à combustible 85
V.3.4. Le catalyseur aux électrodes 86
V.3.5. Applications 86
Références bibliographique 89
Résumé

Index des figures

I.1.	Le rayonnement solaire	7
I.2.	Carte du monde de l'ensoleillent moyen annuel	7
II.1.	Capteur plan non vitré	13
II2.	Piscine publique utilisant des capteurs souples	13
II.3.	Installation de production d'eau chaude sanitaire	14
II.4.	Coupe d'un capteur vitré	14
II.5.	Détail d'un capteur solaire sous vide	15
II.6.	Coupe d'un capteur sous vide	15
II.7.	Schéma de principe d'un distillateur solaire à un étage	16
II.8.	Schéma du distillateur solaire DIFICAP du Pr. Le Goff	17
II.9.	Schéma d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur	18
II.10.	Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire monobloc	19
II.11.	Vue éclatée chauffe-eau solaire BP Solar	19
II.12.	Règles d'installation des chauffe-eau solaires monoblocs	20
II.13.	Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire à éléments séparé	20
II.14.	Eléments d'un chauffe-eau solaire à éléments séparés	21
II.15.	Schématisation de la stratification dans un ballon d'eau chaude	21
II.16.	Schéma du réfrigérateur photothermique des Prs Flechon et Godmel	22
II.17.	Schéma du procédé Dannies (d'après IIF)	24
II.18.	Schéma du procédé Lof	24
II.19.	Les séchoirs-Tunnel	25
II.20.	Séchoir solaire direct portatif	26
II.21.	Séchoir solaire serre	26
II.22.	Deux types de séchoirs solaires indirects	27
II.23.	Les capteurs cylindro-paraboliques	28
II.24.	Les centrales à tour	28
II.25.	Les concentrateurs paraboliques	29
II.26.	Représentation schématique des bandes d'énergie d'un solide	31
II.27.	Principe de la cellule photovoltaïque	32
II.28.	Le dopage de type N (négatif)	33
II.29.	Le dopage de type P (positif)	33
II.30.	Composition d'une cellule PV	34
II.31.	Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque	36
II.32.	Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire	37
II.33.	Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée	37
II.34.	Association série	38
II.35.	Association parallèle	38
II.36.	Installations photovoltaïque sur site isolé	39
III.1.	Principe de l'aérogénérateur	44
III.2.	Les composants de l'éolienne	44
III.3.	les équipements électriques de la nacelle	45
III.4.	Schéma d'une éolienne à axe horizontal amont	46
III.5.	Schéma d'une éolienne à axe horizontal aval	47
III.6.	Rotor de Savonius	47

III.7.	Rotor de darrieus	48
III.8.	Tailles des éoliennes et puissance associée	49
IV.1.	Noria à Hama en Syrie	52
IV.2.	Mécanisme des moulins à eau à roue verticale	53
IV.3.	Scie hydraulique de Hiérapolis	54
IV.4.	Moulin à eau avec sa roue à aubes	54
IV.5.	Schéma fonctionnelle d'un centrale hydraulique	56
IV.6.	Barrage de Vassiviere	57
IV.7.	Barrage de Grandval	58
IV.8.	Barrage de Luzège	58
IV.9.	Coupe du globe terrestre	60
IV.10.	Géothermie par captage horizontal	61
IV.11.	Géothermie par captage vertical	61
IV.12.	Géothermie par captage sur eau de nappe	62
IV.13.	Principe d'une pompe à chaleur appliquée à la géothermique	63
IV.14.	Le principe du doublet géothermique	64
IV.15.	Principe l'exploitation énergie géothermique	64
IV.16.	Schéma d'une installation-type de géothermie	65
IV.17.	Schéma de la centrale géothermique de la Bouillante	66
IV.18.	Voies de valorisation de la biomasse	70
V.1.	Schéma de fonctionnement d'une (STEP).	73
V.2.	Principe du AA-CAES	75
V.3.	Schéma d'n batterie à circulation	76
V.4.	Principe d'une batterie à flux	76
V.5.	Exemple de BTES	80
V.6.	Les différentes possibilités de stockage de l'énergie grâce à l'hydrogène	82
V.7.	Fonctionnement d'une pile à combustible	85
V.8.	Présentation du système	88

Liste des tableaux

I.1 Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques 8
IV.1. Les différentes applications de la géothermie ……..... 66

Introduction Générale

Introduction Générale

L'utilisation des sources d'énergie renouvelables par les êtres humains, comprenant l'énergie solaire, éolienne et hydroélectrique, remonte à une période très ancienne. Ces formes d'énergie ont été employées depuis l'Antiquité et ont perduré jusqu'à l'avènement de la "Révolution Industrielle". À cette époque, en raison de la baisse des prix du pétrole, leur utilisation a été délaissée.

Cependant, au cours des dernières années, avec l'augmentation des coûts des combustibles fossiles et des problèmes environnementaux découlant de leur exploitation, on observe un renouveau de l'intérêt pour les énergies renouvelables. Ces dernières sont inépuisables, propres et peuvent être utilisées de manière autonome, c'est-à-dire qu'elles peuvent être exploitées là où elles sont produites. De plus, elles présentent l'avantage de se compléter mutuellement. Par exemple, l'énergie solaire photovoltaïque génère de l'électricité les jours ensoleillés, généralement caractérisés par de faibles vents, tandis que les éoliennes produiront la majeure partie de l'énergie électrique les jours froids et venteux, en présence de nuages.

Chapitre 1
Introduction aux énergies renouvelables

Introduction aux énergies renouvelables

I.1- Introduction

Aujourd'hui, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium (Métal radioactif naturel utilisé dans les usines nucléaires), constitués au fil des âges et de l'évolution géologique.

La limitation de la quantité de ces réserves, la crise successive du pétrole en 1973 et l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays du monde ont conduit les pays industrialisés à chercher et a développer de nouvelles sources d'approvisionnement. La filière nucléaire était déjà lancée, mais son choix à grande échelle peut amener des conséquences graves, surtout a l'environnement, a cause de la pollution et aussi les accidents nucléaires.

L'énergie nucléaire utilise la radioactivité de certains éléments tel que l'uranium pour produire de l'énergie (L'éclatement (fission nucléaire) de certains atomes lourds comme l'uranium ou le plutonium en atomes plus petits libère de la chaleur. Dans les centrales nucléaires, cette chaleur est utilisée pour produire de l'électricité). Cette technique n'a besoin que de très peu de matières premières pour produire une grande quantité d'énergie. Les réserves ne sont donc pas menacées.

Par contre, elle présente un risque environnemental important, car l'énergie nucléaire est également productrice de nombreux déchets radioactifs, extrêmement nocifs (N.B. L'énergie nucléaire n'est pas issue de la matière organique. Elle ne produit pas de gaz à effet de serre (gaz carbonique, ... etc.)).

Les chercheures ont développé une autre forme d'énergie dite « énergie renouvelable, énergie propre ou verte ». Ces énergies renouvelables ont toutes l'immense avantage d'être d'origines naturelles, inépuisables et non polluantes puisqu'elles n'émettent pas de gaz favorisant l'effet de serre, CO_2.

Comme leur nom l'indique, il s'agit de sources qui se renouvellent et ne s'épuiseront donc jamais à l'échelle du temps humain ! Les sources renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et la biomasse.

I.2. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables (EnR en abrégé) sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. L'expression énergie renouvelable est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique.

Les énergies renouvelables sont des énergies primaires inépuisables à très long terme, car issues directement de phénomènes naturels, réguliers ou constants, liés à l'énergie du soleil, de la terre ou de la gravitation. Les énergies renouvelables sont également plus « propres » (moins d'émissions de CO2, moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles.

En d'autres termes, une énergie est dite renouvelable quand, sur une centaine d'années, on n'en consomme pas plus que la nature n'en produit. La plupart des énergies renouvelables proviennent directement ou indirectement du soleil.

I.3. Types des énergies renouvelables:

I.3.1. L'énergie solaire : Elle est utilisée directement par les chauffe-eau solaires (panneaux solaires) et les piles solaires;

I.3.2. L'énergie hydraulique (hydroélectrique) : Cette énergie provient essentiellement du passage de l'eau à travers les barrages. Elle est issue du cycle de l'eau : le soleil provoque l'évaporation de l'eau qui se condense pour former les nuages. La pluie libérée par ceux-ci contribue à la création des cours d'eau qui à leur tour alimentent les barrages. La puissance des centrales hydroélectriques dépend de la vitesse de l'eau et de son débit. L'énergie des marées est une forme d'énergie hydraulique mise à profit dans les usines marémotrices;

I.3.3. L'énergie éolienne : Elle utilise la force du vent. Celui-ci est dû à des différences de pressions atmosphériques locales qui résultent de différences d'échauffement de l'air par le soleil;

I.3.4. L'énergie de la biomasse (arbres, plantes, animaux, micro-organismes): Elle provient de sa combustion. L'énergie solaire permet la croissance de la biomasse à partir de l'eau, du gaz carbonique (CO2) et de l'azote de l'air.

Lors de la combustion de la biomasse (biocarburants compris, biocarburants : combustible d'origine végétale : le maïs, l'huile de colza, la canne à sucre sont transformés en éthanol et deviennent des biocarburants) ou des déchets organiques qui en sont issus, l'énergie solaire est restituée sous forme de chaleur et le CO2 libéré dans l'atmosphère.

I.3.5. La géothermie : L'énergie géothermique est la chaleur fournie par la Terre. Elle provient principalement de la désintégration des éléments radioactifs naturellement présents dans les roches du sous-sol. A la surface de la Terre, cette énergie est en moyenne 10 000 fois plus faible que l'énergie fournie par le soleil.

L'énergie géothermique n'est donc utilisable que dans des zones particulières où elle s'est accumulée. L'énergie géothermique est récupérée sous forme d'eau chaude (sources thermales, puits artésiens,

geysers). Son utilisation la plus répandue est le chauffage (habitations, serres, etc.) efficace avec de l'eau à température modérée (à partir de 15 ou 20° C).

La production d'électricité par géothermie demande une eau beaucoup plus chaude (plus de 150° C). Elle ne se rencontre qu'au voisinage des zones volcaniques actives (en Guadeloupe ou en Islande par exemple).

En réalité, L'énergie géothermique n'est pas une énergie renouvelable. Lorsqu'ils sont exploités, les gisements d'eau chaude se tarissent ou se refroidissent.

I.4. Gisements et ressources des énergies renouvelables

Ce sont des flux d'énergie sous différentes formes (chimique, mécanique, rayonnement…) disponibles partout dans des proportions variables. Ces sources d'énergie représentent elles aussi des quantités d'énergie considérables, mais elles sont plus difficiles à appréhender car sauf exception elles sont difficilement stockables, aléatoires et diffuses. Elles sont disponibles via les éléments naturels
que sont le soleil (énergie solaire), le vent (énergie éolienne), la terre (énergie géothermique), l'eau (énergie hydraulique), et la biomasse. Majoritairement utilisées il y quelques siècles, leur usage a été délaissé au cours du XXème siècle pour des raisons pratiques et mercantiles. Avec l'épuisement des ressources fossiles combiné à la problématique du réchauffement climatique, elles connaissent un regain d'intérêt.

Les énergie renouvelables sont caractérisées par une faible densité d'énergie, des difficultés de
stockage, un usage pas ou peu polluant (sous conditions), une bonne disponibilité géographique, et des réserves virtuellement inépuisables. Ce sont des énergies de flux.

I.4.1. Les ressources Solaires

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du Soleil. Elle se propage dans le Système solaire et dans l'Univers sous la forme d'un rayonnement électromagnétique de photons.

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

l'énergie solaire envoyée par le Soleil (fluctuations décennales, saisonnières,
et ponctuelles).

- la nébulosité (nuages, brouillards, etc.), qui varie énormément d'un endroit à un autre. Celle-ci est forte à très forte dans les régions océaniques tempérées et subpolaires ainsi que dans les régions équatoriales alors qu'elle est faible à très faible dans les régions arides subtropicales ou polaires.
- la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du Soleil et donc sur l'énergie reçue au sol par unité de surface, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat local.

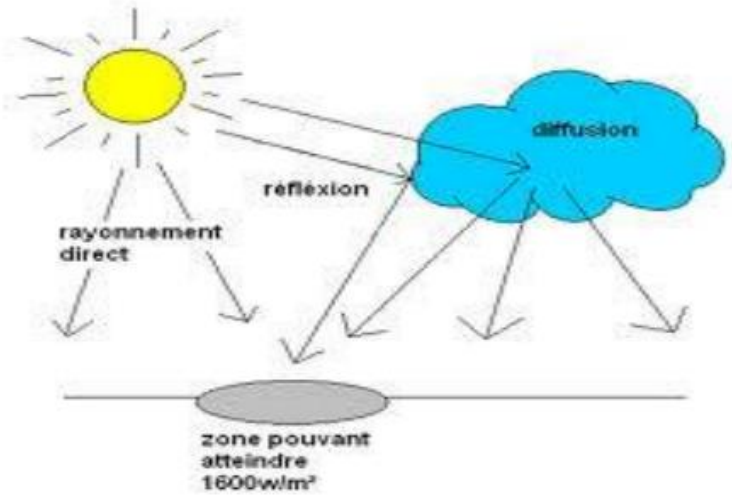


Figure I.1: Le rayonnement solaire.

Globalement la Terre reçoit en permanence une puissance de 170 millions de gigawatt (1,7×1017 joules par seconde), dont 122 sont absorbés alors que le reste est réfléchi. L'énergie totale absorbée sur une année est donc de 3 850 zettajoules (1021 joules, ZJ) ; par comparaison, la photosynthèse capte 3 ZJ, le vent contient 2,2 ZJ, et l'ensemble des usages humains de l'énergie, 0,5 ZJ dont 0,06 ZJ sous forme d'électricité.

I.4.1.1. Le gisement solaire en Algérie : Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement Solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre dans la figure I.2

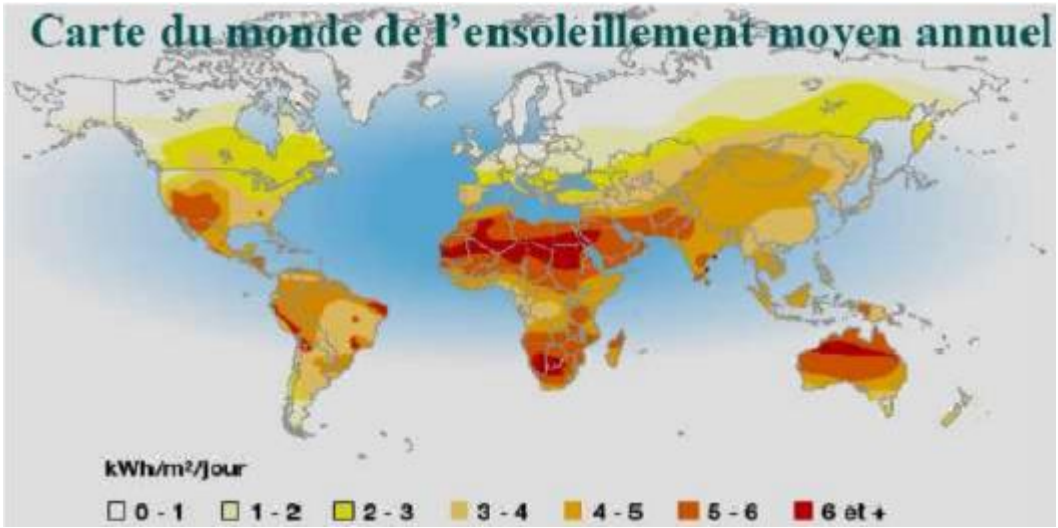


Figure I.2: Carte du monde de l'ensoleillent moyen annuel

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau 2 selon l'ensoleillement reçu annuellement**:**

Tableau I.1 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m2/an)	1700	1900	2650

La durée d'insolation dans le sahara Algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale.

I.4.2. Les ressources éoliennes

La notion de potentiel éolien désigne la quantité théorique d'énergie éolienne disponible sur un territoire (terrestre ou marin) donné. Il est lié à la force et surtout à la régularité des vents qui ne doivent être ni trop forts, ni trop faibles.

I.4..3. Les ressources biomasses

Les ressources biomasses font référence à la matière organique d'origine végétale ou animale utilisée comme source d'énergie renouvelable. La biomasse peut être transformée en divers produits énergétiques tels que la biomasse solide (comme le bois et les déchets agricoles), les biocarburants liquides (comme le biodiesel et l'éthanol) et le biogaz.

Voici quelques-unes des principales ressources biomasses utilisées à des fins énergétiques :

1. **Bois et déchets forestiers :** Le bois est l'une des sources de biomasse les plus anciennes et les plus couramment utilisées. Il peut être brûlé directement pour produire de la chaleur ou transformé en pellets ou en briquettes pour une combustion plus contrôlée. Les déchets forestiers et les sous-produits de l'industrie du bois peuvent également être utilisés comme biomasse.

2. **Résidus agricoles :** Les résidus agricoles, tels que les pailles de céréales, les tiges de maïs et les coques de riz, peuvent être utilisés comme biomasse pour la production d'énergie. Ces résidus sont souvent brûlés pour générer de la chaleur ou transformés en biocarburants.
3. **Déchets municipaux solides :** Les déchets organiques provenant des ménages, des jardins et des industries peuvent être utilisés comme biomasse. Ces déchets peuvent être compostés pour produire du compost ou utilisés dans des installations de biogaz pour produire du méthane.
4. **Biogaz :** La digestion anaérobie des déchets organiques, tels que les déchets alimentaires, les effluents agricoles et les boues d'épuration, peut produire du biogaz. Le biogaz est principalement composé de méthane, une source d'énergie utilisable pour la production d'électricité et de chaleur.
5. **Biocarburants :** Les biocarburants liquides, tels que le biodiesel et l'éthanol, sont produits à partir de matières premières biologiques telles que les cultures énergétiques, les résidus agricoles et même certaines algues. Ces biocarburants peuvent être utilisés comme substituts des carburants fossiles dans les transports.
6. **Cultures énergétiques :** Certains types de plantes, appelées cultures énergétiques, sont cultivés spécifiquement pour être utilisés comme sources de biomasse. Cela peut inclure des cultures comme le miscanthus, le switchgrass et les saules.

La biomasse est considérée comme une source d'énergie renouvelable car elle peut être régénérée relativement rapidement par rapport aux combustibles fossiles. Cependant, il est important de gérer les ressources biomasses de manière durable pour éviter la déforestation excessive, la perte de biodiversité et d'autres problèmes environnementaux associés à une utilisation non durable de ces ressources.

I.4.4.. Les ressources géothermales

La chaleur terrestre n'est en principe exploitable que lorsque les formations géologiques qui constituent le sous-sol renferment des aquifères dans lesquels circule un fluide géothermal. Le fluide présent – et qui s'est réchauffé au contact des roches – peut alors être capté au moyen de forages. On véhicule ainsi la chaleur emmagasinée des profondeurs vers la surface pour ensuite l'exploiter. C'est la raison pour laquelle on parle de ressources géothermales ou de gisement géothermal.

I.4.5. Les ressources hydrauliques

L'eau a été de tout temps une énergie très appréciée. L'énergie hydroélectrique avec une production de 3100 TWh, représente actuellement 16% de la production électrique totale et 7% environ de toute

l'énergie consommée dans le monde, avec une puissance installé de 870 GW. Dans les pays en voie de développement c'est souvent la seule ressource disponible localement.

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

I.4.6. Conclusion

L'énergie renouvelable offre une alternative prometteuse et écologique pour répondre à nos besoins énergétiques tout en préservant la santé de notre planète. La transition vers une économie basée sur les énergies renouvelables est un pas crucial vers un avenir plus propre, plus durable et plus respectueux de l'environnement.

Chapitre 2
Exploitation de l'énergie solaire

Exploitation de l'énergie solaire

II.1. Introduction :

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement du Soleil. Des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces rayonnements sont constitués de photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie solaire. L'énergie solaire est issue des réactions de fusion nucléaire qui animent le Soleil.

Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de la source énergétique primaire qu'est le rayonnement solaire.

Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire :

- le solaire photovoltaïque qui transforme directement le rayonnement solaire en électricité ;
- le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur. Le solaire dit « thermodynamique » est une variante du solaire thermique. Cette technique se différencie en cela qu'elle utilise l'énergie thermique du soleil afin de la transformer dans un second temps en électricité.

II.2. L'exploitation de l'énergie solaire

Trois familles de procédés de transformation de l'énergie solaire se distinguent aujourd'hui.

II.2.1. L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire est directement convertie en chaleur grâce à des capteurs solaire thermique. Elle est constitue d'une surface absorbante de couleur foncée (l'absorbeur), généralement placé derrière une vitre. Un matériau résistant à la chaleur et thermiquement isolant est placée derrière l'absorbeur pour limiter les pertes calorifiques. La chaleur absorbée par la surface noire est transmise à un fluide caloporteur (eau, air,..). Sa température peut atteindre 60 à 80c°, voire 100 c°.

II.2.1.1. Les différents types de capteurs solaires thermiques

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type de fluide, le niveau de température que les panneaux solaires permettent d'atteindre. On distingue 3 familles de capteurs solaires thermiques.

II.2.1.1.1. Les capteurs plans non vitrés ou souples

C'est le modèle le plus rustique et également le plus économique. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) dans laquelle circule le liquide à réchauffer

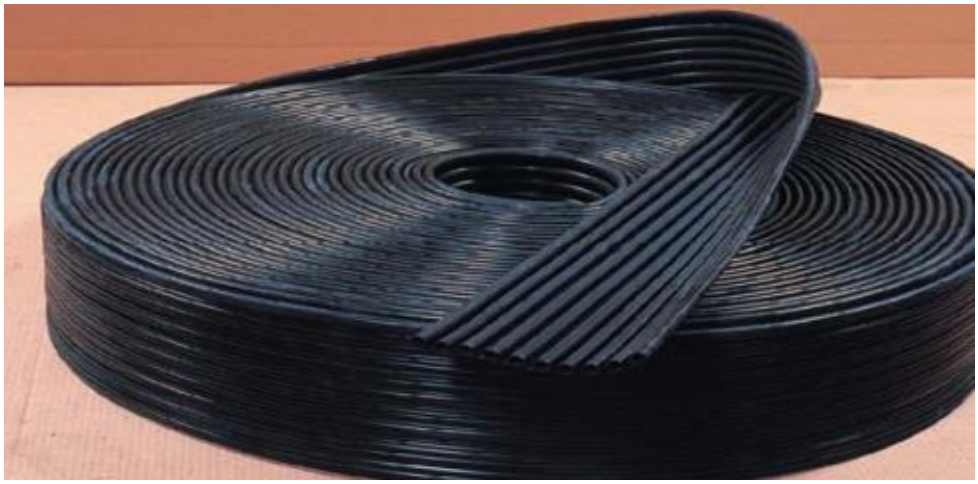


Figure II.1 : Capteur plan non vitré.

Le principal domaine d'utilisation de ce capteur est le chauffage des piscines de plein air. Celles-ci sont le plus souvent utilisées en été, lorsque la température ambiante et le rayonnement solaire sont élevés. Le niveau de température de l'eau des bassins est quant à lui inférieur à 30 oC. Dans ces conditions, l'efficacité des capteurs est très bonne, et l'utilisation de capteurs vitrés ne permettrait pas une meilleure collecte de l'énergie solaire.

L'absence de gel pendant la période autorise la circulation directe de l'eau de la piscine dans les capteurs. Afin d'éviter des problèmes de corrosion et également pour des raisons économiques, les constructeurs de matériels utilisent souvent des matières plastiques (figure II.2).

Figure II.2 : Piscine publique utilisant des capteurs souples.

Les capteurs sans vitrage peuvent également être utilisés pour des installations de production d'eau chaude sanitaire. C'est en particulier le cas dans des régions chaudes et fortement ensoleillées. La parfaite intégration architecturale qu'autorise ce type de produit permet la mise en œuvre de surfaces plus importantes, pour compenser la différence d'efficacité avec des capteurs vitrés, en particulier l'hiver.

Figure II.3 : Installation de production d'eau chaude sanitaire.

II.2.1.1.2. Les capteurs plans vitrés : Les capteurs munis d'une couverture transparente, souvent appelés « capteurs vitrés », sont les plus utilisés, car ils correspondent au domaine d'application le plus courant : le chauffage de l'eau sanitaire. La température d'utilisation est en général inférieure à 70 oC. Plus rarement, certains d'entre eux, munis d'une couverture transparente de type « double vitrage », permettent d'atteindre des températures de fonctionnement de l'ordre de 100 °C (figure II.4).

