

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila

Institut des Sciences et de Technologie

Département de Génie Mécanique et Electromécanique



Option : Electromécanique

Cycle : Licence

Support de Cours

Production de l'énergie électrique

Par :

Dr : Bouchekouf Seloua

Année universitaire : 2023/2024

Avant-propos

Ce cours Production de l'énergie électrique est destiné aux étudiants de troisième année Licence Electromécanique. Il correspond au programme officiel du module «Production de l'énergie électrique » enseigné en 3ème année Sciences et technologie, Filière Electromécanique.

Ce manuel rédigé avec un souci permanent de simplicité est structuré en huit chapitres. Pour objectifs de Comprendre, maîtriser et acquérir les principes de base des différents modes de production de l'énergie électrique, avec une description des différents types des centrales de la production de l'énergie électrique par les différentes sources d'énergie renouvelables et non renouvelables.

L'étudiant doit prendre conscience de l'enjeu énergétique en général, et de l'impact de l'énergie électrique sur la vie socioéconomique, en particulier.

Sommaire

Chapitre I : Généralités.....	1
I.1. Introduction	1
I.2. Centrale électrique	1
I.3. La production de l'électricité	1
I.4. Types de production d'électricité	1
I.4.1. Selon l'énergie primaire	1
I.4.2. Selon la technologie	2
I.5. L'alternateur	2
I.6. Le transformateur	3
I.7. Différents types de centrales électriques	3
I.8. Fonctionnement des centrales électriques	4
I.9. Les différents pourcentages de production d'énergie électrique	5
Chapitre II : Les centrales thermiques	6
II.1. Définition	6
II.2. Les centrales thermiques à flamme (classique)	6
II.3. Fonctionnement d'une centrale thermique à flamme	7
II.4. Le traitement des fumées	8
II.5. Puissance produite	8
II.6. Exploitation	9
II.7. Impacts sur l'environnement	9
II.8. Turbine à combustion (TAC)	10
II.9. La Turbine à Combustion (TAC) à Cycle Combiné	10
II.10. Impacts et perspectives du gaz	11
Chapitre III : Les centrales nucléaires	13