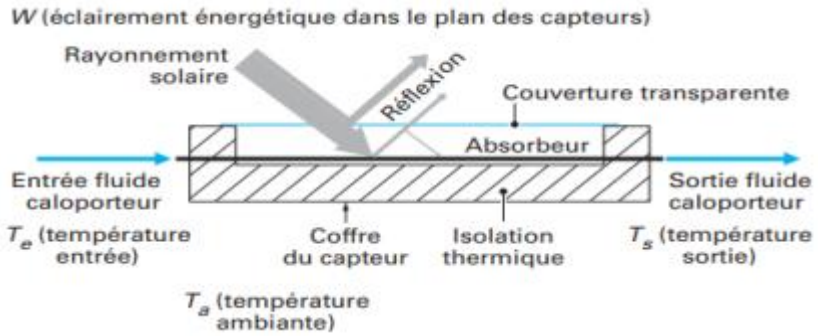


Figure II.4 : Coupe d'un capteur vitré.

Le capteur vitré est constitué de différents composants :

- ✓ le coffre ;

- ✓ l'isolation thermique ;
- ✓ l'absorbeur ;
- ✓ la couverture transparente.

II.2.1.1.3. Les capteurs sous vides : Lorsque la température de fonctionnement du capteur est très élevée (> 100 oC) ou lorsque la température ambiante est faible (région de montagne), il est intéressant d'utiliser un capteur solaire dit « sous vide », qui se présente sous la forme de tubes de faible diamètre (jusqu'à une quinzaine de centimètres) dans lesquels sont disposés les absorbeurs, de conception identique à celle d'un capteur plan. L'intérieur du tube est vidé de l'air qu'il contient et des pertes par convection entre l'absorbeur et la paroi vitrée du tube sont ainsi supprimées. Le capteur sous vide voit ainsi ses déperditions limitées au rayonnement infrarouge. Pour limiter les effets de celui-ci, la surface de l'absorbeur possède un revêtement « sélectif » (figures II.5 et II.6).

Figure II.5 : Détail d'un capteur solaire sous vide.

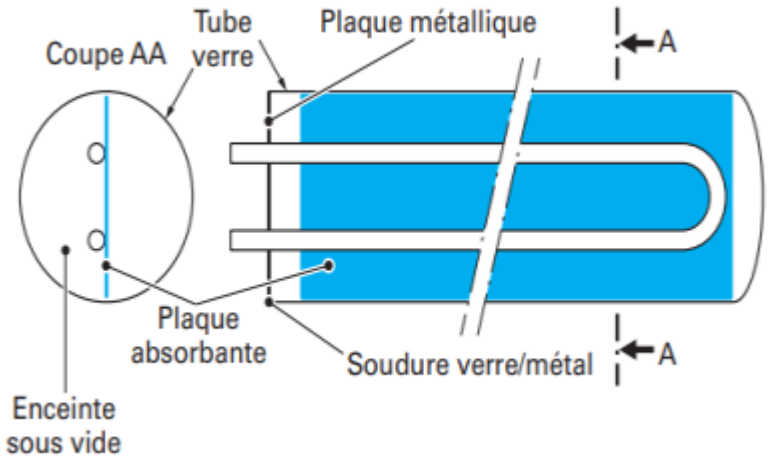


Figure II.6 : Coupe d'un capteur sous vide.

II.2.1.2. Applications

Les applications du solaire thermique à basse température sont nombreuses. On peut citer entre autres:

- Le distillateur solaire
- Le chauffe-eau solaire
- Froid et climatisation solaire
- Le séchoir solaire

II.2.1.2.1. Les distillateurs solaires

La disponibilité de l'eau potable est aujourd'hui une préoccupation majeure de l humanité. La terre est recouverte d'eau à 71%, mais 98% de ce volume à une concentration en sel trop élevée. Cette eau n'est donc pas potable. Elle ne peut pas non plus être utilisée dans l irrigation ou dans l industrie.

- **Distillation a un étage**

C'est le plus simple et le plus répandu, on en trouvera une schématisation sur la figure.. L'eau placée dans un bac noirci disposé au fond d'un capteur solaire s'échauffe par absorption du rayonnement solaire traversant la vitre. Cet échauffement provoque une évaporation superficielle, la vapeur d'eau produite venant ensuite se condenser sur la vitre plus froide. Il suffit alors de récupérer l'eau distillée ruisselant sur la face interne de la vitre à l'aide d'un système de gouttières placées de chaque côté de la vitre.

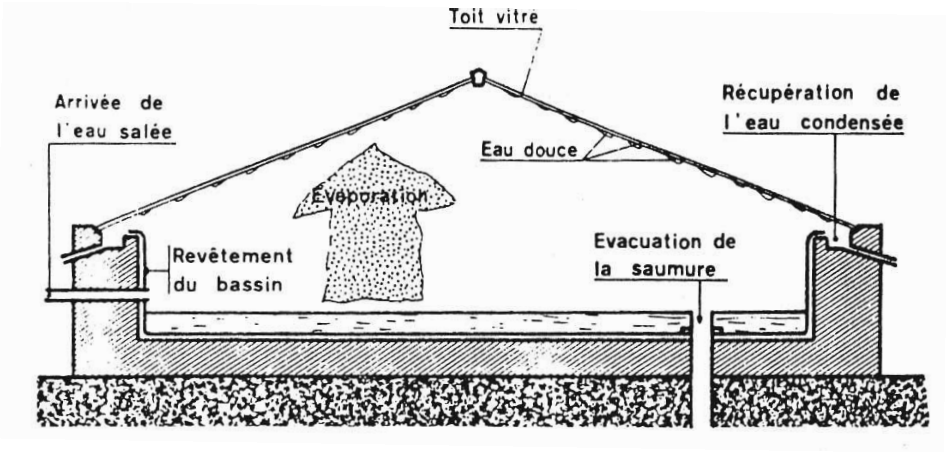


Figure II.7 : Schéma de principe d'un distillateur solaire à un étage.

- **Distillateur a plusieurs étages**

Pour augmenter le rendement des distillateurs solaires, le Pr. Le Goff a imaginé un distillateur à plusieurs étages où la chaleur libérée par la condensation est récupérée dans un 2ème étage pour servir à évaporer une masse d'eau supplémentaire suivant le schéma de la figure II.8.

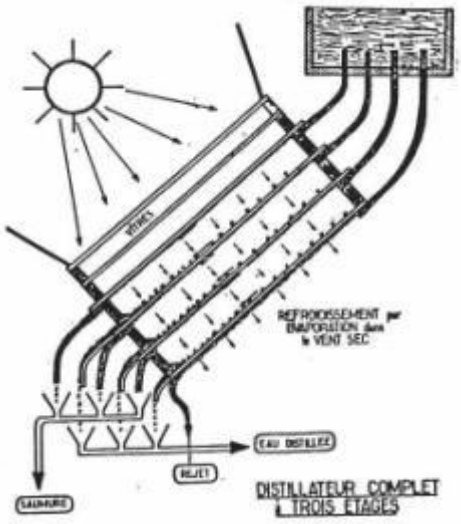


Figure II.8 : Schéma du distillateur solaire DIFICAP du Pr. Le Goff.

La production distillée peut théoriquement atteindre 10 à 15 $l.m^{-2}$ par jour. Les problèmes liés à sa réalisation n'ont pas jusqu'à présent permis sa vulgarisation.

II.2.1.2.2. Production d'eau chaude : La production d'eau chaude sanitaire est à l'heure actuelle l'application la plus développée de l'énergie solaire thermique. Sous un climat tropical sec, un chauffe-eau solaire performant et bien dimensionné peut permettre de satisfaire les besoins en eau chaude d'une famille toute l'année. Sous un climat tropical humide, il sera nécessaire à certaines périodes d'utiliser une énergie d'appoint. Le chauffe-eau solaire permettra quand même de réaliser d'importantes économies. Il existe plusieurs types de chauffe-eau solaire que nous allons détailler.

- **Chauffe-eau solaire capteur-stockeur**

Ce sont des appareils qui se présentent comme des capteurs solaires à eau classiques avec coffre, vitrage, isolant et absorbeur. La contenance de l'absorbeur, de l'ordre de 75 $l.m^{-2}$ permet d'assurer dans le même appareil les fonctions de captage et de stockage de l'énergie.

Ces appareils sont peu encombrants, peu coûteux et faciles à installer. Ils présentent un bon rendement lors des journées ensoleillées (résistance thermique négligeable entre l'absorbeur et l'eau : contact sur toute la surface de l'absorbeur). Cependant les pertes de chaleur sont

importantes la nuit et la température de l'eau le matin en période fraîche (décembre, janvier en climat tropical sec) est souvent trop bas. Des modèles de fabrication locale bien isolés ont été testés et donnent des résultats satisfaisants. Le problème principal à résoudre est la réalisation d'un capteur plat d'une épaisseur de l'ordre de 5 mm résistant à la pression d'eau du réseau.

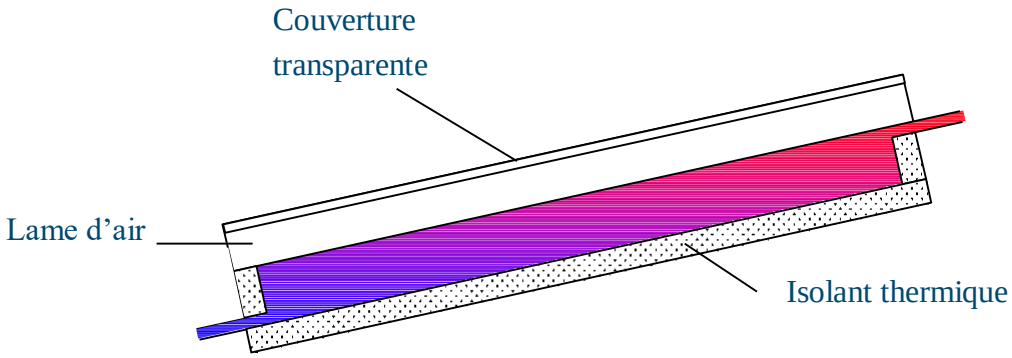


Figure II.9 : Schéma d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur

- **Chauffe-eau solaire monobloc**

Il s'agit d'appareils dont le ballon de stockage d'eau chaude est solidaire du capteur solaire comme représenté sur la figure.2, la circulation d'eau entre les deux éléments s'effectuant par thermosiphon. La figure.3 représente une vue éclatée d'un chauffe-eau solaire monobloc commercialisé.

Pour un bon fonctionnement de ces appareils, les règles suivantes doivent être respectées :

- Eviter les possibilités d'accumulation d'air en un point haut du circuit
- Placer les tubes en parallèle pour éviter les pertes de charge
- Le bas du réservoir doit être situé au-dessus du capteur
- Respecter une inclinaison minimale (>10°, on choisit souvent 30°) pour un fonctionnement correct du thermosiphon

La figure 12 illustre quelques-unes de ces règles d'installation.

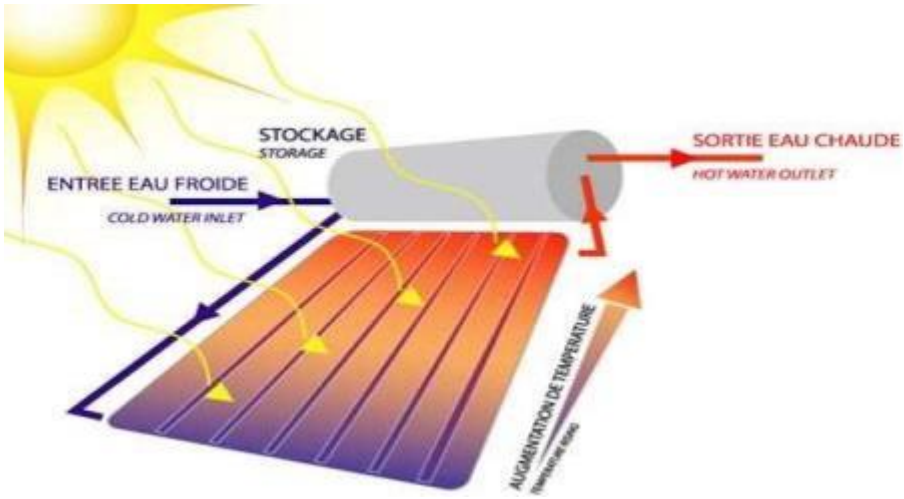


Figure II.10 : Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire monobloc.

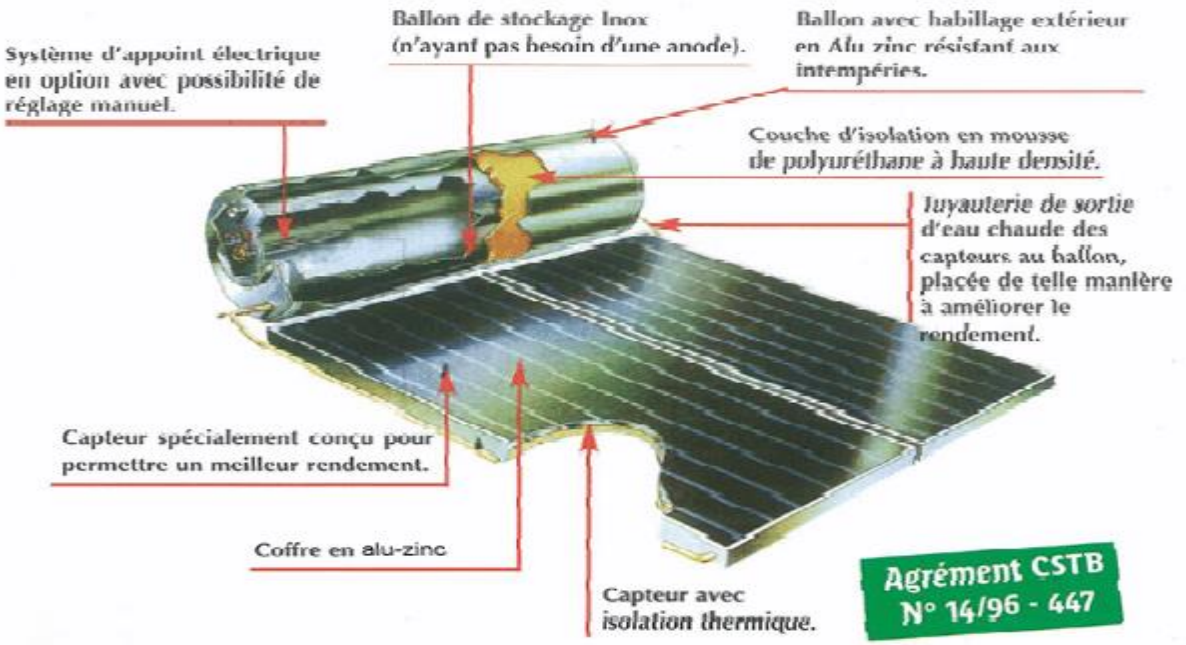


Figure II.11 : Vue éclatée chauffe-eau solaire BP Solar (http://www.apex-bpsolar.com/solaire/chauffeEau)

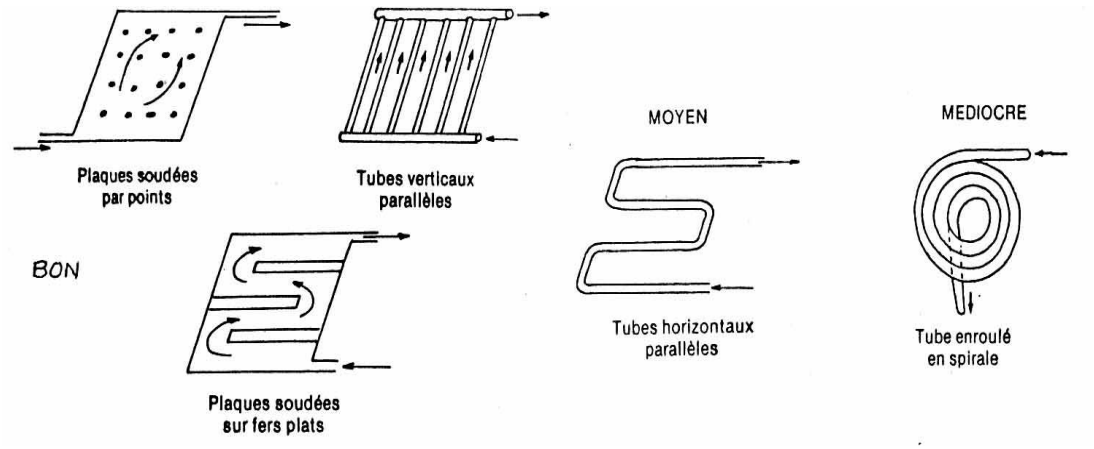


Figure II.12 : Règles d'installation des chauffe-eau solaires monoblocs

- **Chauffe-eau solaire à éléments séparés**

Ces appareils sont constitués d'un ballon relié à un ou plusieurs capteurs par des tuyauteries de longueur variable. Le ballon non solidaire du capteur peut être installé à l'intérieur du logement. Ils fonctionnent le plus souvent en convection forcée (circulation de l'eau assurée par une pompe) ce qui nécessite le raccordement au réseau électrique. D'une plus grande souplesse d'utilisation, leur bon fonctionnement est davantage tributaire du soin apporté à leur installation. On trouvera sur la figure II.14 le schéma de principe d'une installation type et sur la figure II.15 le détail des différents éléments constitutifs.

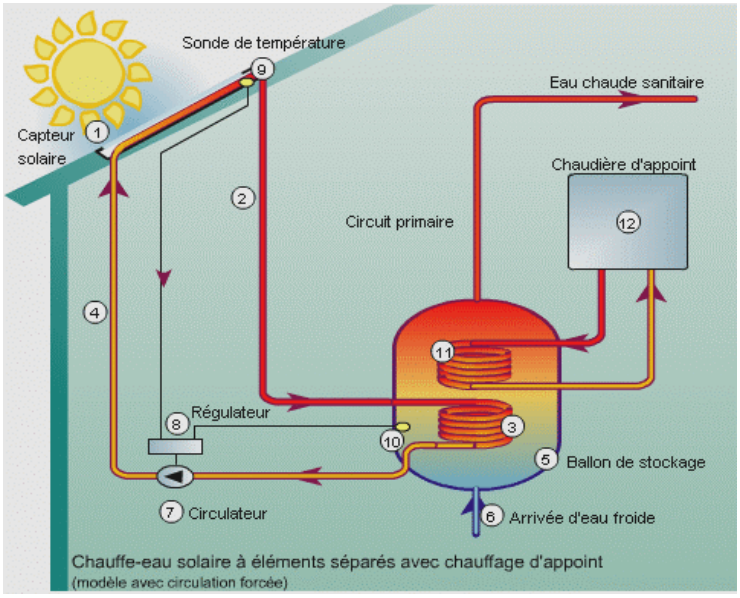


Figure II.13 : Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire à éléments séparé

La différence de masse volumique entre l'eau chaude et l'eau froide conduit à l'établissement d'un gradient de température dans un ballon de stockage d'eau chaude : la température de l'eau est plus élevée en haut qu'en bas du ballon ainsi que le schématise la figure 16 Le rendement d'un capteur solaire étant d'autant plus élevé que la température d'entrée du fluide est faible, on a intérêt :

- A choisir un rapport hauteur/diamètre du ballon suffisant (>2) pour obtenir une stratification suffisante,
- A éviter le brassage de l'eau dans le ballon qui « casserait » la stratification,
- A envoyer vers le capteur de l'eau provenant de la partie basse du ballon.

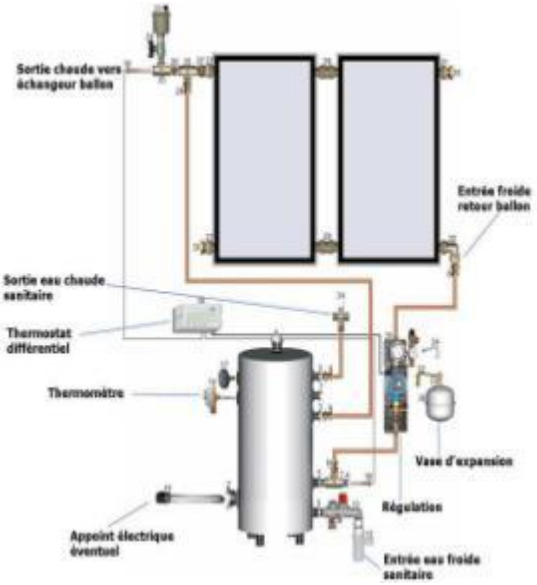


Figure II.14 : Eléments d'un chauffe-eau solaire à éléments séparés

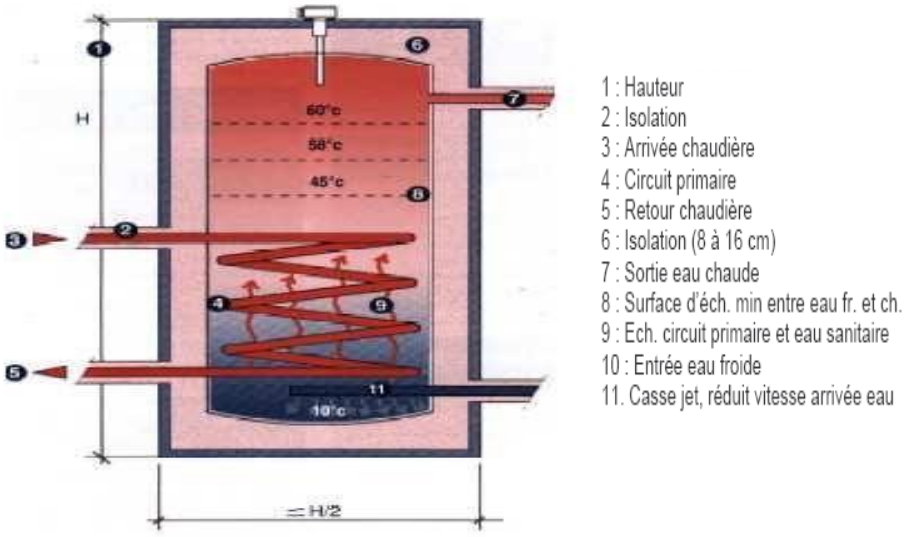


Figure II.15 : Schématisation de la stratification dans un ballon d'eau chaude (extrait de Bragard)

II.2.1.2.3. Froid et climatisation

- **Réfrigération**

L'énergie solaire peut être utilisée pour produire du froid par deux voies :

- Photoélectrique : on utilise l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques pour alimenter un groupe frigorifique à compression ou des éléments Peltier
- Thermique : on utilise la chaleur récupérée dans un capteur solaire pour produire du froid par sorption.

Des réfrigérateurs fonctionnant sur ce principe sont opérationnels comme celui de Flechon et Godmel dont on trouvera le schéma sur la figure 17.

Son fonctionnement repose sur l'utilisation d'un couple absorbant/fluide frigorigène. La substance absorbante reste dans le capteur solaire. Dans la journée, l'élévation de sa température dans le capteur provoque l'évaporation du fluide frigorigène qui se condense dans un condenseur placé dans l'air ambiant à l'extérieur de l'enceinte à réfrigérer. Il est ensuite stocké dans un réservoir.

Pendant la phase nocturne le composé absorbant se refroidit et devient « avide » de fluide frigorigène. Celui-ci s'évapore donc dans l'évaporateur placé à l'intérieur du caisson isolé à refroidir pour être réabsorbé par le composé absorbant.

Le cycle peut alors se répéter le jour suivant. La production de froid s'effectuant la nuit, il faut prévoir un stockage du froid produit pour limiter l'élévation de température de l'enceinte réfrigérée dans la journée. Ce stockage s'effectue généralement par un volume d'eau glycolée placée dans l'enceinte.

Le facteur limitant la diffusion de ces réfrigérateurs reste un coût élevé.

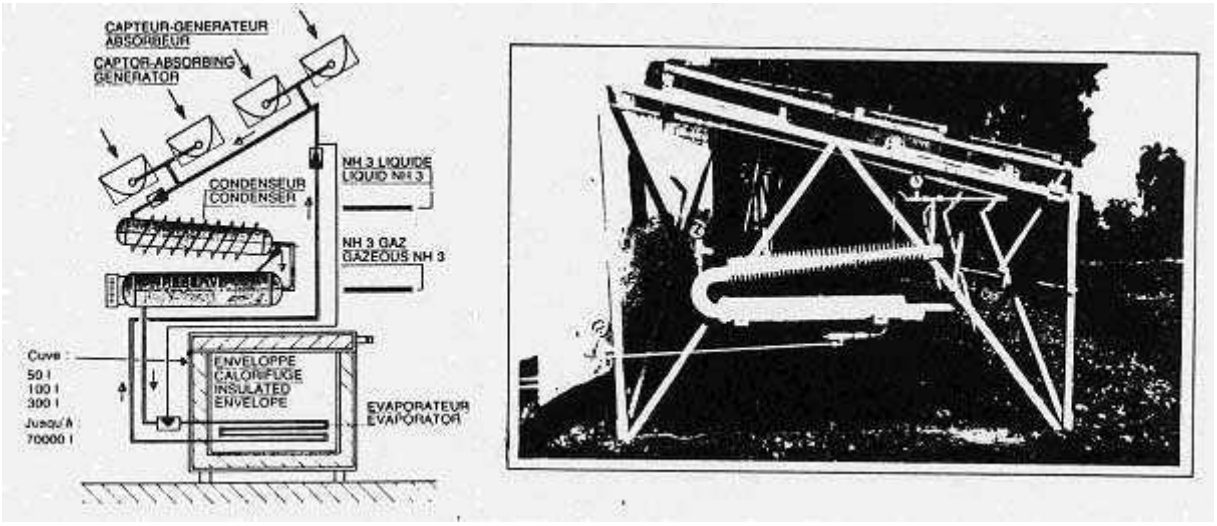


Figure II.16 : Schéma du réfrigérateur photothermique des Prs Flechon et Godmel

- **Climatisation**

Nous présenterons ici, le principe de deux systèmes reposant sur des cycles intermittents d'absorption/désorption d'eau dans un solide hygroscopique (gel de silice) :

Le système conçu par Dannies (figure 18) ne comporte aucun mécanisme et ne fait appel qu'aux mouvements de l'air par convection naturelle. Les murs Est et Ouest du bâtiment contiennent les éléments absorbants au travers desquels l'air circule selon le processus suivant

- Le matin le soleil échauffe le mur Est : le mélange d'air et de vapeur d'eau réchauffé et plus léger monte dans le mur Est et en sort à sa partie supérieure. Il en résulte une aspiration correspondante d'air par les orifices supérieurs du mur Ouest dans lequel l'air passe sur l'absorbant régénéré la veille et s'y dessèche. Un dispositif d'évaporation d'eau placé au pied du mur permet alors de le refroidir avant son introduction dans la pièce. Durant cette phase, l'échauffement du mur Est provoque la déshydratation de l'absorbant qu'il renferme.
- L'après-midi, le soleil échauffe le mur Ouest et la circulation d'air s'inverse.

Ce système expérimenté au Libéria et en Lybie a permis de maintenir les locaux à une température de 5 à 15°C au-dessous de l'ambiance extérieure, avec une humidité relative comprise entre 65 et 75%.

Un autre système destiné à la déshumidification de l'air en zone humide a été mis au point par Lof aux Etats- Unis (figure (19). L'air à déshumidifier passe à travers une pluie de solution de glycol concentrée et s'y dessèche. La chaleur latente de condensation et la chaleur d'absorption sont éliminées dans un échangeur à eau : à la sortie l'air déshumidifié est à la même température qu'à l'entrée.

Le glycol dilué par son échange avec l'air humide est envoyé dans un régénérateur où il tombe en gouttelettes à travers un courant ascendant d'air sec réchauffé dans un capteur solaire à air.

Ces systèmes restent toutefois au stade de faible diffusion et semblent difficilement adaptables à l'habitat individuel. Leur avenir se situe plutôt dans une intégration à une centrale de climatisation en vue de réduire la consommation énergétique.

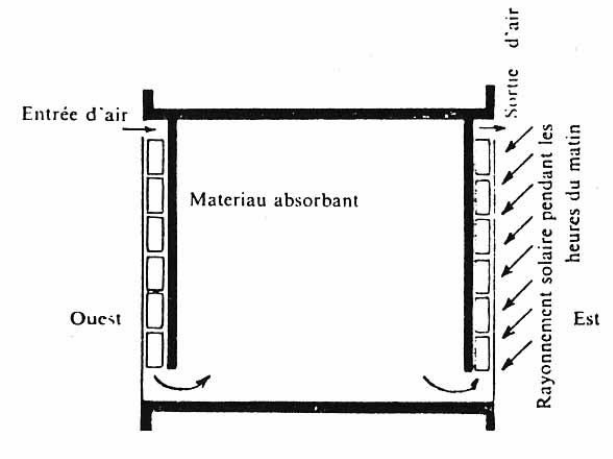


Figure II.17 : Schéma du procédé Dannies (d'après IIF)

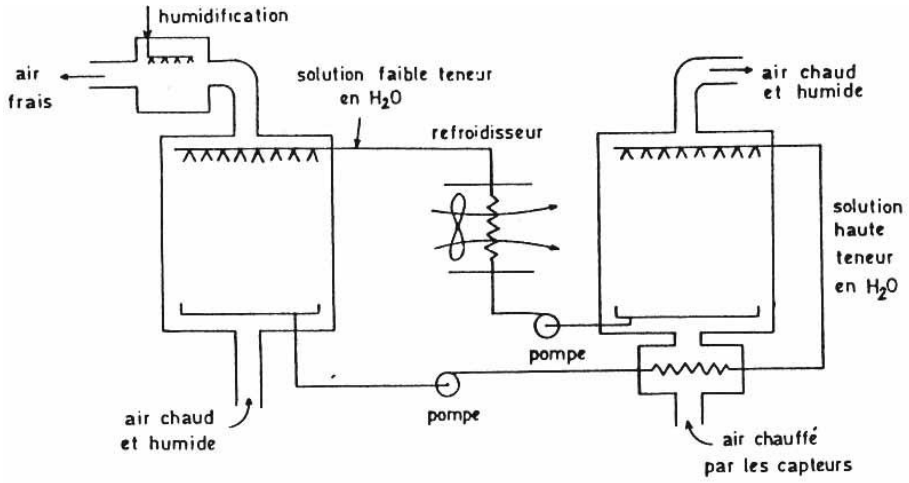


Figure II.18 : Schéma du procédé Lof

II.2.1.2.4. Le séchoir solaire

Le séchage naturel connu et pratiqué par nos ancêtres consiste à exposer le produit à sécher directement au soleil, en l'étalant au sol sur des nattes ou des claies. Ce type de séchage, bien qu'il soit simple et gratuit, a l'inconvénient de nécessiter de longues durées de séchage, d'exposer le produit à la poussière, à la pluie et aux insectes. D'où altération de la qualité et risque de pourrissement et de moisissures qui peuvent atteindre jusqu'à 50% des récoltes.

Le séchage solaire a pour avantage de conserver les aliments tout en gardant une majorité des éléments nutritifs, seules les vitamines B et C sont majoritairement perdues. Correctement stockés, les aliments se conservent entre 6 et 12 mois sans baisse de la qualité

Ce n'est qu'au 20ieme siècle avec l'apparition du concept de l'activité de l'eau (*water activity* Aw) et la connaissance des mécanismes de transfert de l'humidité dans les produits que furent développés les premiers séchoirs artificiels conçus selon des règles scientifiques.
Le séchoir solaire apparaît alors comme une solution non polluante. Souvent artisanaux, le séchoir peut se décliner sous différentes formes.

II.2.1.2.4. 1.Types de séchoirs solaires

1) **Les séchoirs-Tunnel :** Ce sont des séchoirs industriels destinés au séchage des grandes récoltes et dans les processus de conservation de certains aliments. Ils se composent d'un champ de capteurs solaires et d'un circuit aéraulique, le tout constituant le générateur d'air chaud. Le produit à sécher est disposé dans des chariots montés sur des rails, qui traversent un tunnel de quelques mètres de façon continue (Figure19).

Figure 19 : Les séchoirs-Tunnel

2) **Les séchoirs-stock** Appelés aussi séchoirs étuves, ce sont des séchoirs immobiles, où le produit à sécher est entreposé sur des claies ou étagères. Les séchoirs stocks peuvent être directs ou indirects.

- **Les séchoirs solaires directs (séchoirs-serre)** Dans ce type de séchoirs, l'insolateur (capteur solaire) et le stock (chambre de séchage) forment un seul bloc. Le séchoir est constitué d'un caisson isolé à sa base et recouvert d'une vitre ou d'un plastique clair. Les aliments à sécher reçoivent directement les rayons du soleil à travers la couverture transparente (Figure 20). Ce type de séchoir est adapté au séchage des fruits et légumes

dont la teneur en eau initiale est importante et qui nécessitent de longues durées de séchage (Figure 21).

Figure II.20 : Séchoir solaire direct portatif

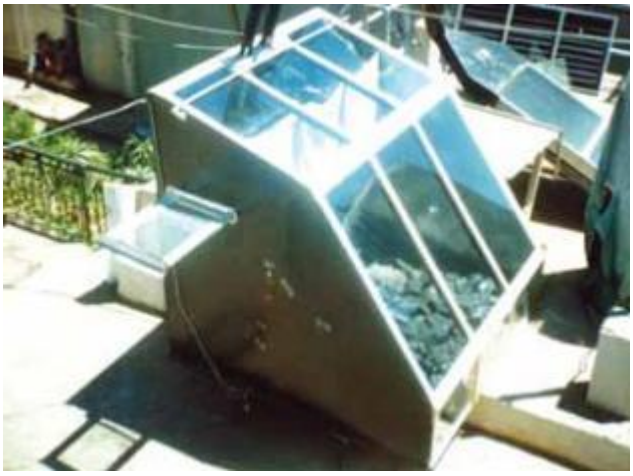


Figure II.21 : Séchoir solaire serre

- **Les séchoirs solaires indirects :** Ils sont composés d'isolateurs couplés à une chambre de séchage. L'isolateur sert à chauffer l'air et à l'envoyer dans cette dernière (Figure II.22). En convection naturelle, ceci ne suffit pas à réchauffer l'air à la température désirée, ce qui explique l'ajout d'une cheminée. L'énergie supplémentaire qui se trouve à la base de la cheminée améliore considérablement le fonctionnement du séchoir en augmentant le débit de l'air dans la masse du produit à sécher.

Figure II.22 : Deux types de séchoirs solaires indirects

Les applications de la solaire thermique basse température sont assez nombreuses et concourent à la satisfaction de très nombreux besoins dans le domaine de l'agriculture, de la santé et de l'amélioration de la qualité de la vie. La cuisson solaire, qui sort du cadre des basses températures, n'est pas abordée ici. Signalons cependant que c'est un domaine important, contribue à la qualité de la vie et également à la préservation de l'environnement.

II.2.2. L'énergie solaire thermodynamique (CSP)

L'énergie thermique du soleil permet également de produire de l'électricité par voie thermodynamique. Le principe est identique à celui d'une centrale électrique classique : la production de vapeur ou de gaz à haute pression est turbinée pour être ensuite transformée en électricité. Ce processus nécessite des températures importantes (de 250°C à plus de 1 000°C) que l'on atteint en concentrant la lumière solaire avec des miroirs vers un fluide caloporteur.
Les technologies utilisées dans hight-température de l'énergie solaire thermique sont:

- Capteurs cylindro-paraboliques
- Centrales à tour
- Concentrateurs paraboliques
- concentrateurs Fresnel linéaire

II.2.2.1. Les capteurs cylindro-paraboliques

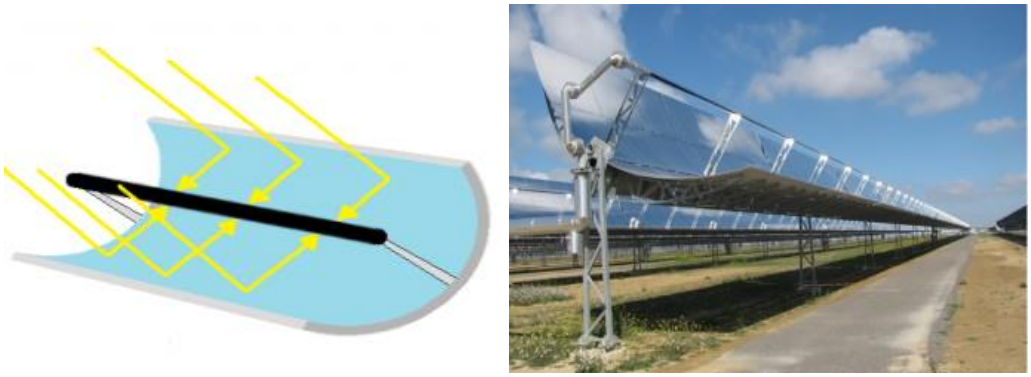


Figure II.23 : Les capteurs cylindro-paraboliques

Cylindroparabolique capteurs solaires se concentrent la lumière du soleil en utilisant des miroirs paraboliques dans un tuyau d'absorbeur qui passe par l'axe de la parabole. Dans ce tube de tuyau absorbant un fluide est chauffé et peut atteindre des températures aussi élevées que 450 ° C

Selon l'application et la température à laquelle vous voulez réaliser un type de fluide ou un autre est utilisé. À une température maximale de 200 ° C peut être utilisé de l'eau déminéralisée ou de l'éthylène glycol comme fluides de travail et pour des températures plus élevées allant jusqu'à 450 ° C des huiles synthétiques sont utilisés.

Ce type de concentration getter doit être en train de modifier leur position adapter à la position du soleil en tournant autour de l'axe parallèle à sa ligne focale pour tirer parti de la position de lumière directe du soleil.

II.2.2.2. Les centrales à tour

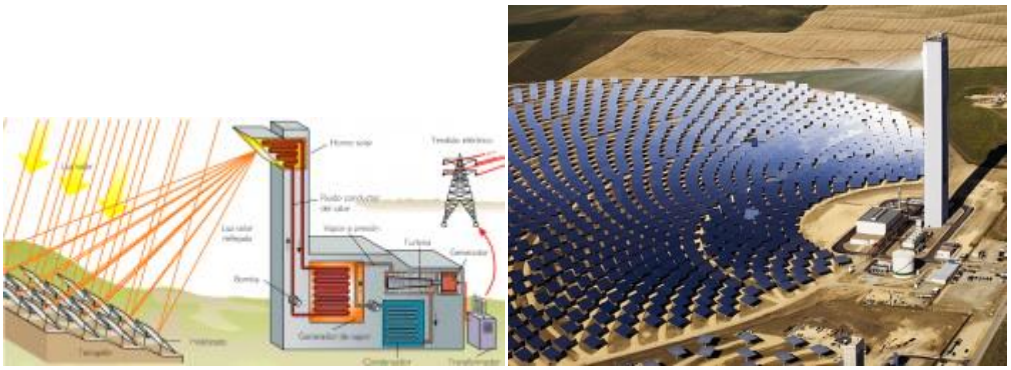


Figure II.24 : Les centrales à tour

systèmes tour ou tour de récepteur central se composent d'un champ d'héliostats (miroirs mobiles de plus de 2 essieux). La héliostats capture et concentrer la lumière du soleil directe sur un récepteur, installé sur le sommet d'une tour centrale.

Fonctionnement de l'installation est simple, le récepteur solaire central génère la vapeur à haute température. La vapeur produite est ensuite utilisée pour entraîner une turbine qui produit l'électricité.

II.2.2.3. Les concentrateurs paraboliques

Figure II.25 : Les concentrateurs paraboliques

Les antennes paraboliques sont des systèmes qui concentrent l'énergie solaire en un point où le récepteur solaire est situé et un moteur Stirling ou une microturbine qui est couplée à un alternateur.

Le fluide situé dans le récipient est chauffé à des températures supérieures à 750 ° C, obtenant ainsi une certaine énergie thermique. Cetteénergie thermique produite est utilisée par le moteur Stirling ou la microturbine pour produire de l'électricité.

Un moteur Stirling est un moteur thermique, ce qui signifie que l'apport d'énergie peut être réalisée grâce à l'énergie solaire concentrée. Un alternateur couplé à un moteur Stirling se rapproche du mouvement généré par le moteur pour produire de l'électricité. L'électricitéproduite peut être connecté au réseau pour la vente ou dans la plupart des cas peuvent être utilisés pour la consommation directe.

Cette technologie est encore au stade expérimental et est encore moins rentable que la tour ou des miroirs paraboliques.

II.2.2.4. Les concentrateurs linéaires de Fresnel

Les réflecteurs conduisent miroirs plats normaux et simuler la courbure des miroirs paraboliques (plus chers) faisant varier l'angle de chaque ligne avec un seul suivi de l'axe.
Le principal avantage du système linéaire de concentrateurs de Fresnel est sa simplicité d'installation et de faible coût, bien que le rendement est inférieur aux capteurs solairescylindro-paraboliques.

II.2.3. L'énergie solaire photovoltaïque (PV)

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau.

II.2.3.1. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique.
Le terme photovoltaïque vient du grec " phos, photos " qui désigne la lumière et de " voltaïque ", mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité.
Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

II.2.3.1.1. Energie lumineuse :

La lumière est constituée de photons vibrant à des fréquences f et sont donc porteurs d'une énergie

$$\boxed{E = h \times f}$$

h est la constante de Planck (h = 6,62·10^{-34} Js)
f la fréquence de l'onde lumineuse en Hertz
E l'énergie de ce photon en Joules

Remarque : Unité couramment employée l'électron volt : Unité de mesure représentant l'énergie cinétique d'un électron, accéléré dans le vide sous une différence de potentiel de 1 Volt: 1 eV = 160,217 . 10^{-21} Joule = 44,505 . 10^{-24} Wh. Alors $E_{(eV)} = \frac{1,2419}{\lambda_{(\mu m)}}$

Le flux de photons par seconde et par centimètre carré $N(\lambda)$ dépend du potentiel solaire $M(\lambda)$

Tel que $N(\lambda) = M_{\lambda} \frac{\lambda}{hc} d\lambda$ avec $N_{(\lambda)}(cm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot \mu m^{-1})$ flux de photons

La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite que :

- ✓ les photons soient absorbés par le matériau (absorption optique) en transmettant leur énergie au matériau ;
- ✓ l'énergie transmise aux électrons soit une énergie potentielle et non une énergie thermique ;
- ✓ les électrons excités par les photons soient collectés avant de reprendre leur énergie initiale (relaxation), afin de fournir un courant électrique.

II.2.3.1.2. Principe de conduction dans un matériau:

Les atomes sont constitués de noyaux et d'électrons qui gravitent autour. Pour qu'un matériau conduise l'électricité il faut que des électrons soient capables de se déplacer. Les électrons possèdent une certaine quantité d'énergie qui est quantifiée. Il existe donc des niveaux d'énergie auxquels appartiennent les électrons.

Ces niveaux d'énergies se découpent ainsi :

La bande de valence : (ayant 2 électrons) les électrons qui s'y trouvent participent aux liaisons entre les atomes.

La bande de conduction : les électrons qui s'y trouvent sont mobiles et peuvent bouger d'un atome à l'autre si on leur applique un champ approprié, ils participent donc à la conduction électrique ; c'est le déplacement de ces électrons là qui est responsable du courant électrique.

La bande interdite ou GAP : la gamme d'énergie auxquelles les électrons n'ont pas accès (il n'y a pas de niveau d'énergie dans cette gamme),.

Le niveau de Fermi : correspond à l'énergie limite qui sépare, au zéro absolu, les niveaux occupés des niveaux vides. Cette énergie est caractéristique du matériau.

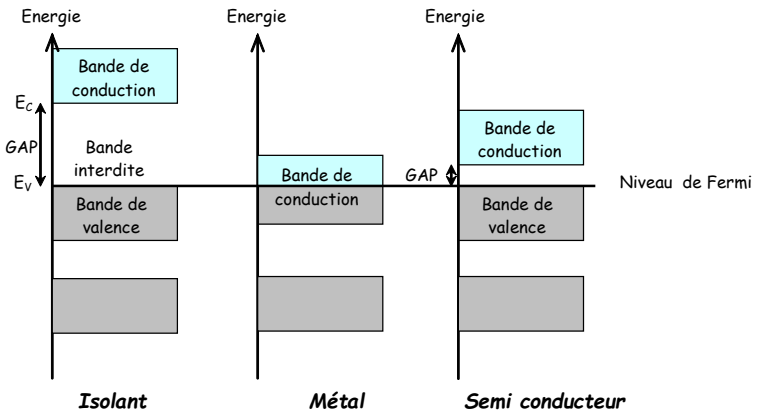


Figure II.26 : Représentation schématique des bandes d'énergie d'un solide.

Dans un métal, le gap est nul ; il y a continuité entre les bandes de valence et celles de conduction, il y a donc toujours des électrons susceptibles de conduire le courant.

Dans un isolant, la dernière bande de valence est pleine, et le gap est énorme : il n'y a donc aucune chance d'exciter un électron pour qu'il passe dans la bande de conduction (l'énergie requise est trop importante et ferait fondre le matériau avant qu'il ne commence à conduire).

Pour les semi-conducteurs, à température nulle (=0 Kelvin) ce sont des isolants : bandes de valence pleines, et bandes de conduction vides. Mais un apport d'énergie faible (thermique ou lumineuse) suffit à faire passer des électrons dans la bande de conduction car le gap est très faible (de l'ordre de l'eV) : le matériau devient ainsi conducteur.

II.2.3.1.3. Principe de la cellule photovoltaïque :

En effet lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " :

- ✓ si l'électron revient à son état initial n'ayant réussi à franchir le GAP l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.
- ✓ par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " passent le GAP et vont dans la bande de conduction et créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

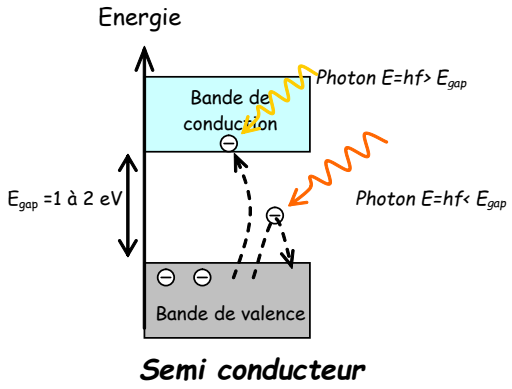


Figure II.27 : Principe de la cellule photovoltaïque

II.2.3.1.4. Le dopage : réduit le Gap et crée un champ électrique pour collecter les électrons

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du "dopage" par des impuretés c'est-à-dire leur ajouter un autre atome à une certaine concentration, dont une bande d'énergie va se trouver exactement dans la bande interdite du semi-conducteur. Deux types de dopage sont possibles:

a) Le dopage de type N (négatif)

Il consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si). Dans un matériau de type n, on augmente fortement la concentration en électrons libres. Ainsi le dopant va ajouter une bande d'énergie dotée d'électrons près de la bande de conduction ainsi, l'énergie nécessaire pour que les électrons passent dans la bande de conduction est bien plus facilement atteinte.

Les électrons sont des porteurs majoritaires et les trous des porteurs minoritaires.

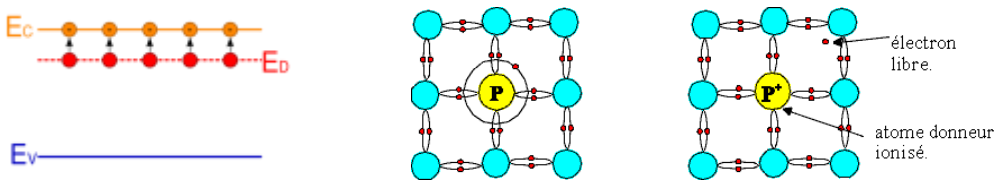


Figure II.28 : Le dopage de type N (négatif)

b) Dopage P (positif)

Les trous sont alors des porteurs majoritaires et les électrons des porteurs minoritaires.

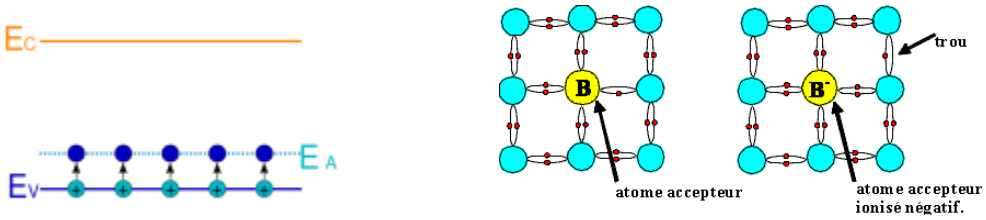


Figure II.29 : Le dopage de type P (positif)

II.2.3.2. Composition d'une cellule PV

Les technologies utilisées par les différents fabricants varient, mais les caractéristiques de base des composants d'une cellule sont les mêmes.

Pratiquement, la cellule PV est composée de plusieurs couches minces à savoir :

- **une couche "anti-reflet"** réduit les pertes par réflexion (avant en TiO2 :34 % de réflexion du spectre visible, mais remplacée aujourd'hui par du nitrure de silicium hydrogéné (SiN-H). 8 %
- **une grille conductrice** avant " collectrice des électrons " qui doit (être dense pour collecter les électrons mais peu dense pour laisser passer la lumière) également être liée au silicium et ne pas être sensible à la corrosion ; (Ni, Sn , Pb)
- **une couche dopée N** avec porteurs de charge libres négatifs (électrons) ; (Phosphore)
- **une couche dopée P** avec porteurs de charge positifs (trous) ; (Bore)
- **une surface de contact arrière conductrice** en métal " collectrice des électrons ", ayant une bonne conductivité ainsi qu'un bon accrochage sur le silicium ; (Al , Ni, Sn , Pb)

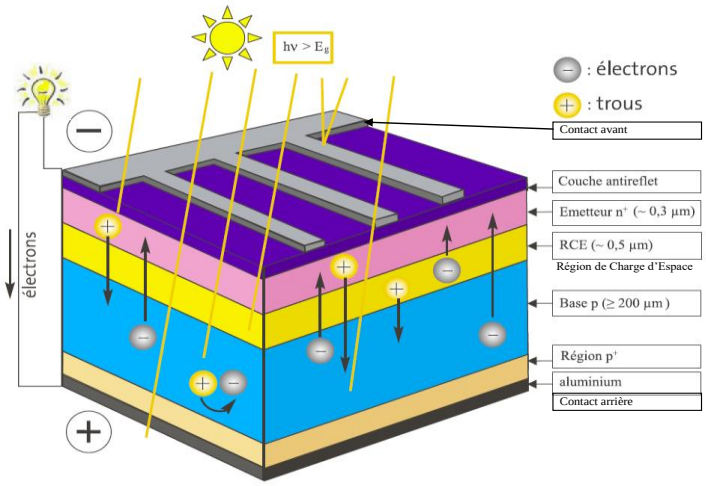


Figure II.30 : Composition d'une cellule PV

II.2.3.2.1. Les principales technologies de cellules solaires

On peut distinguer trois grandes familles de cellules solaires :

- **les cellules au silicium cristallin**, pour lesquelles l'élément actif est le silicium dopé dans la masse. Bien que plus ancienne, cette technologie représente encore 90 % des parts de marché du fait de sa robustesse et de ses performances (rendement modules allant de 12 à 20 % pour une durée de vie de 30 ans environ) ainsi que des investissements importants qui lui ont été destinés, que ce soit pour la transformation du silicium, l'élaboration des cellules ou l'assemblage des modules.
- **les cellules à base de couches minces** qui ont en commun le procédé de dépôt du matériau semiconducteur à faible épaisseur sur des substrats variés et donnant un aspect uni, produisant des modules de rendement légèrement inférieur (de 7 à 13 %). La part de marché pour l'ensemble de ces technologies est d'environ 10 % et reste relativement stable : ces filières ont perdu l'avantage de leur moindre coût de production avec les investissements massifs consentis dans le silicium au début des années 2000.
- **les cellules à base de photovoltaïque organique**, segment sur lequel la recherche s'intensifie dans la perspective de produire des cellules à très bas coût pour des applications nouvelles. Leur principe de fonctionnement est basé sur les cellules à colorant de Michaël Grätzel avec des variations sur le type de matériaux utilisés. Avec des rendements de l'ordre de 3 à 5 %, leur point faible reste aujourd'hui encore leur durée de vie limitée.

II.2.3.3. Caractéristique électriques d'une cellule PV

II.2.3.3.1. La courbe courant-tension

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe:

- Sa tension à vide : Vco. Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit: Icc. Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal: MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : Vopt, Iopt (parfois appelés aussi Vmpp, Impp).

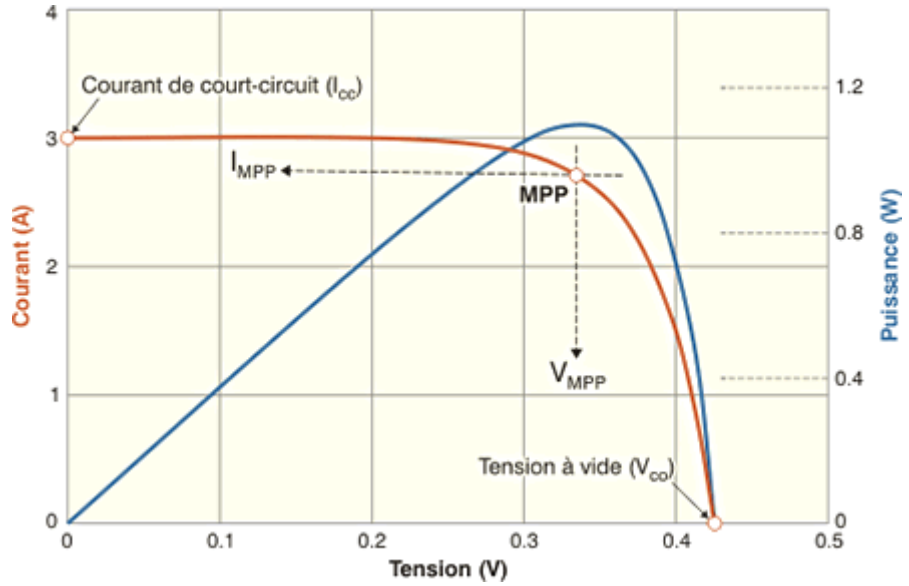


Figure II.31 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

II.2.3.3.2. La puissance crête d'une cellule PV

Dans le cas d'utilisation de photopiles avec le rayonnement solaire, la puissance crête d'une photopile, aussi nommée puissance "catalogue", notée Wc (Watt crête) ou Wp (Watt peak)(En moyenne, un Watt crête correspond à la puissance d'une cellule monocristalline d'une surface de 1 dm²), représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard :

- éclairement solaire de 1 kW/m^2 (correspondant à peu près à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil à midi par temps clair d'été) ;
- température de la cellule PV égale à + 25 °C.

répartition spectrale du rayonnement dit **AM.1,5 (correspondant au rayonnement solaire parvenant au sol après avoir traversé une atmosphère de masse 1 à 45 °).**

II.2.3.3.3. Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. On remarque que la tension Vmax correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant Imax qui augmente fortement avec l'éclairement.

Comme la forme de la courbe varie peu en fonction de l'éclairement, le rendement varie très peu en fonction de l'éclairement.

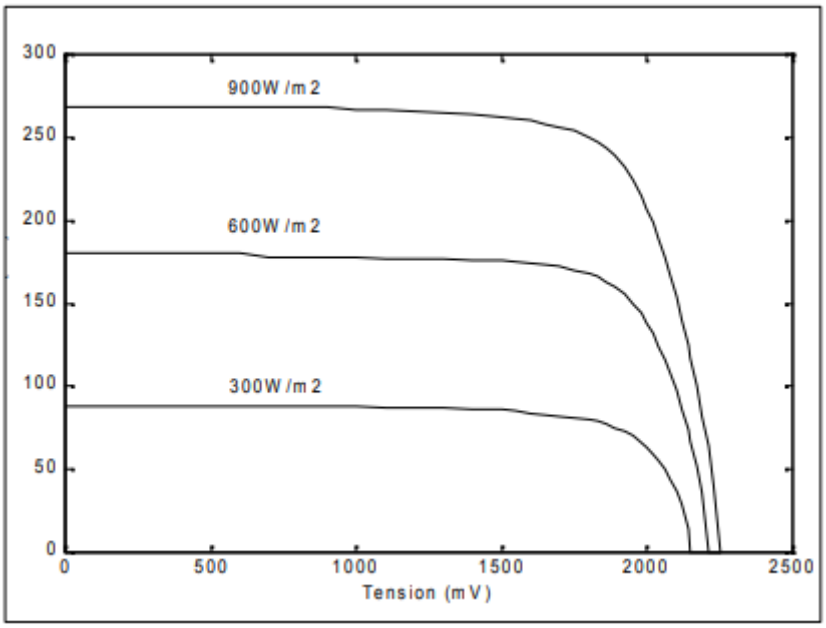


Figure II.32 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire.

II.2.3.3.4.Influence de la température

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. Le comportement de la cellule PV en fonction de la température est complexe.

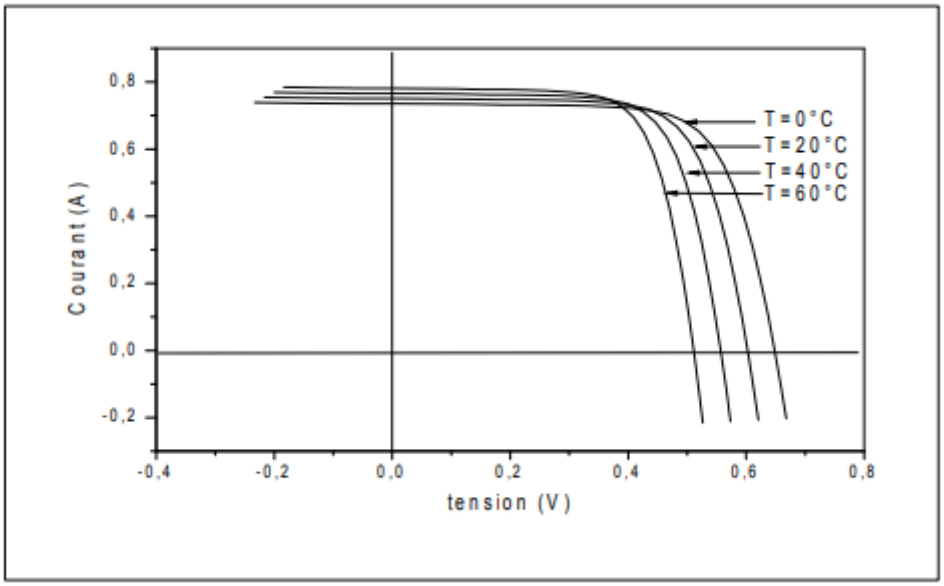


Figure II.33 : Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée.

II.2.3.4. Les systèmes photovoltaïques

II.2.3.4.1. Module solaire ou photovoltaïque

a. Association des cellules en série

Les caractéristiques électriques d'une seule cellule sont généralement insuffisantes pour alimenter les équipements électriques. Il faut associer les cellules en série pour obtenir un tension plus importante : le module solaire ou panneau photovoltaïque.

Un panneau photovoltaïque est un assemblage en série de cellules permettant d'obtenir une tension de 12 volts.

La puissance d'un panneau solaire est fonction de sa surface, c'est à dire du nombre de cellules photovoltaïques.

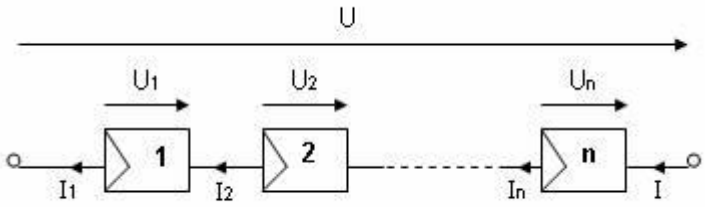


Figure II.34 : Association série

b. Association des cellules en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

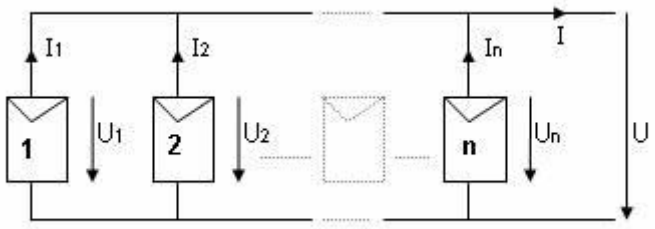


Figure II.35 : Association parallèle.

II.2.3.4.2. Les différentes installations photovoltaïques

a. Les installations sur site isolé

Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau.

L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins.

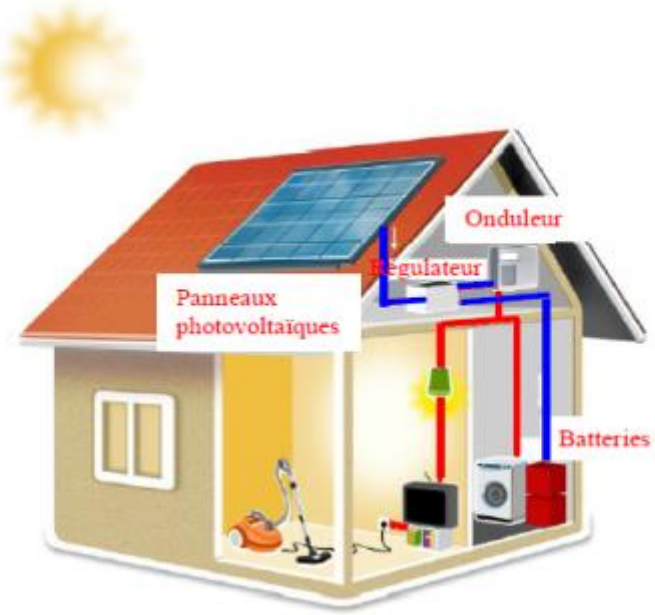


Figure II.36 : Installations photovoltaïque sur site isolé

Les panneaux photovoltaïques produisent un courant électrique continu.

Le régulateur optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection.

L'onduleur transforme le courant continu en alternatif pour alimenter les récepteur AC.

Les batteries sont chargées de jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais **temps.**

Des récepteurs DC spécifiques sont utilisables. Ces appareils sont particulièrement économes.

b. Les installations raccordées au réseau de distribution public

- ✓ **Solution avec injection totale**

Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution.

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en deux points :

- le raccordement du consommateur qui reste identique avec son compteur de consommation (on ne peut pas utiliser sa propre production),

- le nouveau branchement permettant d'injecter l'intégralité de la production dans le réseau, dispose de deux compteurs :

- l'un pour la production,
- l'autre pour la non-consommation (permet de vérifier qu'aucun soutirage frauduleux n'est réalisé).

✓ **Solution avec injection de surplus**

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point : l'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans le réseau.
Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'énergie nécessaire.
Un seul compteur supplémentaire est ajouté au compteur existant.

II.2.3.5. Domaine d'application

II.2.3.5.1.Les applications autonomes

- les satellites artificiels pour lesquels le photovoltaïque constitue la seule source d'énergie qui réponde à toutes les contraintes
- les appareils portables, aujourd'hui calculettes et montres, demain téléphones et micro-ordinateurs
- les applications « professionnelles », relais de télécommunications, balises maritimes ou aéroportuaires, signalisation routière, bornes de secours autoroutières, horodateurs de stationnement, etc.)
- l'électrification rurale des sites isolés, habitat dispersé, refuges, dispensaires et écoles dans les pays en voie de développement, … etc.

II.2.3.5.2. Les applications raccordées

Les applications raccordées au réseau public de distribution d'électricité que l'on peut subdiviser en trois grands domaines :

- les systèmes attachés à un bâtiment consommateur d'électricité, qu'il soit à usage résidentiel ou professionnel : les modules peuvent être " sur-imposés " à la toiture (toit en pente ou toiture-terrasse) ou bien " intégrés au bâti " dans une logique de double fonction (clos et couvert, bardage, verrière, garde-corps,… etc.).

- les systèmes posés sur ou intégrés à des structures non-consommatrices d'électricité par elles-mêmes mais pour lesquelles les panneaux remplissent une fonction bien identifiée en sus de la production d'électricité (ombrière de parking, couverture de passage public ou de quai de gare, mur antibruit,… etc.)
- les parcs photovoltaïques au sol, constitués de quantités importantes de modules posés sur des structures porteuses, dont la production est exclusivement destinée à l'alimentation directe du réseau électrique.

II.2.3.6. Avantages et inconvénients

Les principaux avantages d'un système photovoltaïque sont :

- Une autonomie énergétique à des sites non raccordés au réseau de distribution d'électricité;
- Un système fiable et exigeant très peu d'entretien;
- Une longue durée de vie utile si bien protégée (plus de 20 ans);
- La production d'une énergie propre et renouvelable;
- Un fonctionnement silencieux. En contrepartie,

Les principaux inconvénients des systèmes photovoltaïques sont :

- Le coût à l'achat est très élevé;
- Le coût de production de l'énergie est élevé;
- Le rendement énergétique des cellules photovoltaïques est faible (7 à 17 %);
- Le stockage de l'énergie est difficile avec les technologies actuelles;
- Les applications rentables en agriculture sont restreintes;
- Le recyclage des cellules photovoltaïques en fin de vie cause des problèmes environnementaux.

Chapitre 3

Exploitation de l'énergie éolienne

Exploitation de l'énergie éolienne

III.1. Introduction

Les éoliennes utilisent la force du vent pour produire de l'électricité. Elles sont montées aux sommets de mâts afin de bénéficier d'un maximum de puissance. A 30 mètres du sol ou plus au-dessus du sol, elles bénéficient d'une plus grande vitesse de vent, et évitent ainsi les turbulences aérodynamiques qui se trouvent proches du sol. Les éoliennes captent l'énergie du vent par leurs pales en forme d'hélices. Le plus souvent 2 ou 3 pales sont montées sur un axe pour constituer un rotor. Il existe de manière générale deux sortes d'éolienne, à axe vertical et à axe horizontal.

III.2. .L'histoire de l'éolienne

Des moulins à vents depuis l'antiquité pour moudre du grain, presser des produits oléifères, battre le fer, le cuivre, le feutre ou les fibres du papier... ou relever de l'eau).
1890 : Première éolienne industrielle développée par le Danois Poul La Cour pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend 72 exemplaires en 1908.
1955 : Une éolienne expérimentale de 800 kW est exploitée pendant 8 ans dans la Beauce. Deux éoliennes de 130 et 1 000 kW furent testées par EDF à Saint Rémy des landes(50).
1973 : premier choc pétrolier, le Danemark entreprend un vaste plan de développement éolien suivi par d'autres pays.

III.3. Le vent

Le vent est lié à la différence de pression atmosphérique existant sur terre, la direction du vent allant de la haute pression vers la basse pression.
De manière générale les vents sont plus forts sur les océans que sur le continent. En effet, la vitesse proche du sol dépend de la rugosité du terrain.

III.4. Principe de l'aérogénérateur

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en

énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou être utilisée par des charges isolées.

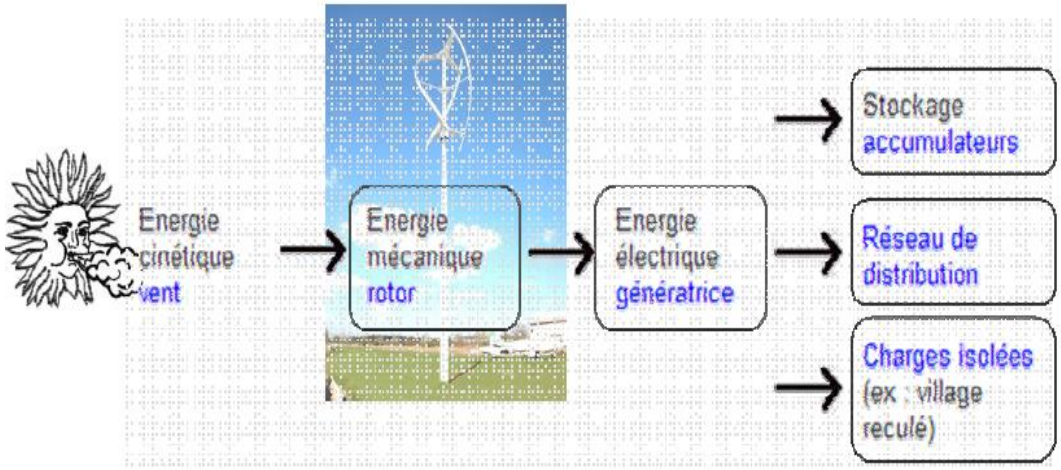


Figure III.1 : Principe de l'aérogénérateur

III.5. Les composants de l'aérogénérateur

a. La fondation et le mât

- ✓ **La fondation :** Elle assure l'encrage et la stabilité de l'éolienne, et leur taille est proportionnelle à la hauteur de l'aérogénérateur.
- ✓ **Le mât (la tour) :** Le mât est une composante principale de l'aérogénérateur. Il supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (Nacelle et Rotor).

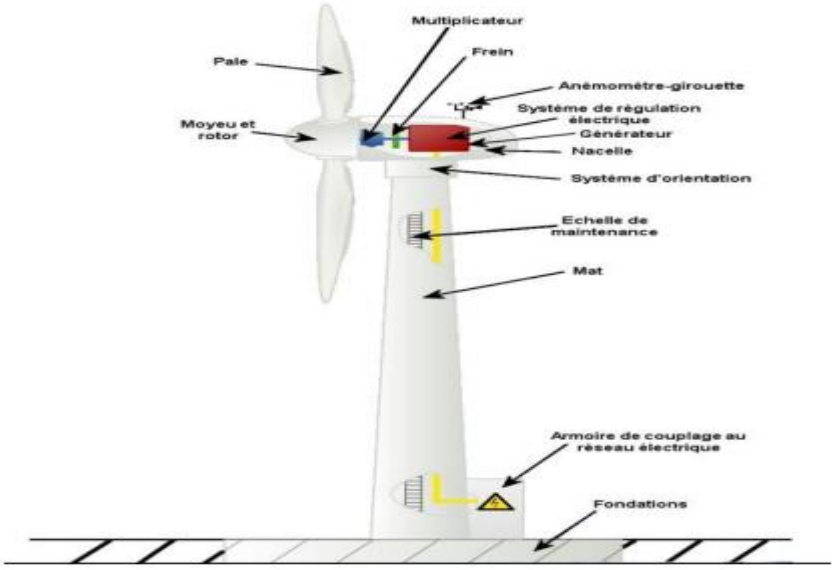


Figure III.2 : Les composants de l'éolienne

b. La nacelle :

La nacelle contient les principaux composants d'une éolienne, elle est généralement réalisée en résine renforcée de fibres de verre.

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses équipements.

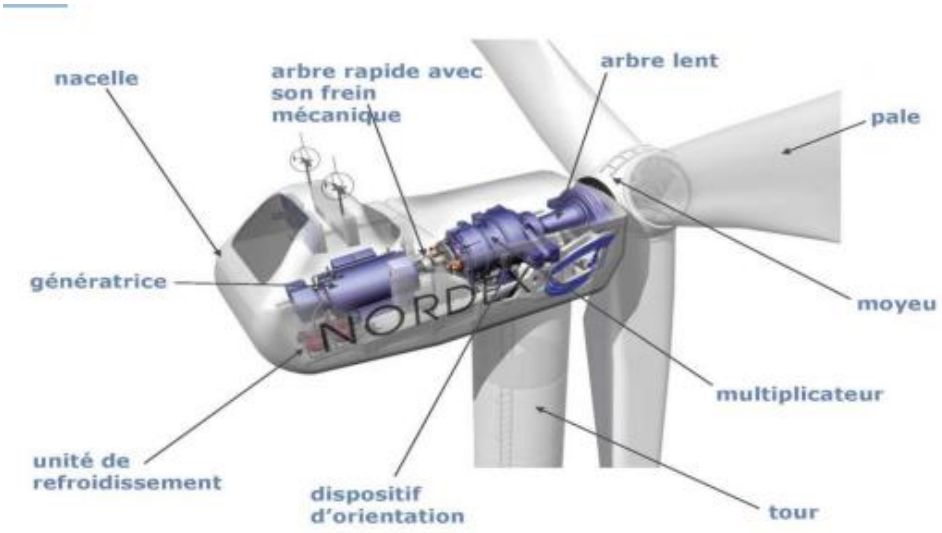


Figure III.3 : les équipements électriques de la nacelle

- **La nacelle comporte**

✓ **L'arbre principal au primaire (lent):** Ou arbre primaire relie le moyeu du rotor au multiplicateur qui tourne lentement (14.6 à 30.8 tours/min). Il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur.

✓ **Le multiplicateur ou boite de vitesse:** Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.

✓ **Un générateur électrique:** C'est un convertisseur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique à travers un champ électromagnétique qui entraîne la création du courant.

✓ **Un disque de freinage:** C'est un dispositif de sécurité, déclenché par l'anémomètre .Il permet l'arrêt total de l'éolienne en cas de vitesse élevé du vent (si vitesse du vent est supérieur à 25m /s) ou de maintenance.

✓ **Un système d'orientations :** C'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein. Il a donc pour but de disposer les pales face au vent pour produire un maximum d'électricité.

- ✓ **Le capot:** Couverture qui protège les composantes de la nacelle, fait en résine de polyester renforcé de fibres de reine (isolement acoustique).
- ✓ **Le châssis:** Il y a le châssis arrière droit qui support le générateur; de gauche qui supporte le contrôleur du TOP. Le châssis avant est formé d'une poutre rigide y sont fixées le paliersupport et le système d'orientations.
- ✓ **Mesure du vent :** sur le toit arrière de la nacelle on trouve deux capteurs :
- ✓ **La girouette:** sert à la direction du vent.
- ✓ **L'anémomètre:** indique la vitesse du vent.

c. Rotor

Il transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, il se compose de trois pales et il est relié à la nacelle par son moyeu (il fonctionne de la même manière qu'une hélice d'avion mais avec un sens de rotation inversé).

- ✓ **Cône du nez :** Le cône du nez protège le moyeu et les roulements de pale. Le cône est fabriqué en polyester et fibre de verre. Il est vissé à l'avant du moyeu et est soutenu par les roulements de pale
- ✓ **Pales :** Elles transfèrent la puissance du vent au moyeu du rotor. Elles peuvent être fabriquées en fibre de verre et résine époxy.
- ✓ **Moyeu :** Il supporte les pales et relie le rotor à la nacelle. Il fait varier l'angle d'attaque des pales simultanément. Le moyeu est de forme sphérique est fabriqué en fonte nodulaire.

6. Les types d'éolienne

Il existe deux types d'éolienne domestique. Elles se distinguent selon l'orientation de leur axe de rotation.

6.1 L'éolienne horizontale est le type d'éolienne le plus utilisé. Elle offre un rendement important mais elle est responsable de nombreuses nuisances non négligeables.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal:

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

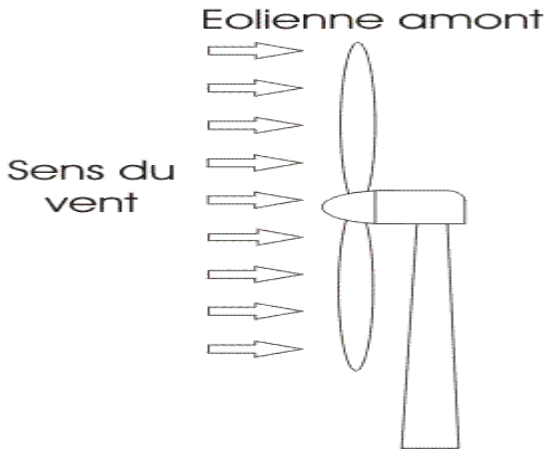


Figure III.4 : Schéma d'une éolienne à axe horizontal amont

• **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

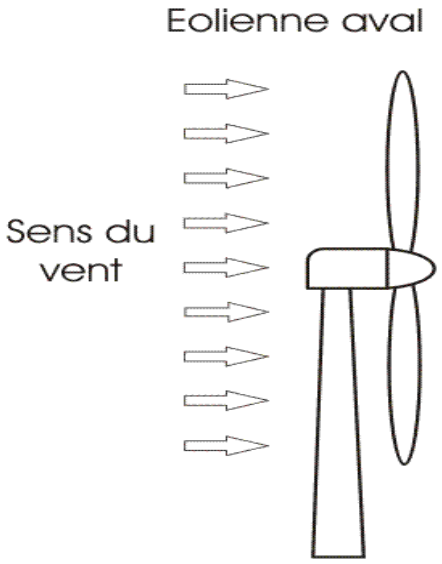


Figure III.5 : Schéma d'une éolienne à axe horizontal aval.

III.6.2. L'éolienne verticale est pour l'heure le type d'éolienne le moins répandu. Cependant, son rendement égal voire supérieur à celui d'une éolienne classique, et ses atouts d'intégration au bâti, de fonctionnement même avec un vent faible et d'occupation d'espace moindre, font d'elle une solution très intéressante, notamment pour les éoliennes domestiques.

• **Le rotor de Savonius** dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.

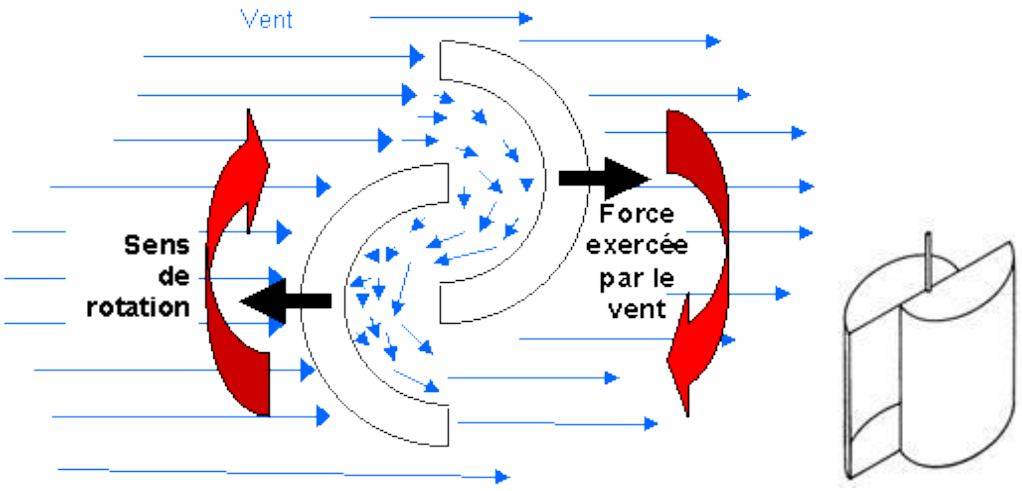


Figure III.6 : Rotor de Savonius

- **Le rotor de darrieus** est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.

Figure III.7 : Rotor de darrieus

7. Notions de calculs sur les éoliennes

- Puissance récupérable par les pâles

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface S, la puissance associée est donc :

$$P_{vent} = \frac{1}{2}.\rho.S.v^3 \qquad (1)$$

v : la vitesse du vent en m/s

ρ ~ 1,25 km/m^3, masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer

S : la surface d'air en m² balayée par les pales

- Coefficient de puissance Cp

Le coefficient Cp caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne. On peut le définir comme le rapport suivant :

$$Cp = \frac{Puissance\ disponile\ sur\ l\prime arbre}{Puissance\ disponible\ (récupérable)} \quad (2)$$

Cependant, cette énergie ne peut pas être entièrement récupérée, car il faut évacuer l'air qui a travaillé dans les pales du rotor. On introduit alors le coefficient de puissance Cp dans le calcul de la puissance P :

$$P_{turine} = \frac{1}{2}.Cp.\rho.S.v^3 \quad (3)$$

- Variation de vitesse du vent v en fonction de la hauteur h

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\alpha} \quad (4)$$

V : vitesse en m/s à la hauteur h 0 de référence au-dessus du sol

α : coefficient caractéristique du lieu entre 0,1 et 0,4

La puissance d'une éolienne est aussi en fonction de la hauteur du mât, la figure donne un aperçu sur l'évolution de la puissance d'une éolienne en fonction de sa hauteur et du diamètre balayé.

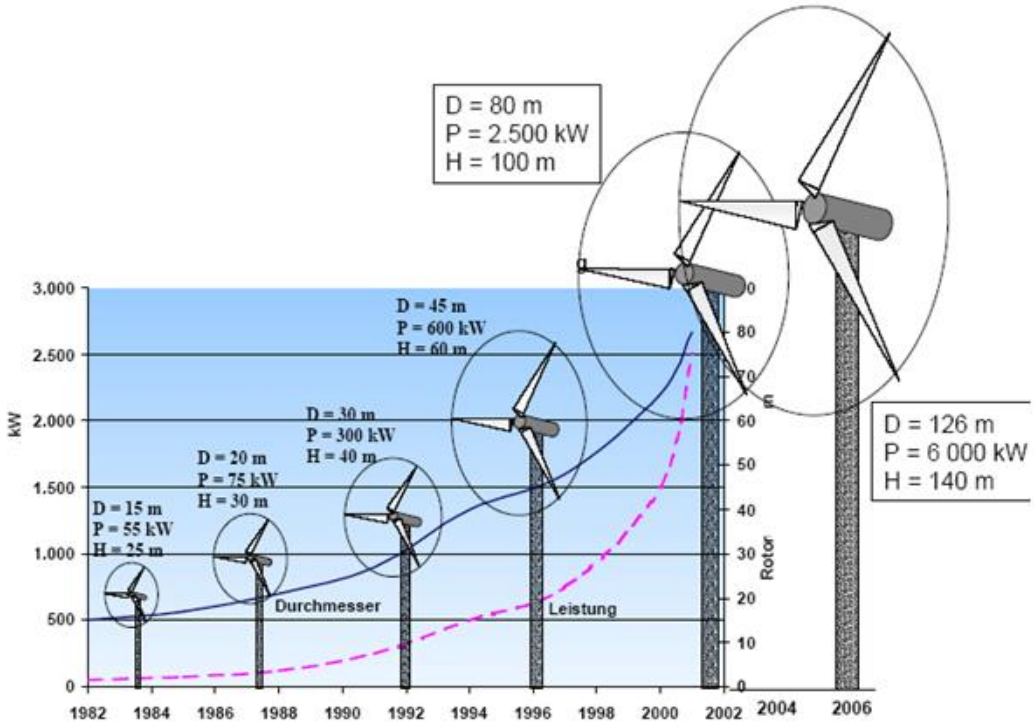


Figure III.8 : Tailles des éoliennes et puissance associée.

III.8. L'utilisation

L'énergie éolienne peut être utilisée de trois manières :

- **Conservation de l'énergie mécanique :** le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- **Transformation en force motrice** (pompage de liquides, compression de fluides…) ;

Et surtout celle qui nous intéresse plus particulièrement ici :

- **La production d'énergie électrique :** l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

III.9. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

A la lumière des fondements de la première section, certains avantages et inconvénients peuvent être mis en évidence.

III.9.1. Avantages de l'énergie éolienne

Parmi les avantages de l'énergie éolienne nous pouvons citer les suivants :

- Énergie renouvelable
- Disponible toute l'année
- Installation démontable
- Technologie bien maîtrisée
- Sans déchet et sans risque majeur

III.9.2 Inconvénients d'énergie éolienne:

- Impact sur le paysage
- Seulement si le vent souffle
- Installation à durée de vie limitée (20-30 ans)
- Rendement moyen (20-60%)

Chapitre 4

Exploitation d'autres sources renouvelables : hydraulique, géothermique, biomasse ...

Exploitation d'autres sources renouvelables : hydraulique, géothermique, biomasse

IV.1. L'énergie hydraulique

IV.1.1. Introduction : L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chute, cours d'eau, courant marin, marée, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

Du point de vue de la mécanique, l'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique dans le cas des courants marins ou des cours d'eau, des marées, des vagues, et une énergie potentielle dans le cas des chutes d'eau et barrages.

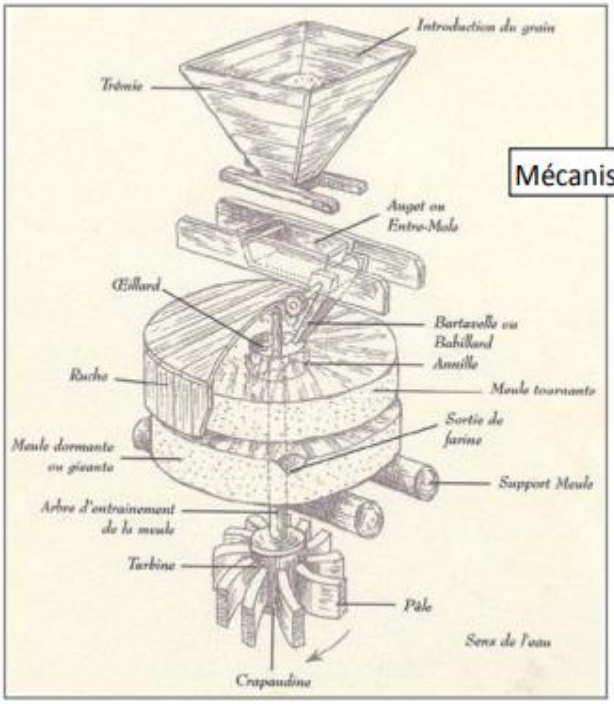
L'énergie hydraulique est issue du cycle de l'eau continuellement reproduit grâce au rayonnement solaire. Il s'agit donc bien d'une énergie renouvelable.

IV.1.2. Histoire de l'énergie hydraulique

Les hommes de l'Antiquité se sont assez peu intéressés à l'énergie hydraulique. Le climat méditerranéen s'y prête peu : rares sont les cours d'eau ayant un débit constant et les aqueducs sont une solution très coûteuse. La principale machine utilisant la force du courant comme source d'énergie durant l'Antiquité est la noria. Il s'agit d'une grande roue à ailettes installée sur un cours d'eau et actionnée par le courant. Un chapelet de godets fixés à cette roue élève et déverse l'eau dans un aqueduc associé qui la distribue. La noria serait apparue chez les Romains au I^{er} siècle avant Jésus-Christ.

Figure IV.1 : Noria à Hama en Syrie

Les premiers moulins à eau construits par les Grecs vers 300-250 avant Jésus-Christ se composaient d'une roue motrice horizontale plongée dans le courant d'eau. L'arbre de la roue se prolongeait verticalement en hauteur, traversait la meule dormante et entraînait la meule courante placée audessus. De petite dimension et à usage domestique, ce type de moulin fut utilisé à travers l'Europe jusqu'à la fin du Moyen Âge.



Mécanisme des moulins à axe vertical

Figure IV.2 : mécanisme des moulins à eau à roue verticale

Le moulin à eau à roue verticale est quant à lui, apparu en 240 avant Jésus-Christ : il nécessite l'utilisation d'un mécanisme d'engrenages, beaucoup plus complexe que celui des moulins à roue horizontale. La plus ancienne machine à eau connue utilisant un système bielle manivelle est représenté sur un bas-relief du IIIe siècle de notre ère, à Hiérapolis en Turquie. Elle actionnait une paire de scies destinées à couper de la pierre. Il s'agit cependant probablement d'un cas particulier. Le système bielle manivelle ne connaîtra un réel essor qu'à la Renaissance.

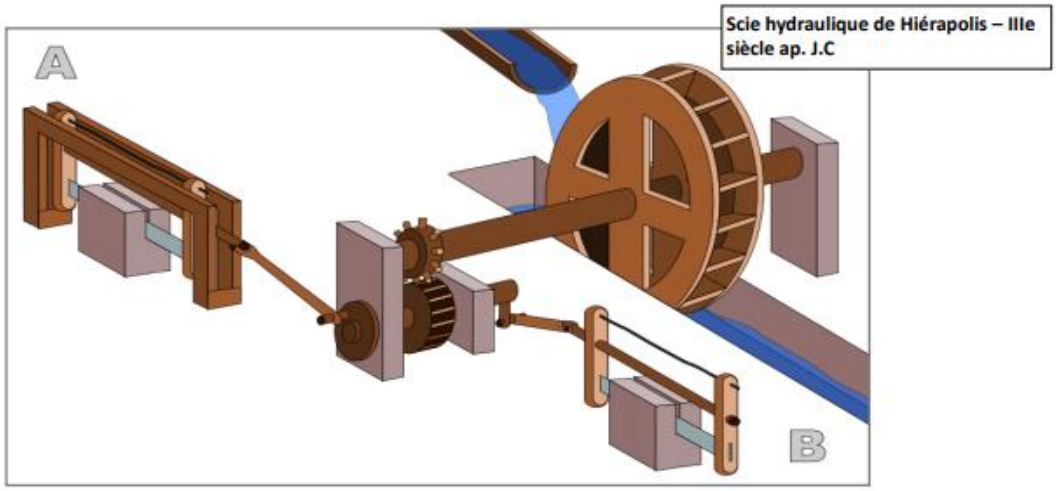


Figure IV.3 : Scie hydraulique de Hiérapolis

- **Les moulins à eau**

Les moulins à eau étaient très rares et de taille modeste durant l'Antiquité. Ils vont se multiplier et se perfectionner dans le courant du Moyen Âge. En effet, ce type de machine permet une productivité bien plus grande que celle fournie par les meules antiques actionnées par des esclaves : chaque moulin à eau peut moudre 150 kg de blé à l'heure ce qui correspond à peu près au travail de 40 personnes.

Figure IV.4 : Moulin à eau avec sa roue à aubes

À l'origine, ils servent essentiellement à moudre les grains, presser les olives, broyer les noix ou les raisins, voire les minéraux… Ils vont être adaptés à des activités industrielles proprement dites grâce à l'introduction d'un mécanisme intermédiaire révolutionnaire, l'arbre à cames : ce dispositif transforme en effet le mouvement circulaire continu de la roue motrice en un mouvement rectiligne et alternatif.

- **Les centrales hydro-électriques**

Ce n'est qu'au cours du XIXe siècle que les roues à aubes sont utilisées pour produire de l'électricité. À la fin du siècle, la turbine remplacera la roue hydraulique et les premiers barrages feront leur apparition.

En effet, au XIXe siècle Benoist de Fourneyron (1802-1867) invente la première turbine. Il utilise l'effet de la pression pour entraîner une roue à eau. Il commence en 1827 avec une première turbine aux forges de Pont-sur-l'Ognon en Franche-Comté. La hauteur de chute de 1,4m génère une puissance de 4,5 kW avec 60 tours par minute. Quelques années plus tard,en 1837, en Allemagne, il équipe une chute de 112 mètres avec une turbine de 55 cm de diamètre et atteint une puissance de 45 kW pour une vitesse de rotation de 2300 tours par minute.

Plus tard, l'apparition des dynamos et des alternateurs mis au point par le Belge Zénobe Gramme (1826-1901) entre 1869 et 1877 permettront de produire industriellement de l'électricité et de la transporter sur de longues distances.

L'hydroélectricité va connaître ensuite un développement spectaculaire. Ainsi, entre 1920 et 1940, plus de cinquante barrages sont édifiés.

Parmi toutes les énergies renouvelables, l'hydroélectricité est la seule à être exploitée à grande échelle, et ceci dans le monde entier. En effet, elle représente 16 % de la production électrique mondiale contre 67 % pour les combustibles fossiles (charbon, pétrole, etc.), 17 % pour le nucléaire et 0,3 % pour les centrales géothermiques.

Actuellement, la Belgique est équipée d'un parc d'une cinquantaine de centrales hydroélectriques dont la puissance installée totale est d'environ 100 MW.

IV.1.3. Les différents types de centrales hydroélectriques

Il existe différents types de centrales hydroélectriques en fonction de la hauteur de la chute d'eau et du volume de la réserve d'eau :

- **les centrales gravitaires** qui mettent à profit l'écoulement de l'eau au long d'une dénivellation du sol. On distingue les usines de lac (plus de 300 m de chute), les usines d'éclusée (entre 25 et 300 m) et les usines au fil de l'eau (moins de 25 m).
- **les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage** qui en plus de produire de l'énergie à partir de l'écoulement naturel, comportent un mode pompage permettant de stocker l'énergie produite par d'autres types de centrales lorsque la consommation est basse, par exemple la nuit, pour la redistribuer, en mode turbinage, lors des pics de consommation.

- les usines marémotrices au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (hydroliennes au sens strict) ou du mouvement des vagues.

IV.1.3.1. Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques : L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau, constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice. L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie mécanique. Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs :

- Ë hauteur de la chute,
- Ë débit de la chute.

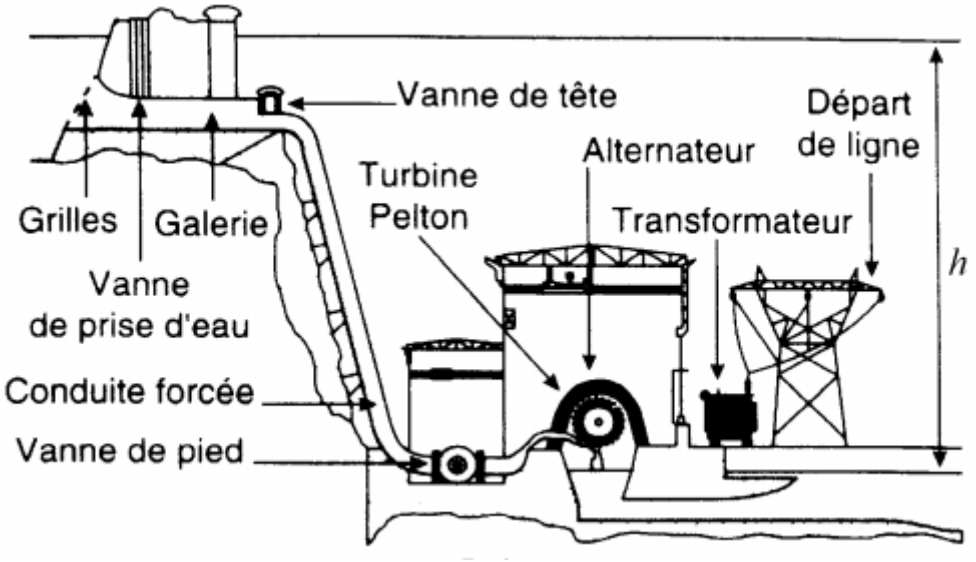


Figure IV.5 : Schéma fonctionnelle d'un centrale hydraulique

La définition de l'énergie potentielle est

$$W = m \cdot g \,.\, h \qquad (1)$$

Avec :

W : énergie potentielle en Joules

[J] m : masse de l'eau en Kilogrammes [Kg]

g : accélération de la pesanteur en mètres/secondes² [m/s²]

h : hauteur de la chute d'eau en mètres, [m]

La définition de la puissance est :

$$P = \frac{W}{t} \quad (2)$$

Avec : P : puissance utile de la chute d'eau en Watt, [W]

t : durée en secondes [s]

On peut alors calculer la puissance d'une chute d'eau en fonction de sa hauteur et de son débit:

$$P = \frac{\rho.V.g.h}{t} \quad (3)$$

Avec :

ρ : Masse volumique en Kilogrammes/mètres^3, [Kg/m^3]

V : Volume en mètres cube, [m3]

Ce qui donnera au final :

$$P = Q \cdot g \cdot h \quad (4)$$

Avec : Q : Débit de la chute d'eau en mètres3 /secondes, (m^3 /s)

On voit que, pour avoir une puissance importante, le produit Q.h doit être le plus élevé possible. L'idéal est d'avoir un grand débit sur une grande hauteur de chute. Malheureusement ces deux conditions sont rarement réunies.

IV.1.4. Les différents types de barrages

Il existe différents types de barrages:

IV.1.4.1. Barrage poids Un barrage poids est un barrage dont la propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau.

Figure IV.6 : Barrage de Vassiviere

IV.1.4.2. Barrage à contreforts Le barrage à contreforts reporte la poussée de l'eau sur les fondations inférieures et sur les rives.

Figure IV.7 : Barrage de Grandval

IV.1.4.3. Barrage en voûte La poussée de l'eau est reportée sur les flancs de la vallée au moyen d'un mur de béton arqué horizontalement, et parfois verticalement (on la qualifie alors de voûte à double courbure).

Ces énormes structures ne constituent que la partie supérieure d'un barrage hydroélectrique. Dans les sous-sols, se trouvent les turbines et les alternateurs.

Figure IV.8 : Barrage de Luzège

IV.1.5. Les turbines

Les centrales sont équipées de turbines qui transforment l'énergie du flux d'eau en une rotation mécanique de façon à actionner des alternateurs.

Le type de turbine utilisé dépend de la hauteur de la chute d'eau :

- pour les très faibles hauteurs de chute (1 à 30 mètres), des turbines à bulbe peuvent être utilisées ;
- pour les faibles chutes (5 à 50 mètres) et les débits importants, la turbine Kaplan est privilégiée : ses pales sont orientables ce qui permet d'ajuster la puissance de la turbine à la hauteur de chute en conservant un bon rendement ;

- la turbine Francis est utilisée pour les moyennes chutes (40 à 600 mètres) et moyen débit. L'eau entre par la périphérie des pales et est évacuée en leur centre ;
- la turbine Pelton est adaptée aux hautes chutes (200 à 1 800 mètres) et faible débit. Elle reçoit l'eau sous très haute pression par l'intermédiaire d'un injecteur (impact dynamique de l'eau sur l'auget).

Pour les petites centrales hydroélectriques, des turbines à prix bas (et dont le rendement est moins bon) et de concepts simples facilitent l'installation de petites unités.

IV.1.6. Les avantages et les inconvénients de la production d'électricité hydraulique

IV.1.6.1. Les avantages

La technologie des microcentrales hydroélectriques est très certainement la mieux maîtrisée de toutes les énergies renouvelables. L'équipement est caractérisé par sa grande robustesse, sa fiabilité et sa longue durée de vie. L'entretien de l'installation est très simple et les frais de fonctionnement sont réduits (quelques % de l'investissement). Il s'agit bien entendu d'une énergie propre dans ce sens qu'elle ne génère, directement, aucune émission nocive et ne nécessite aucun transport.

IV.1.6.2. Les inconvénients

- **Les limites**

La production d'électricité d'une microcentrale est parfois caractérisée par des fluctuations importantes suite à la grande variabilité des débits de certains sites. Les coûts d'investissement peuvent être assez importants pour certaines installations. L'installation d'une microcentrale hydroélectrique nécessite des sites appropriés (cours d'eau et chute)

- **Impacts négatifs sur l'environnement:**

Une microcentrale mal intégrée dans son environnement, peut générer des perturbations de diverses natures. L'atteinte au paysage par l'aspect peu esthétique de la centrale, de la prise d'eau et de la conduite forcée. Le bruit généré par les turbines, le multiplicateur de vitesse, l'alternateur, du transformateur et l'écoulement de l'eau peu provoquer une gêne pour le voisinage proche. La prise d'eau peut entraîner une perturbation du régime de l'eau et de la relation nappes aquifères - rivières. Dans la partie court-circuitée de la rivière, une eutrophisation du milieu aquatique ainsi qu'une modification et une perturbation de la faune peuvent être observées. L'installation peut constituer un obstacle aux migrations des poissons.

IV.1.7. Solutions d'accompagnement

Si la microcentrale est bien conçue, la plupart des atteintes à l'environnement peuvent être minimisées. En assurant le respect du débit réservé. Par la mise en place de passes à poissons. En veillant à l'intégration de la microcentrale dans le paysage. En outre, au niveau de l'entretien des cours d'eau, le dégrilleur peut jouer un rôle non négligeable en éliminant les éléments flottants.

IV.2. L'énergie géothermique

IV.2.1. Introduction

La géothermie, comme le fait deviner son étymologie, est l'énergie contenue dans la terre. C'est une énergie utilisée depuis des siècles notamment avec les thermes gallo-romains. Ce n'est cependant pas l'énergie la plus ancienne apprivoisée par l'homme puisque la première est incontestablement l'énergie de la biomasse, avec la maîtrise du feu.

On distingue 3 types de géothermie:

- La géothermie très basse énergie exploite des eaux à moins de 30°, ou directement l'énergie contenue dans les roches. (système lié à une pompe à chaleur)
- La géothermie basse énergie utilise de l'eau entre 30 et 100°
- La géothermie haute énergie utilise de l'eau ou de la vapeur à plus de 100°, jusqu'à 250°. Elle permet de produire de l'électricité.

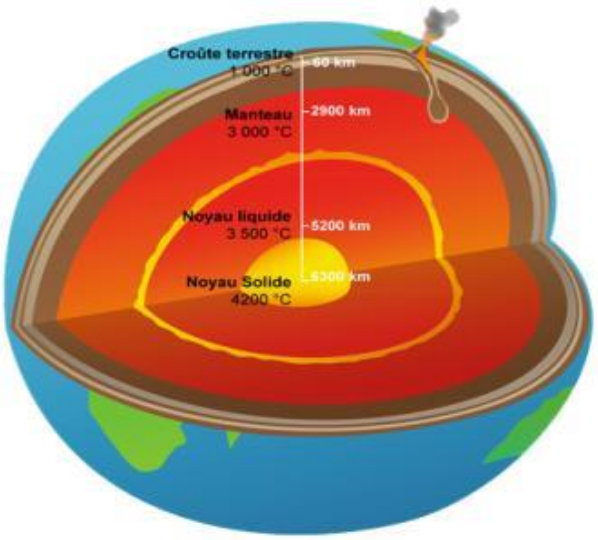


Figure IV.9 : Coupe du globe terrestre

IV.2.2 . Les différents types de géothermie

IV.2.2.1. La géothermie très basse température

La géothermie basse température provient de l'énergie solaire. En effet, c'est le rayonnement solaire qui chauffe les premiers mètres sous Terre. La terre a un fort pouvoir d'inertie, la température sous terre est donc plus constante qu'à sa surface, à savoir entre 10 et 20°C selon la saison (environ 14°C de moyenne) à 1m de profondeur.

IV.2.2.1.1. Captage horizontal

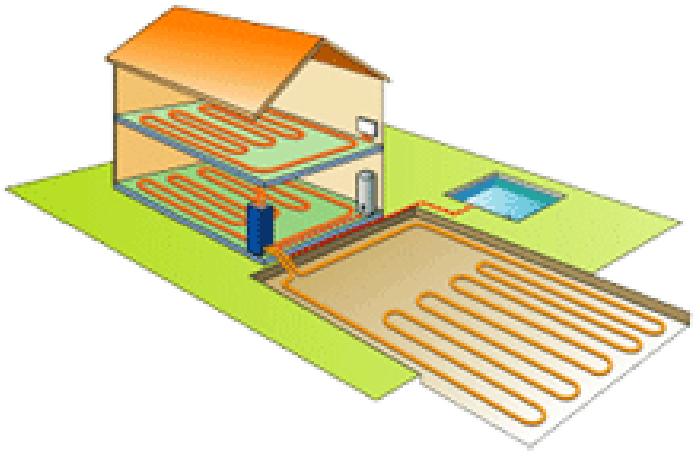


Figure IV.10 : Géothermie par captage horizontal.

C'est le type de captage le plus courant puisque le moins coûteux. En effet, le captage horizontal consiste à placer des tubes entre 80cm et 1,2m de la surface. A cette profondeur, la température est assez stable et ne varie que pendant les saisons entre 10 et 20°C. Si les travaux sont effectués lors de la construction de la maison, cela peut avoir un coût très faible puisque les engins sont déjà sur place. On considère qu'il faut entre 1,5 et 2 fois la surface de la maison pour chauffer convenablement. S'il est possible de planter des choses à la surface (fleurs, pelouse), les arbres et les terrasses sont eux à proscrire au-dessus des tubes. Cette technique possède un inconvénient majeur : si les tubes ne sont pas assez enterrés et/ou que les besoins en chauffage sont trop grands pour la surface de captage, la température de la terre risque de chuter jusqu'à faire geler la surface, tuant par la même tout ce que vous auriez pu planter au-dessus, y compris la pelouse.

IV.2.2.1..2. Captage vertical

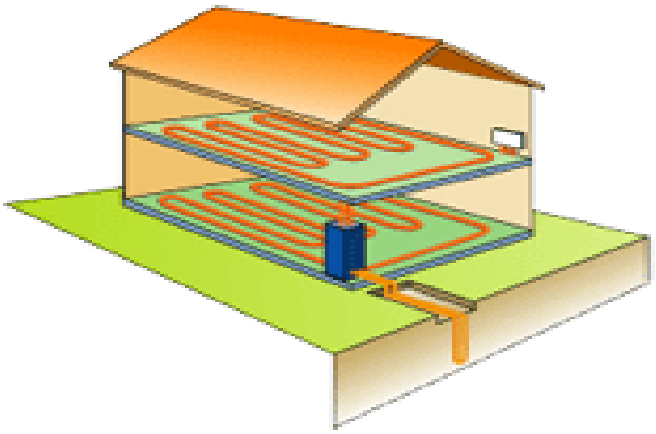


Figure IV.11: Géothermie par captage vertical.

Cette technologie requiert deux sondes de 15 à 100m de profondeur. A cette profondeur, la température est beaucoup plus stable qu'avec un captage horizontal. Cependant, les forages coûtent très chers rendant cette solution beaucoup plus coûteuse que la précédente. Les sondes doivent être situées à une dizaine de mètres d'écart minimum. Il est donc possible d'installer ce type de système sur des petites surfaces de terrains. De plus, la surface ne risque pas de geler.

IV.2.2.1. 3. Captage sur nappe phréatique

Les capteurs géothermiques sur nappes phréatiques, aussi appelés doublets géothermiques fonctionnent à l'aide d'un ou deux forages.

Lorsqu'il n'y a qu'un forage, l'eau est extraite de la nappe avec une pompe puis on récupère ses calories grâce à l'échangeur de la PAC et on rejette l'eau dans un ruisseau ou une rivière (lorsque la réglementation l'autorise). Il n'est en effet pas possible de rejeter l'eau refroidie au même endroit sous peine de refroidir aussi l'eau qui sera pompée, ce qui diminuera sensiblement les performances de l'installation.

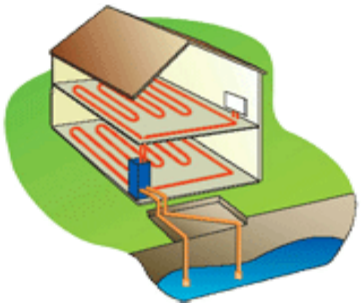


Figure IV.12 : Géothermie par captage sur eau de nappe.

L'autre solution (la plus courante) consiste à mettre en place une deuxième sonde donnant sur la même nappe phréatique, mais espacée de plusieurs mètres de la première. La température de l'eau pompée sera donc préservée de même que la quantité d'eau souterraine de la nappe qui est une denrée rare.

IV.2.2.1. 3.1. Principe de la pompe à chaleur géothermique

L'énergie géométrique s'obtient le plus souvent au moyen de pompes à chaleur, voir figure5, principe qui est également utilisé pour les forages profonds dans le cadre de travaux de grande envergure ne concernant pas les particuliers.

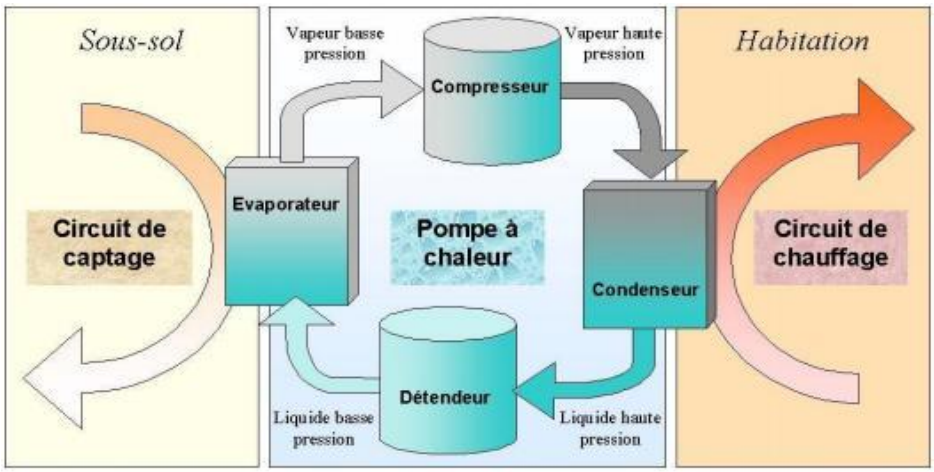


Figure IV.13 : Principe d'une pompe à chaleur appliquée à la géothermique

IV.2.2.2. La géothermie basse température

La géothermie basse température se situe à des profondeurs allant de quelques centaines à quelques milliers de profondeur. A cette profondeur, seuls les changements de température saisonnier influe et de façon minime. Vous le savez peut-être, le noyau de la Terre est un énorme amas de magma extrêmement chaud. C'est donc grâce à lui que la géothermie basse température existe. Une notion très importante est la notion de gradient de température. On estime ainsi que pour chaque kilomètre plus près du centre de la Terre, on gagne 3°C. Un gradient de température est la distance qu'il faut pour augmenter de 1°C. Il faut également savoir que selon le type de sous-sol, le gradient de température sera différent. C'est-à-dire qu'entre deux zones différentes, à la même profondeur, la température sera différente.

La géothermie basse température se situe entre 30°C et 100°C. Les bassins aquifères sont idéals pour la géothermie basse température, puisque leur gradient de température est faible.

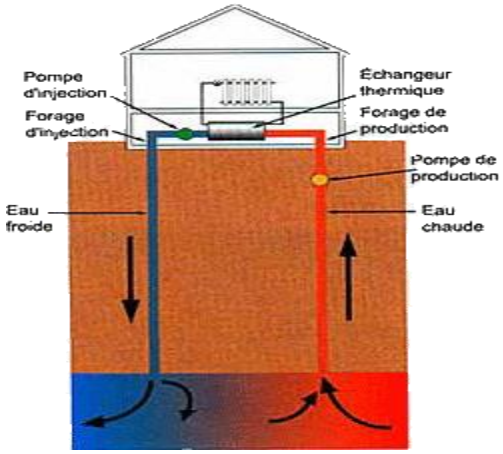


Figure IV.14 : Le principe du doublet géothermique

La géothermie basse température fonctionne sur le principe du doublet géothermique (capteurs verticaux sur nappe phréatiques). La température de l'eau est assez élevée pour se passer d'une pompe à chaleur. Il est en effet possible de chauffer directement des logements avec cette température via des réseaux de chaleur.

Beaucoup l'ignorent mais le plus grand réseau de chaleur (de France) se situe à Paris et fonctionne justement avec la géothermie basse température. D'autres réseaux de chaleur fonctionnent en effet avec des chaudières à biomasse ou encore grâce à des usines d'incinération de déchets.

IV.2.2.3. La géothermie haute/moyenne température

Le noyau de la Terre est un énorme amas de magma extrêmement chaud. C'est grâce à lui que la géothermie haute température existe. Une notion très importante est la notion de gradient de température. On estime ainsi que pour chaque kilomètre plus près du centre de la Terre, on gagne 3°C. Un gradient de température est la distance qu'il faut pour augmenter de 1°C. Il faut également savoir que selon le type de sous-sol, le gradient de température sera différent. C'est-à-dire qu'entre deux zones différentes, à la même profondeur, la température sera différente.

Cette technologie nécessite des sols particuliers où la température est naturellement élevée (>150°C), c'est le cas notamment des zones volcaniques où la température de sous-sol peut augmenter de 1000°C/100m.

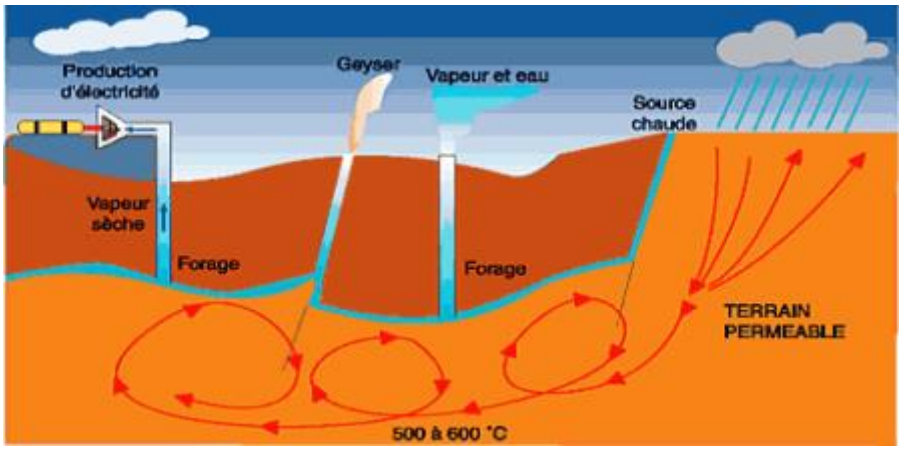


Figure IV.15 : Principe l'exploitation énergie géothermique

La géothermie haute température consiste là encore à un doublet géothermique. A ces profondeurs, l'eau pompée est supérieure à 200°C.

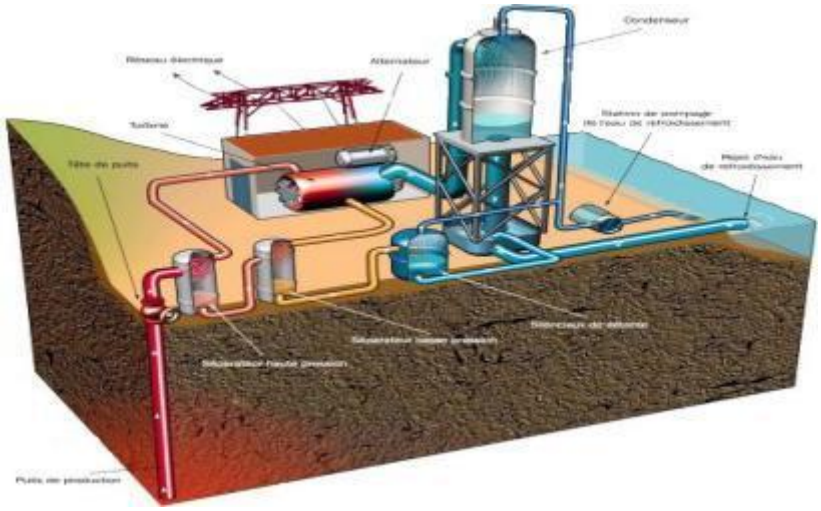


Figure IV.16 .: Schéma d'une installation-type de géothermie

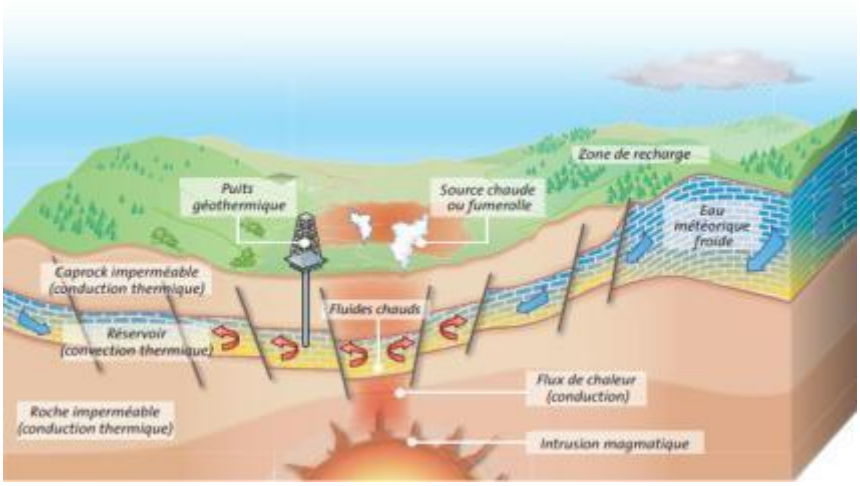


Figure IV.17 : Schéma de la centrale géothermique de la Bouillante

IV.2.3. Les différentes applications de la géothermie suivant la température

Tableau IV.1 Les différentes applications de la géothermie

Type de géothermie	Température en °C	Domaines d'utilisation	
Haute énergie	200 et plus		Production d'électricité par la méthode conventionnelle
	190	Réfrigération par absorption	
	180	Préparation de pâte à papier	
	170	Fabrication d'eau lourde	
	160	Séchage de poisson et de bois	
	150	Fabrication d'alumine	
Moyenne énergie	140	Séchage de produits agricoles	Production d'électricité par cycle binaire
	130	Evaporation	
	120	Production d'eau douce par distillation	
	110	Séchage de parpaings de ciment	
	100	Séchage de légumes	
	90	Déshydratation	
Basse énergie	80	Chauffage urbain – chauffage de serres	
	70	Réfrigération	
	60	Elevage d'animaux	
	50	Balnéothérapie	
	40	Chauffage de sols	
Très basse énergie	30	Piscine, fermentation	
	20	Pisciculture	

IV.2.4. La production d'électricité géothermique : La production d'électricité géothermique consiste à convertir la chaleur des nappes aquifères haute température (de 150 à 350°C) à l'aide de turboalternateurs. Si la température de la nappe est comprise entre 100 et 150°C, il est également possible de produire de l'électricité, mais en utilisant la technologie du cycle binaire. Dans ce cas, un échangeur transmet la chaleur de la nappe à un fluide (isobutane, isopentane, ammoniaque) qui a la propriété de se vaporiser à une température inférieure à celle de l'eau.

IV.2.5. La disponibilité des ressources géothermiques : Cette chaleur est variable selon les zones. À la surface du globe, le flux géothermique moyen est faible (il s'agit de l'énergie disponible pour une superficie et une période données). Ce flux s'élève à 0,06 watt par mètre carré et par an, soit 3 500 fois moins que le flux d'énergie solaire reçu en une année par la même surface de sol ! C'est pourquoi on cherche à exploiter en priorité les ressources calorifiques de certaines zones susceptibles de fournir des quantités d'énergie importantes. Ces « réservoirs géothermiques » sont disponibles dans tous les bassins sédimentaires de la planète mais la géothermie haute énergie se situe surtout à proximité de volcans. Dans ces zones, le flux géothermique peut atteindre 1 watt/m²/an.

Les réservoirs géothermiques ont tendance à s'épuiser au fur et à mesure de leur exploitation, certains plus rapidement que d'autres. Leurs capacités de renouvellement reposent sur :

- Des sources de chaleur internes à la croûte terrestre (radioactivité essentiellement et chaleur résiduelle) ;
- Des apports d'énergie venus de l'extérieur du réservoir (chaleur solaire) pour les usages de très basse température au moyen de pompes à chaleur (PAC). Assurer ces conditions de réchauffement se révèle d'autant plus crucial pour les PAC géothermales que le sous-sol est également refroidi par des facteurs extérieurs : en hiver, par exemple, on y récolte moins de chaleur ;
- La circulation des eaux souterraines qui leur permet de se réchauffer au contact de sources de chaleur éloignées du réservoir, avant de réintégrer celui-ci. Ainsi, pour pouvoir exploiter un réservoir de manière durable, on doit veiller à la reconstitution progressive de ses ressources calorifiques. Cela passe par le plafonnement des quantités de chaleur prélevées et la limitation dans le temps de l'exploitation du site.

En outre, la disponibilité de l'énergie géothermique est limitée géographiquement. Le transport de la chaleur sur de longues distances génère en effet d'importantes pertes

thermiques. Il en résulte une difficulté à faire correspondre lieux de production et lieux de consommation pour couvrir les besoins en énergie.

IV.3. L'énergie biomasse

IV.3.1. Définition et catégories

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol).

Il existe trois formes de biomasse présentant des caractéristiques physiques très variées :

- les solides (ex : paille, copeaux, bûches) ;
- les liquides (ex : huiles végétales, bioalcools) ;
- les gazeux (ex : biogaz).

La biomasse est une réserve d'énergie considérable née de l'action du soleil grâce à la photosynthèse. Elle existe sous forme de carbone organique. Sa valorisation se fait par des procédés spécifiques selon le type de constituant.

La biomasse n'est considérée comme une source d'énergie renouvelable que si sa régénération est au moins égale à sa consommation. Ainsi, par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres.

IV.3.2. Fonctionnement technique ou scientifique

La valorisation énergétique de la biomasse peut produire trois formes d'énergie utile, en fonction du type de biomasse et des techniques mises en œuvre :

- de la chaleur ;
- de l'électricité ;
- une force motrice de déplacement.

IV.3.3. Procédés de valorisation de la biomasse

On distingue trois procédés de valorisation de la biomasse : la voie sèche, la voie humide et la production de biocarburants.

IV.3.3.1. La voie sèche

La voie sèche est principalement constituée par la filière thermochimique, qui regroupe les technologies de la combustion, de la gazéification et de la pyrolyse :

- **la combustion** produit de la chaleur par l'oxydation complète du combustible, en général en présence d'un excès d'air. L'eau chaude ou la vapeur ainsi obtenues sont utilisées dans les procédés industriels ou dans les réseaux de chauffage urbain. La vapeur peut également être envoyée dans une turbine ou un moteur à vapeur pour la production d'énergie mécanique ou, surtout, d'électricité. La production combinée de chaleur et d'électricité est appelée cogénération ;
- la gazéification de la biomasse solide est réalisée dans un réacteur spécifique, le gazogène. Elle consiste en une réaction entre le carbone issu de la biomasse et des gaz réactants (la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone). Le résultat est la transformation complète de la matière solide, hormis les cendres, en un gaz combustible composé d'hydrogène et d'oxyde de carbone. Ce gaz, après épuration et filtration, est brûlé dans un moteur à combustion pour la production d'énergie mécanique ou d'électricité. La cogénération est également possible avec la technique de gazéification ;
- la pyrolyse est la décomposition de la matière carbonée sous l'action de la chaleur. Elle conduit à la production d'un solide, le charbon de bois ou le charbon végétal, d'un liquide, l'huile pyrolytique, et d'un gaz combustible. Une variante de la pyrolyse, la thermolyse, est développée actuellement pour le traitement des déchets organiques ménagers ou des biomasses contaminées.

IV.3.3.2. La voie humide

La principale filière de cette voie est la méthanisation. Il s'agit d'un procédé basé sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique. Elle s'opère dans un digesteur chauffé et sans oxygène (réaction en milieu anaérobie). Ce procédé permet de produire :

- **le biogaz** qui est le produit de la digestion anaérobie des matériaux organiques ;
- **le digestat** qui est le produit résidu de la méthanisation, composé de matière organique non biodégradable.

IV.3.3.3. La production de biocarburants

Les biocarburants sont des carburants liquides ou gazeux créés à partir d'une réaction :

- entre l'huile (colza, tournesol) et l'alcool dans le cas du biodiesel ;

- à partir d'un mélange de sucre fermenté et d'essence dans le cas du bioéthanol.

Il existe 3 générations de biocarburants :

- **1ère génération** : biocarburants créés à partir des graines ;
- **2e génération** : biocarburants créés à partir des résidus non alimentaires des cultures (paille, tiges, bois) ;
- **3e génération** : biocarburants créés à partir d'hydrogène produit par des micro-organismes ou à partir d'huile produite par des microalgues.

Les biocarburants de 2e et 3e génération ont entre autres pour vertu de ne pas « occuper » un territoire agricole en compétition avec la production d'aliments pour l'homme. Leur maturité industrielle, tout particulièrement pour la 3e génération, reste à établir.

Ces biocarburants peuvent prendre différentes formes :

- des esters d'huiles végétales produits, par exemple, à partir du colza (biodiesel) ;
- de l'éthanol, produit à partir de blé et de betterave, incorporable dans le super sans plomb sous forme d'ETBE (éthyl tertio butyl ether).

La valorisation de la biomasse ne produit toutefois pas que des biocarburants.

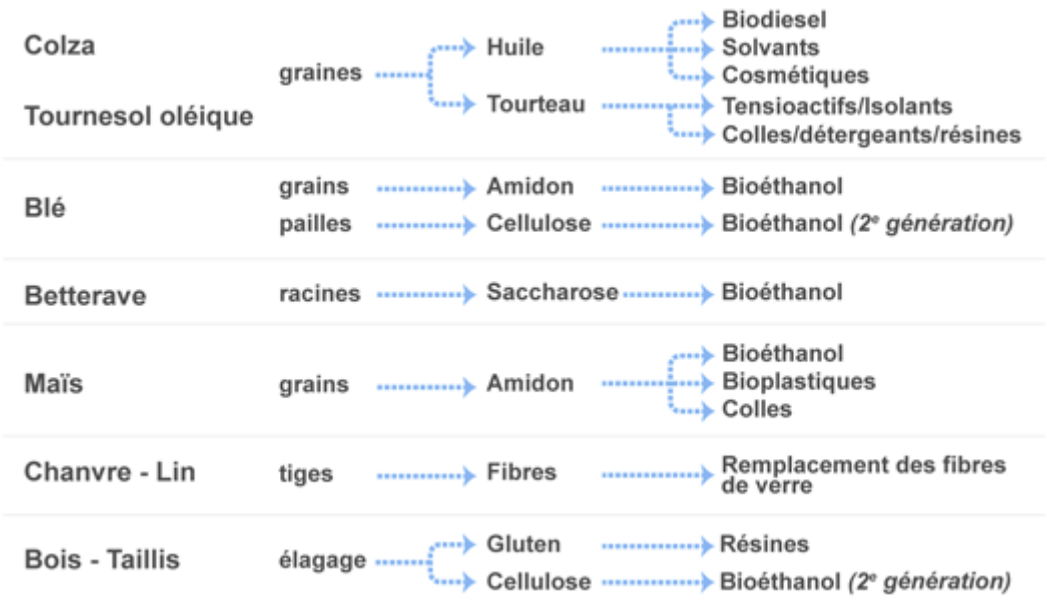


Figure IV.18 : Voies de valorisation de la biomasse

IV.3.4. Enjeux par rapport à l'énergie

- **Une énergie naturelle et propre**

La valorisation énergétique de la biomasse peut permettre d'augmenter la part des énergies renouvelables dans un mix énergétique et de réduire la dépendance au pétrole ou au gaz. La diversité des matières organiques constituant la biomasse permet à de nombreux pays d'avoir accès à cette ressource. Elle peut donc favoriser leur indépendance énergétique.

De plus, la biomasse participe à la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre dans la mesure où le CO_2 dégagé par la combustion des bioénergies est compensé par le CO_2 absorbé par les végétaux lors de leur croissance. La récupération du biogaz dans les décharges permet de capter le méthane issu de la biomasse (dont l'effet de serre est considéré comme 21 fois plus fort que le CO_2).

- **Une énergie renouvelable si son utilisation est maîtrisée**

L'utilisation de la biomasse peut dans certains cas engendrer des déséquilibres environnementaux. L'amalgame entre énergie propre et énergie renouvelable est fréquent. Il est important de préciser que la biomasse ne peut être considérée comme une énergie renouvelable que si elle est renouvelée.

- **Les biocarburants en débat**

La concession de parcelles à l'industrie des biocarburants a réduit la taille des terres agricoles destinées à l'alimentation. Certains experts craignent que l'essor des biocarburants déclenche une crise alimentaire mondiale, en particulier dans le contexte d'une forte croissance démographique terrestre (plus de 100 millions d'individus en plus par an). Après en avoir fait l'éloge, certains médias et ONG ont opté pour des campagnes de dénigrement et de désinformation globale à l'égard des biocarburants en omettant de souligner les différences propres à chaque génération.

IV.3.5. Zone de présence ou d'application

Hors consommation domestique, les principaux pays dans le monde ayant recours à la biomasse sont le Brésil, les États-Unis et l'Inde.

La biomasse et les déchets constituent 67,6 % de la production primaire d'énergie renouvelable dans l'Union européenne en 2010.

Chapitre 5

Stockage, pile à combustibles et hydrogène

Stockage, pile à combustibles et hydrogène

V.1. Introduction

Le stockage de l'énergie est un aspect essentiel de la transition vers un avenir énergétique durable. Ce chapitre se penchera sur deux technologies clés dans ce domaine : les piles à combustibles et l'hydrogène. Ces technologies offrent des solutions prometteuses pour stocker et libérer de l'énergie de manière efficace, propre et polyvalente.

V.2. Le stockage de l'énergie renouvelable

Le stockage de l'énergie renouvelable est essentiel pour pallier l'intermittence de la production d'énergie à partir de sources renouvelables comme le soleil et le vent. Voici différentes formes de stockage de l'énergie renouvelable :

V.2.1. Mode de stockage mécanique

- **Station de transfert d'énergie par pompage (STEP)**

Les stations de pompage sont des technologies de stockage par gravitation. Elles sont composées de deux retenues d'eau à des hauteurs différentes, reliées par un système de canalisations. Elles sont équipées d'un système de pompage, permettant de transférer l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur en heures creuses. En heures pleines, la station fonctionne comme une centrale hydroélectrique classique.

Ce système de stockage repose sur le principe de l'énergie gravitaire. Il représente près de 99 % des capacités de stockage massif d'énergie installées dans le monde, avec près de 400 STEP pour une capacité totale d'environ 125 GW.

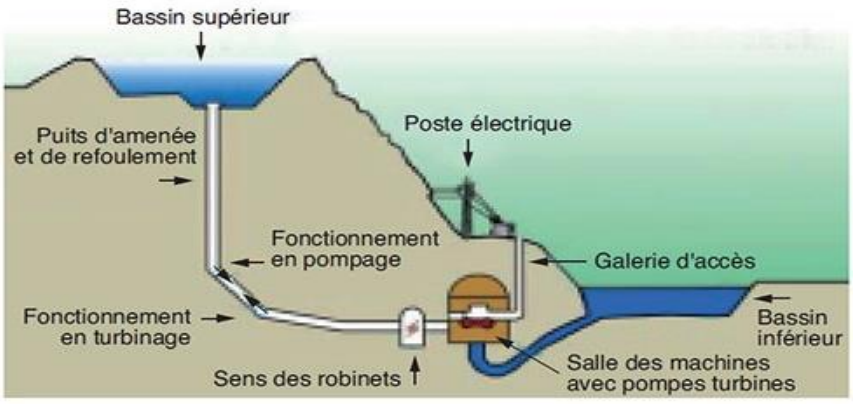


Figure V.1 : Schéma de fonctionnement d'une (STEP).

La STEP est une technologie mature nécessitant néanmoins des installations conséquentes et un contexte géographique spécifique. Elle est en plein essor dans les régions montagneuses du monde entier, notamment en Asie, où est prévu un doublement de la capacité d'ici à 2020, et en Europe, où plus de dix projets sont actuellement en développement. Plusieurs projets consistent également à convertir un barrage hydroélectrique existant en STEP.

D'autres approches géographiques sont également à l'étude comme l'installation de STEP en bord de mer avec un réservoir positionné au-dessus d'une falaise, l'utilisation du dénivelé créé lors d'une extraction minière à ciel ouvert, la création d'îles ou de digues artificielles en offshore, ou encore la construction de digues en liaison avec des dépressions topologiques terrestres. Un cas opérationnel de STEP en bord de mer existe à Okinawa au Japon depuis 15 ans, le dénivelé de la falaise étant d'environ 100 m et la puissance fournie de l'ordre de 100 MW.

- **Stockage par air comprimé classique (CAES, Compressed Air Energy Storage)**

Le principe du CAES repose sur l'élasticité de l'air : l'air est d'abord comprimé via un système de compresseurs, à très haute pression (100 à 300 bar) pour être stocké dans un réservoir (cavités souterraines par exemple). Pour récupérer cette énergie potentielle, l'air est détendu dans une turbine qui entraîne un alternateur. Comme l'air se réchauffe pendant sa compression, la chaleur à la sortie du compresseur peut être récupérée via des échangeurs et stockée afin d'être utilisée pour réchauffer la turbine.

Il existe deux types de stockage à air comprimé : CAES classique et Advanced Adiabatic CAES (AA-CAES)

→ CAES classique

Le système fonctionne pratiquement comme une centrale à gaz sauf que les phases de compression et de détente sont séparées et décalées dans le temps. Ce système met en œuvre une turbine à gaz; la chaleur produite n'est pas stockée mais seulement récupérée et le stockage de l'air comprimé se fait dans des cavernes souterraines.

→ Advanced Adiabatic CAES (AA-CAES)

Le principe du AA-CAES reprend cette idée, mais propose que les deux énergies thermique et de compression soient stockées dans deux réservoirs spécifiques. La chaleur nécessaire pour réchauffer l'air comprimé pour sa détente est apportée par cette réserve et le système s'affranchit ainsi des apports en gaz comme dans le CAES classique.

* Un processus est dit adiabatique lorsque les deux systèmes qui le composent n'échangent pas de chaleur entre eux.

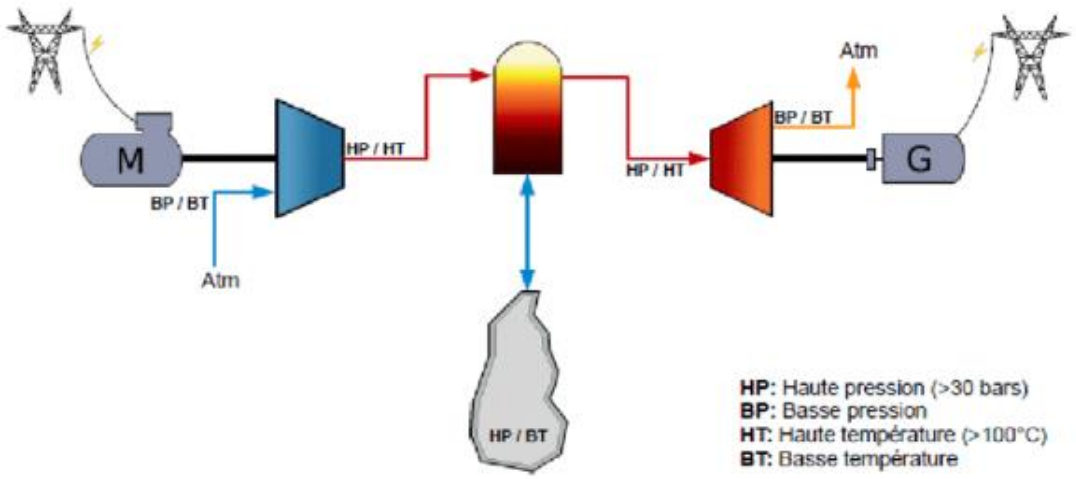


Figure V.2 : Principe du AA-CAES

- **Energie mécanique cinétique**

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie cinétique dans un « volant d'inertie », dispositif en forme de roue tournant autour de son axe central. Une machine électrique lui fournit l'énergie cinétique (fonctionnement moteur) et la récupère selon les besoins (fonctionnement générateur), entraînant une baisse de la vitesse de rotation du volant d'inertie. Ce système permet de restituer plus de 80% de l'énergie accumulée mais pour un temps de stockage limité. En pratique, le volant d'inertie est utilisé pour un lissage à très court terme de la fourniture d'énergie au sein d'appareils de production. C'est notamment le cas des moteurs thermiques et surtout des moteurs diesel.

V.2.2. Mode de stockage électrochimique et électrostatique

Ce mode de stockage, dont le principe repose sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique, concerne principalement les batteries, piles et accumulateurs.

Les batteries utilisées comme réserve massive d'énergie peuvent délivrer une puissance pendant quelques heures ou sur plusieurs jours et résister à un certain nombre de cycles de charge/décharge. Leur utilisation se situe plutôt à l'échelle d'un bâtiment ou d'une petite collectivité où elles permettent d'optimiser la gestion de sources d'énergie renouvelables, solaire ou éolienne (ou autre), notamment pour le lissage de la charge journalière en stationnaire. Quelques batteries au plomb peuvent répondre à ce besoin, de même que des batteries au sodium ou lithium-ion, mais ce sont surtout les batteries à flux qui font l'objet d'études pour le stockage massif à ce jour.

En effet, la notion de durée de vie liée au nombre de cycles de charge/déchargeentre en ligne de compte pour l'utilisation des batteries en stationnaire : les batteries à flux peuvent revendiquer plus de 10 000 cycles, contre quelques centaines pour les batteries au plomb, voire quelques milliers pour les nouvelles batteries sodium (NaS et Zebra). Les systèmes de stockage électrochimique sont généralement composés d'un ensemble de batteries qui cumule la puissance de chaque unité. Leur attractivité repose sur leur flexibilité et leur réactivité.

• Batteries à flux

Ces batteries permettent le stockage des couples électrochimiques (électrolytes à l'état liquide) à l'extérieur de la batterie. Les électrolytes circulent à travers une cellule d'échange d'ions dont les deux compartiments sont séparés par une membrane solide.

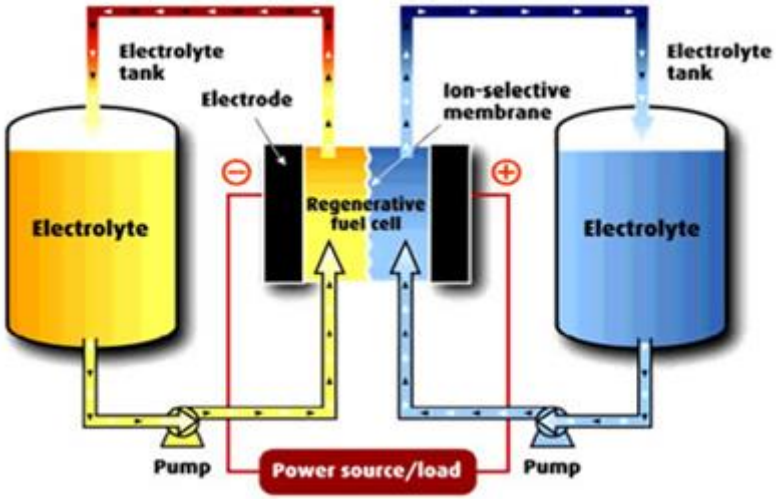


Figure V.3 : Schéma d'n batterie à circulation

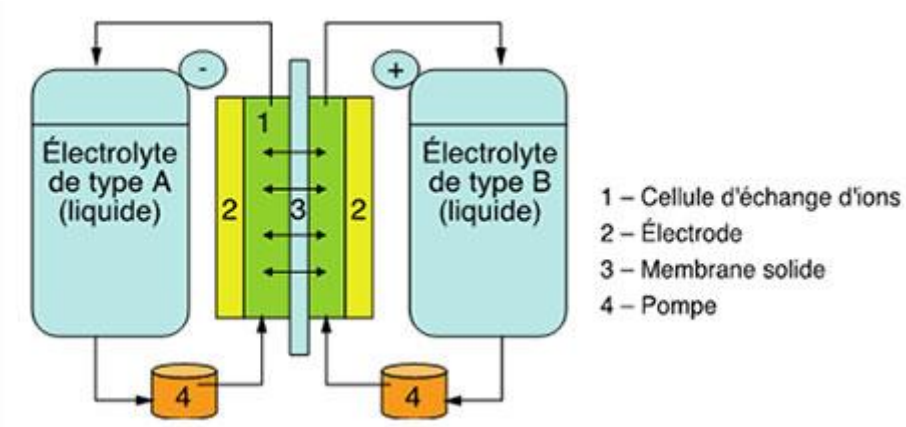


Figure V.4 : Principe d'une batterie à flux

Les électrolytes peuvent également fonctionner comme liquides caloporteurs, facilitant ainsi la régulation de température, alors que les batteries conventionnelles dépendent d'une conduction passive de la chaleur, conduisant à des températures élevées à l'intérieur des cellules. Plusieurs types de batteries à flux sont ou ont été étudiés mais deux seulement sont actuellement opérationnels.

→ Batteries Zn-Br

Ces batteries sont fondées sur le couple zinc/brome (Zn+/Br-). Plusieurs démonstrateurs ont été réalisés (par exemple un système de 400 kWh réalisé à partir de modules de base de 50 kWh à Akron, Michigan) et quelques installations commerciales sont aujourd'hui opérationnelles.
Cependant, la nature corrosive du brome et la formation de dépôts solides de zinc constituent un frein important à leur mise en œuvre.

→ Batteries Vanadium-Redox Flow (VBR)

Le stockage de l'énergie est assuré par les couples redox (réaction chimique d'oxydo-réduction par échanges d'électrons) de vanadium dans une solution d'acide sulfurique, V2+/V3+ dans l'électrolyte négatif et V4+/V5+ dans l'électrolyte positif.
Un des avantages de cette technologie réside dans l'absence de contamination possible d'un compartiment électrolytique à l'autre puisqu'il s'agit du même composant chimique.
Plusieurs installations sont en service à ce jour :

- King Island en Tasmanie, qui fonctionne depuis 2003 avec une batterie de capacité moyenne de 200kW/4h ou de 400kW/10 s en période de pointe ;
- L'unité de stockage associée à la ferme éolienne de Tomamae Villa au Japon, d'une capacité de 4 MW/90min, en service depuis 2005.

• Batteries sodium pour stockage stationnaire

En ce qui concerne ce type de batteries, la R&D est aujourd'hui en plein essor et les installations se multiplient. Ces batteries fonctionnent à ce jour à haute température (de l'ordre de 300 °C) puisque les électrodes sont sous forme liquide.

→ Batteries sodium/soufre (NaS)

Les électrodes liquides sont des formes ioniques de sodium (pôle négatif) et de soufre (pôle positif), l'électrolyte solide intermédiaire est une céramique d'alumine bêta (de sodium) et la

température nécessaire est comprise entre 290 et 390 °C. Plus de 190 systèmes sont aujourd'hui installés au Japon, dont le plus performant a été mis en service en 2008 en liaison avec la ferme éolienne de Rokkasho et affiche une puissance de 34MW. Une installation expérimentale de 1 MW de puissance, développée par EDF et NGK, a été construite fin 2009 à la Réunion pour soutenir le réseau électrique de l'île en période de pointe.

→ Batteries sodium/chlorure de nickel (Zebra)

Le concept de base a été défini dès 1985 à l'université de Pretoria (Zebra, Zeolite Battery Research Africa Project) : il met en jeu une électrode positive, mélange de Ni-NaCl, avec une électrode liquide auxiliaire, le NaAlCl4. Ces batteries sont encore limitées aux applications mobiles, mais un système de 100 kWh a été testé en Ontario (par Halton Hills Hydro) avec un rendement de 84 %.

• Batteries lithium-ion "avancées"

Le fonctionnement de la batterie lithium-ion repose sur l' échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive et une électrode négative. La R&D s'intensifie sur des batteries Li-ion stationnaires de capacité compatible avec le stockage temporaire d'énergie renouvelable. Ainsi, on peut citer à titre d'exemple le projet européen STOREvisant à mettre en service en 2013 un système de stockage (produit par Saft) capable de restituer 1 MW/3 h sur l'île espagnole de Grande Canarie.

Le plus important démonstrateur à ce jour se trouve en Chine, à Zhangbei ; il a été mis en service fin 2011 et allie un système de batteries Li-ion (produit par BYD) d'une capacité de 20 à 36 MW sur 4 à 6 h avec une production éolienne de 100 MW et une production solaire de 40 MW.

V.2.3. Mode de stockage thermique

Le stockage de chaleur concerne principalement le chauffage (ou la climatisation) des bâtiments, qui représente près de 50 % de la consommation énergétique en Europe.

Les sources de chaleur proviennent en premier lieu du solaire pour lequel le stockage permettrait de réduire les effets de son intermittence et du décalage entre les périodes les plus productives (le jour/l'été) par rapport aux périodes de plus grandes demandes (le soir/l'hiver). Il est également possible de stocker la chaleur produite par certaines industries en corollaire de leur activité principale (centrales à gaz ou d'incinération par exemple).

Tout matériau possède la capacité de libérer ou de stocker de la chaleur via un transfert thermique. Ce transfert peut être :

- par chaleur sensible, c'est-à-dire par changement de la température du matériau (la chaleur est alors emmagasinée dans le matériau),
- ou par chaleur latente, c'est-à-dire par changement de phase du matériau, généralement changement solide/liquide d'un matériau pour lequel la variation volumique est faible.

Le stockage de la chaleur peut aussi se faire par voie thermochimique (ou sorption) via des procédés mettant en œuvre des réactions chimiques réversibles qui permettent de séparer un produit sous l'effet d'une source de chaleur. Les deux (ou plus) composants sont alors stockés séparément sans perte thermique et la chaleur est restituée lorsqu'ils sont remis en présence en reformant le produit initial.

• Chaleur sensible

Le stockage sensible de grande capacité concerne surtout le stockage saisonnier en réservoirs soit

- en réservoirs souterrains dans des aquifères naturels (nommés ATES pour Aquifer Thermal Energy Storage),
- dans des roches ou en souterrain (appelés UTES ou BTES pour Underground ou Borehole Thermal Energy Storage)
- ou encore dans des cuves en surface ou plus ou moins enterrées.

Il y a deux facteurs clés pour les matériaux de stockage étudiés :

- L'inertie thermique (sables, bétons, céramiques).
- La capacité à supporter de très hautes températures.

Quelques ATES existent déjà, comme celui de Neubrandenburger Stadtwerke en Allemagne, mis en service en 2004 et mettant en œuvre un stockage de 4 MW de puissance, à une température entre 60 et 80 °C dans un aquifère à une profondeur de 1200-1300 m, en relation avec une centrale à gaz et à vapeur.

Plusieurs projets structurants sont en cours : le programme ECES (Energy Conservation through Energy Storage) de l'AIE est probablement le plus actif (15 projets en cours), mais des actions sont également lancées en Europe (programmes de l'EERA, European Energy Research Alliance) et en France (projets ANR-Ancre, suite au projet Geostocal).

Les exemples d'UTES ou de BTES sont assez nombreux notamment en Norvège ou au Canada, comme par exemple le Drake Landing Solar Community (DLSC) dans l'Alberta qui alimente en hiver un quartier de plus de 50 maisons grâce à de la chaleur solaire stockée en été.

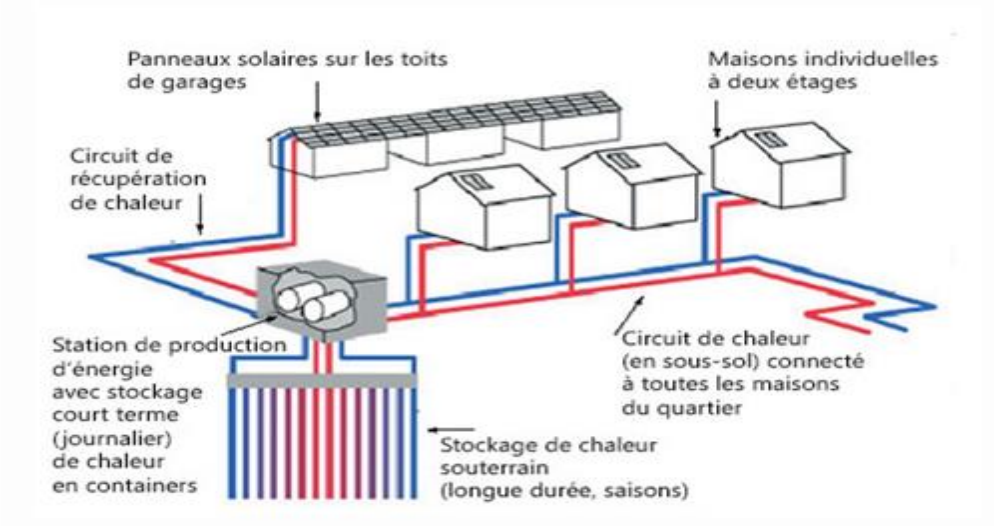


Figure V.5. Exemple de BTES

Une autre voie en cours d'étude est le stockage de chaleur lié aux centrales solaires thermodynamiques, qui consiste à concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur permettant de chauffer à haute température un fluide caloporteur qui, directement ou après stockage, va activer un générateur d'électricité via une turbine. Le type de fluide caloporteur est généralement un sel fondu, mais des projets sont en cours pour identifier d'autres fluides comme par exemple des verres fondus (projet Halotechnics, programme HEATS, USA).

• Chaleur latente

Les matériaux à changement de phase (MCP) qui présentent des opportunités intéressantes pour le stockage de chaleur latente sont de plusieurs types : métaux, matériaux organiques (acides gras et paraffines) ou inorganiques (sels hydratés). Ces matériaux sont souvent utilisés dans les matériaux de construction pour tempérer les bâtiments.

Il n'existe pas à ce jour d'installations de stockage de grande capacité basées sur ce principe mais de nombreux projets sont en cours, en particulier aux USA, comme par exemple le projet Metallic Composites Phase-Change Materials for High-Temperature Thermal Energy Storage conduit au MIT sur les nanomatériaux fondus.

V.2.4. Mode de stockage thermochimique

Par rapport aux deux voies précédentes, les procédés mis en œuvre ici sont plus complexes : séparation des produits au stockage, mise en contact des réactants à la restitution, possibilité de changements de phase lors du cyclage. Les réactions de sorption semblent les plus adaptées à la climatisation des bâtiments et des applications existent.

La société suédoise ClimateWell, par exemple, propose un système commercial de climatisation/ stockage par **adsorption à trois phases utilisant une** solution saturée de LiCl en contact avec du LiCl solide.

Plusieurs pilotes ont été réalisés comme le système allemand à partir d'hydratation/déshydratation de zéolite ou de gel de silice. En France, le projet ANR Prossisvise à étudier un procédé de stockage intersaisonnier utilisant les propriétés d'hydratation/déshydratation de LiBr, jusqu'à la cristallisation.

V.2.5. Mode de stockage chimique :

V.2.5. 1. Stockage intrinsèque

- Hydrocarbures

Les hydrocarbures liquides sont actuellement la forme dominante du stockage d'énergie en volume, notamment pour le secteur du transport. Les carburants proviennent des énergies fossiles et ont un rendement de 75% de la « source à la pompe ». Les biocarburants sont eux issus de la biomasse, avec un rendement de 70% « de la biomasse à la pompe ».

- Biomasse

Le terme « biomasse » désigne l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie. Dans le cas des végétaux, elle est une forme de stockage de l'énergie solaire: les matières organiques sont issues du CO_2 capté lors de la photosynthèse. La biomasse peut être utilisée soit directement (bois énergie), soit après une méthanisation de la matière organique (biogaz) ou de nouvelles transformations chimiques (biocarburant).

Toutefois, ce processus de stockage d'énergie est long, de l'ordre de plusieurs mois, et d'un rendement faible. En effet, seul 1% des rayonnements solaires utilisés lors de la photosynthèse est restitué sous la forme de biomasse.

V.2.5. 2. Production d'hydrogène

Les systèmes de stockage d'énergie grâce à l'hydrogène utilisent un électrolyseur intermittent. Pendant les périodes de faible consommation d'électricité, l'électrolyseur utilise de l'électricité pour décomposer de l'eau en oxygène et en hydrogène, selon l'équation $2\ H_2O = 2H_2 + O_2$. Cet hydrogène est ensuite comprimé, liquéfié ou stocké sous forme d'hydrure métallique.

Ensuite, il existe trois moyens différents pour réinjecter de l'électricité sur le réseau à partir de l'hydrogène stocké :

- le premier consiste à alimenter une pile à combustible ;
- le deuxième consiste à synthétiser du gaz naturel selon le procédé de la méthanation. Ce gaz peut certes être injecté directement dans le réseau de gaz existant mais surtout être utilisé pour alimenter une centrale à gaz « classique », produisant de l'électricité ;
- le troisième consiste à utiliser l'hydrogène directement dans une centrale à gaz spécialement conçue à cet effet, afin de fabriquer de l'électricité.

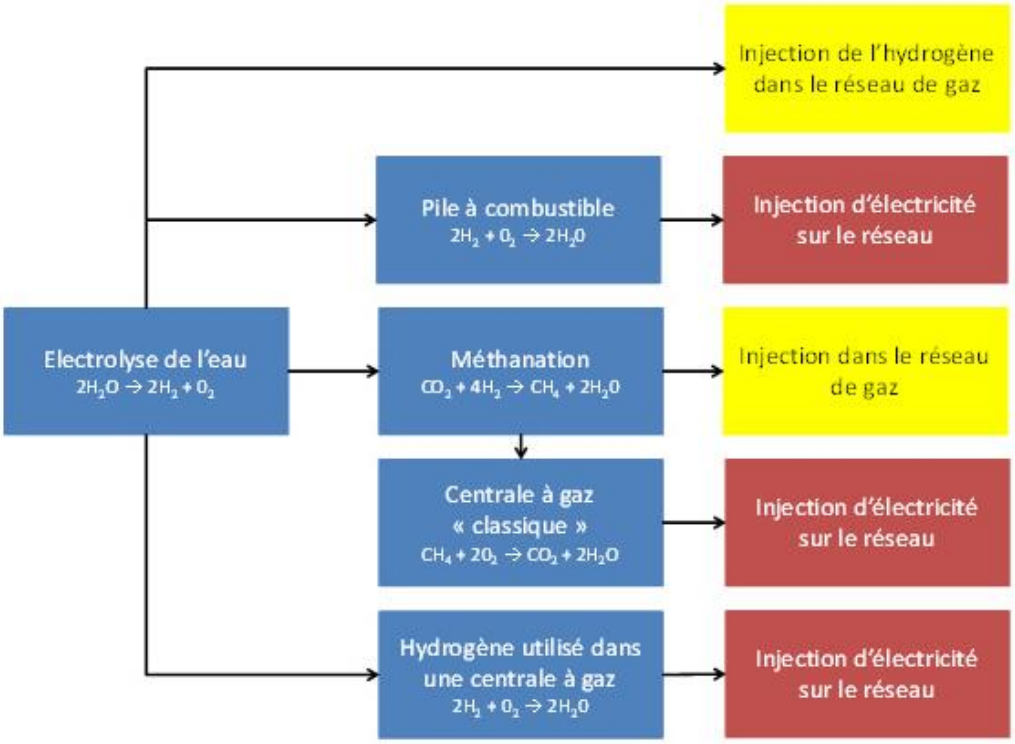


Figure V.6 : Les différentes possibilités de stockage de l'énergie grâce à l'hydrogène

L'intérêt de ce type de système réside :

- dans la grande flexibilité d'usage du vecteur d'hydrogène, qui a pour particularité d'être facilement stocké et transporté, que ce soit sous forme liquide ou gazeuse ;
- et dans le découplage énergie-puissance : en effet, la capacité de puissance en absorption ou en production est dimensionnée par l'électrolyseur ou la pile à combustible. La capacité en énergie est dimensionnée par la taille des réservoirs et peut aller de plusieurs heures à plusieurs jours en fonction de l'application du système (secours, décalage de consommation).

Pendant leur utilisation, les électrolyseurs et les piles à combustible dégagent de la chaleur (entre 20 et 50 % de l'énergie du système selon la technologie), dont la valorisation améliore la rentabilité économique du système.

V.2.5.2.1. Sources et modes de stockage pour l'hydrogène

La synthèse, le stockage et l'approvisionnement en dihydrogène sont une partie du défi à relever car sur Terre, l'hydrogène est abondant, mais toujours combiné à de l'oxygène (H2O, c'est-à-dire l'eau), du soufre (sulfure d'hydrogène, H2S), du carbone (combustibles fossiles de types gaz naturel ou pétrole), etc.

- Le dihydrogène peut être produit en décomposant de l'eau, du méthane ou du bois/gazogène (durant deux ans le projet « Epilog » a testé avec succès des piles à combustible au gaz naturel à Forbach), par voie thermique ou électrochimique (électrolyse de l'eau).Produire de l'hydrogène nécessite une source d'énergie renouvelable (comme l'hydroélectrique, le solaire, l'éolien), de l'électricité nucléaire ou des combustibles fossiles.
- Le dihydrogène peut être stocké et transporté :
  - par voie gazeuse : comprimé dans des bouteilles ou des réservoirs (pression en général de 350, 550 ou 700 bar) ;
  - par voie solide : combiné dans des hydrures métalliques ;
  - par voie liquide : liquéfié (filière abandonnée pour la mobilité) ou combiné chimiquement sous forme de méthanol ou de méthane qui seront ensuite transformés pour libérer du dihydrogène.
  - potentiellement dans des nanotubes de carbone.

V.2.5.2.2. Rendements globaux

Un groupe électrogène permet un rendement de 25 % et une pile à hydrogène peut atteindre 50 à 60 % (voire beaucoup plus avec la récupération de chaleur), mais les rendements énergétiques cumulés de la synthèse du dihydrogène et de la compression ou liquéfaction sont encore assez faibles. Ici, le dihydrogène n'est pas une source d'énergie primaire ; c'est un vecteur d'énergie.

V.3. Piles à Combustible

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui convertit l'énergie chimique directement en électricité. Elle fonctionne de manière similaire à une batterie, mais contrairement à cette dernière, elle ne se décharge pas tant qu'elle est alimentée en réactifs.

V.3.1. Historique

L'effet pile à combustible est découvert par l'Allemand Christian Schönbein en 1839. Le premier modèle de laboratoire de pile à combustible est réalisé par William R. Grove sur les trois années suivantes. En 1889, Ludwig Mond et Carl Langer donnent à la pile à combustible son nom et sa forme actuelle1. Francis T. Bacon reprend les études de la pile à combustible en 1932 et réalise un premier prototype de 1 kW en 1953, puis de 5 kW en 1959. Ce prototype servira de modèle pour les futures piles à combustible utilisées lors des missions spatiales Apollo.

Le très long écart de temps (plus d'un siècle) qui s'est écoulé entre la réalisation du premier modèle de pile à combustible et les premières utilisations s'explique par le très fort développement qu'ont connu les autres types de générateurs d'énergie électrique et par le fait que le coût des matériaux utilisés dans la pile à combustible reste encore actuellement élevé.

V.3.2. Principe de Fonctionnement:

La pile à combustible part du principe de conversion de l'énergie chimique de combustion (réaction d'oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau.
Les éléments de base constituant une pile à combustible sont principalement au nombre de trois, à savoir :

1. une électrode de type anode émettrice d'électrons (oxydation);
2. une électrode de type cathode collectrice d'électrons (réduction);
3. un électrolyte séparant les deux électrodes.

Pour certains types de pile, l'injection continue d'un combustible au niveau de l'anode (H2 par exemple) induit, en présence de platine, la réaction d'oxydation catalytique :

$$\mathbf{H2 \rightarrow 2H+ + 2e–}$$

De par ses propriétés physico-chimiques, l'électrolyte est "perméable" aux ions H+, ce qui leur permet de migrer vers l'électrode cathodique. Dans un même temps, l'électrolyte est

aussi “imperméable” aux électrons et leur impose de passer par un circuit conducteur externe à la pile. D’où la création d’un courant électrique si le circuit est fermé.
L’injection continue de dioxygène de l’air (ou oxygène de l’air en simplifiant) au niveau de la cathode induit, aussi en présence de platine, la réaction suivante de réduction catalytique :

$$\mathbf{\frac{1}{2}\, O_2 + 2H^+ + 2\, e^- \rightarrow H_2O + Q\ (chaleur)}$$

L’effet escompté est assuré puisque la réaction physico-chimique dans son ensemble produit de l’électricité aux bornes des électrodes et de la chaleur.

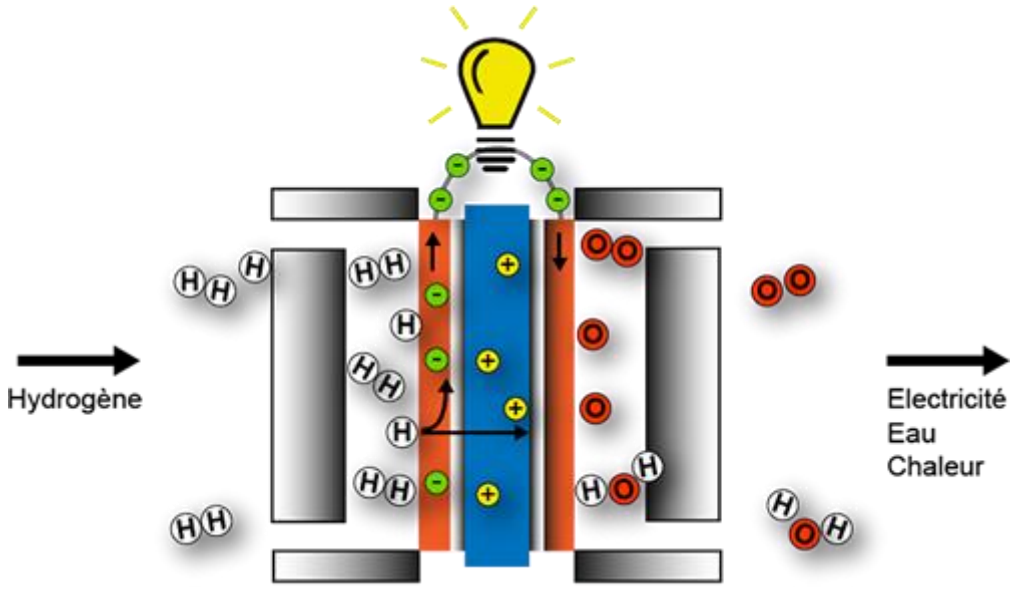


Figure V.7 : Fonctionnement d’une pile à combustible

En première approche, cette technologie est propre vu qu’une pile alimentée avec de l’hydrogène et de l’oxygène rejette de l’eau. Le seul hic est que la production d’hydrogène, à l’heure actuelle, est très énergivore et potentiellement polluante.
Les piles à combustible sont caractérisées par la nature de l’électrolyte :

- Un électrolyte acide induit une migration d’ions positifs (H+) de l’anode vers la cathode.
- À l’inverse, un électrolyte basique génère la migration d’ions négatifs (OH–, O2-, CO32-) de la cathode vers l’anode.

V.3.3. Les types de pile à combustible

V.3.3.1. Piles à combustible à électrolyte acide

- Les PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). L'électrolyte est constitué d'une membrane solide polymère. Les températures de fonctionnement sont basses (20 – 100 °C).
- Les DMFC (Direct Methanol Fuel Cell). À la place de l'hydrogène, les piles utilisent comme combustible le méthanol (CH3OH). Injecté directement sur l'anode avec de l'eau son oxydation catalytique produit des ions H+ et du gaz carbonique. Comme sur les PEMFC, une membrane solide polymère constitue l'électrolyte et permet la migration des H+ vers la cathode.
- Les PAFC (Phosphorique Acid Fuel Cell) utilisent comme électrolyte l'acide phosphorique liquide emprisonné dans une matrice solide poreuse. Elles peuvent fonctionner jusqu'à 200 °C.

V.3.3.2. Piles à combustible à électrolyte basique

- Les AFC à potasse liquide (Alkaline Fuel Cell) utilisent l'ion OH– libéré par réduction catalytique de cette base sur la cathode.
- Les MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) utilisent des carbonates de lithium et de potassium fondus pour la migration des ions CO32-.
- Les SOFC (Solid Oxyde Fuel Cell) sont à base d'un électrolyte solide (zircone dopé aux terres rares) afin de produire des ions O2-.

V.3.4. Le catalyseur aux électrodes

Le rôle du catalyseur dans la réaction d'oxydo-réduction au niveau des électrodes est déterminant dans le rendement de la pile. Actuellement, on utilise du platine qui est un métal rare et coûteux. Les constructeurs et les labos de recherche tablent à moyen terme sur l'utilisation des nanotechnologies pour développer des catalyseurs.

V.3.5. Applications

Les principaux champs d'application sont :

V.3.5.1. Les transports

Les piles à combustible alimentées à l'hydrogène sont utilisées pour alimenter plusieurs prototypes de voitures électriques et de bus électriques. Il est aussi prévu que des trains pour

des lignes ferroviaires non-électrifiées entrent en service d'ici 2018 en Allemagne. Le Land de Basse-Saxe a annoncé en novembre 2017 la commande à Alstom de quatorze trains à pile à combustible, dont la mise en service est attendue pour fin 2020. Trois autres Länder allemands ont signé des lettres d'intention pour un total de soixante rames.

V.3.5.2. La production d'électricité

Aux États-Unis, le département américain de l'énergie, DOE, soutient le déploiement de systèmes de production électrique, que ce soit pour du secours électrique, de l'alimentation de sites ou de bâtiments, ou des chariots élévateurs électriques.

V.3.5.3. La cogénération

Des systèmes de cogénérations de petite puissance (mini-cogénération) sont développés, notamment en Europe, et sont à un stade de démonstration.

Cogénération domestique ou micro-cogénération : des appareils de chauffage domestiques intégrant une pile à combustible de 750 W, appelés ENE-FARM, sont commercialisés au Japon depuis 2009.

Plusieurs fabricants européens de micro-cogénérations à pile à combustible testent sur le terrain des prototypes pré-commerciaux dans douze pays européens. En mai 2016, le projet de la Commission européenne ene.field et Pace vise à développer des piles à combustible domestiques pour les particuliers, avec plusieurs marques associées à ce projet. Pace projette en 2017 d'installer en cinq ans à 2 650 exemplaires de micro-cogénérateurs en Europe, avec quatre industriels impliqués afin d'ouvrir un marché (objectif : 800 000 piles à combustible installées par an en 2050 en substitut aux chaudières à condensation.

Les piles à combustible sont envisagées pour alimenter divers appareils nomades, tels que des téléphones ou des ordinateurs portables. La viabilité industrielle se heurte encore à un rendement énergétique global assez faible compte tenu du fait que chaque étape (synthèse de l'hydrogène, séchage du gaz, stockage, vaporisation, rendement des réactions électrochimiques de la pile, circulation des fluides, régulation thermique, maintenance, récupération du platine, etc.) contribue à un rendement global encore décevant. Cependant, en 2009, des chercheurs japonais ont atteint un rendement de 56 % pendant plusieurs centaines d'heures avec une pile de 3 kW (avec en 2017 presque 200 000 unités installées en maisons individuelles). Dans le cadre du projet HiPer-FC (High Performance Fuel Cell) lancé par la NEDO en 2008, un « Centre de recherche sur les nanomatériaux pour les piles à

combustible » travaille depuis le 25 août 2009. Les chercheurs (en 2009) y sont japonais mais aussi nord-américains, allemands, français, coréens et chinois.

V.3.6. Systèmes à ER utilisant les piles à combustibles

V.3.6.1. Système PV hydrogène

La figure 8 montre un système PV-hydrogène composé d'un champ photovoltaïque (PV) quialimente directement l'utilisateur. L'excédent solaire est stocké sous forme chimique. Un électrolyseur (EL) dissocie l'eau en hydrogène et oxygène. Le gaz est stocké sans perte quel que soit le temps de stockage. Lorsque le champ solaire ne peut pas fournir la totalité de la demande d'électricité, la pile à combustible est connectée. Elle régénère l'électricité stockée en recombinant l'hydrogène et l'oxygène. La pile à combustible (ou FC pour Fuel Cell) produit de l'eau pure qui est stockée pour approvisionner l'électrolyseur

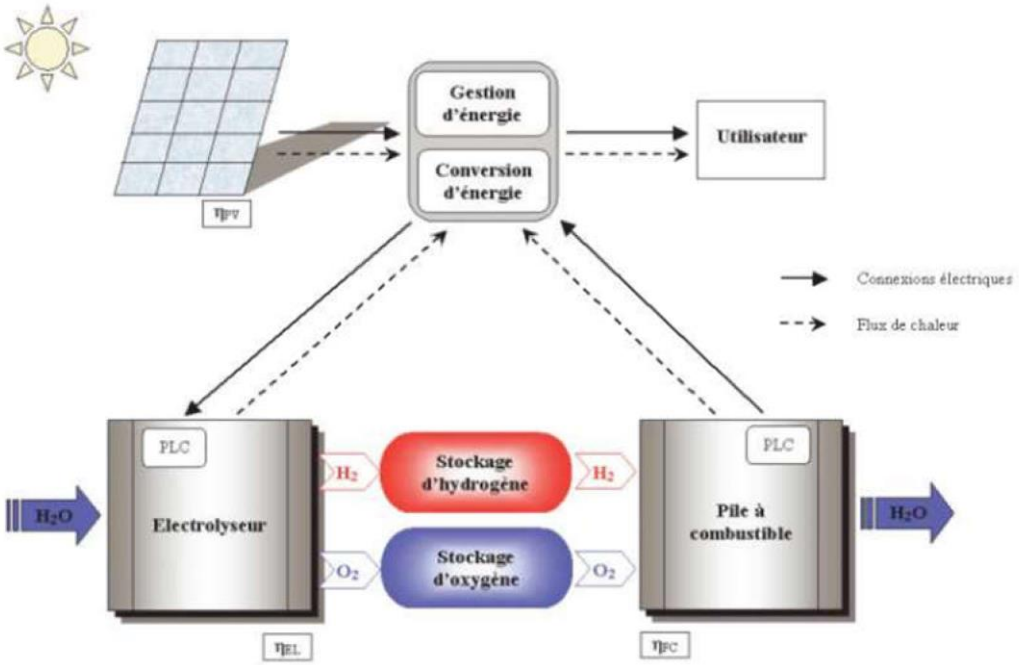


Figure V.8 : Présentation du système

Références bibliographiques

Bibliographiques

[1] J.M Chassériau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
[2] R. Bernard ; G. Menguy ; M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier, 2ème édition 1980.
[3] Charles Chauliaguet : L'énergie solaire dans le bâtiment, Editions Eyrolle 1981 P22, 32 et p147-148.
[4] M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.
[5] http://web.laghuniv.dz/web/fr/doc/publications/ouvrage/techno/Mesri.pdf
[6] DUFFIE J. A. , BECKMAN W. A., Solar energy thermal processes, John Wiley and Sons, New York,1974.
[7] Boudellal M., La pile à combustible : Structure. Fonctionnement. Application, 2007, Dunod, 1 st ed., Paris, France.
[8] Mannuel d'enseignement des énergies renouvelables, Horizon Fuel Cell.
[9] CDER, Bulletin des énergies renouvelables, pp 22- 23, N°8, Décembre 2005.
[10] URL : http://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_008_14.pdf
[11] Rémi SAISSET, Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2 Avril 2004.
[12] Dinh An NGUYEN, Modélisation dynamique du cœur de pile a combustible de type PEM, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 09 Juillet 2010.
[13] URL : http://docnum.univ-lorraine.fr/public/INPL/2010_NGUYEN_D_A.pdf
[14] Livre : « Guide des énergies vertes pour la maison », Patrick Piro, éd. Terre vivante, L'écologie pratique,2006.
[15] http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=stockage
[16] p://www.tecsol.fr/st_fr/plansite.asp?page=gar0.htm
[17] Denis Roussel, « Optimisation d'architecture d'électrode poreuse pour pile à combustible à oxyde solide. Matériaux », Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes, 2015. France.
[18] Samer Rabih, Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïques, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2008.

Résumé

Le cours sur l'exploitation des énergies renouvelables explore les différentes sources d'énergie durable disponibles pour répondre aux besoins croissants en énergie de notre société. Il couvre diverses technologies, notamment l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et biomasse.

Ce cours commence par une introduction aux principes fondamentaux des énergies renouvelables, mettant en lumière leur nature durable et leur contribution potentielle à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les étudiants apprennent ensuite une compréhension détaillée de l'énergie solaire, complétée par un rappel sur les énergies éolienne, hydraulique, géothermique et biomasse, Cela englobe les mécanismes de conversion, les technologies associées et les applications pratiques de chaque source d'énergie. L'aspect crucial du stockage de cette énergie dans la transition vers un avenir énergétique durable est également abordé, permettant aux étudiants de découvrir les solutions de stockage de l'énergie.

Un accent particulier est mis sur les avancées technologiques récentes et les tendances du marché dans le domaine des énergies renouvelables. Les étudiants sont encouragés à comprendre les défis actuels et futurs, tels que l'optimisation des rendements, la gestion de l'intermittence, et les implications sociales et environnementales.

Enfin de compte, le cours vise à fournir aux étudiants une compréhension approfondie des opportunités et des défis liés à l'exploitation des énergies renouvelables, les préparant à contribuer activement à la transition vers un système énergétique plus durable et respectueux de l'environnement.

Mots clés : énergie renouvelable**,** éolienne, hydraulique,

الملخص

تتناول هذه المطبوعة درس حول استغلال الطاقة المتجددة المصادر المختلفة للطاقة المستدامة المتاحة لتلبية احتياجات مجتمعنا المتزايدة للطاقة. تشمل ذلك مجموعة متنوعة من التكنولوجيات، بما في ذلك الطاقة الشمسية، الرياح، المائية، الحرارية الأرضية، والكتلة الحيوية.

تبدأ هذه المطبوعة بمقدمة حول المبادئ الأساسية للطاقة المتجددة، مسلطنا الضوء على طبيعتها المستدامة وإسهامها المحتمل في تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. يكتسب الطلاب بعد ذلك فهمًا مفصلًا للطاقة الشمسية، مع تقديم بشكل موجز للطاقات الأخرى المتمثلة في طاقة الرياح، الماء، الحرارية الأرضية ، والكتلة الحيوية. يشمل ذلك آليات التحويل، والتكنولوجيات المرتبطة، والتطبيقات العملية لكل مصدر للطاقة. يتناول الجزء الحيوي من المطبوعة الجانب الحيوي لتخزين هذه الطاقة في إطار الانتقال نحو مستقبل طاقوي مستدام، مما يتيح للطلبة فهم حلول تخزين الطاقة.

إن التركيز على التطورات التكنولوجية الحديثة واتجاهات السوق في مجال الطاقة المتجددة. يُشجع الطلبة على فهم التحديات الحالية والمستقبلية، مثل تحسين المردود، وإدارة التقطعات، والآثار الاجتماعية والبيئية.

في الختام، تهدف المطبوعة إلى توفير فهم عميق للطلبة حول الفرص والتحديات المتعلقة بالاستفادة من الطاقة المتجددة، مما يُعد استعدادًا للمساهمة الفعّالة في الانتقال نحو نظام طاقوي أكثر استدامة واحترامًا للبيئة.

الكلمات المفتاحية :الطاقة المتجددة ، طاقة الرياح، الماء، الحرارية الأرضية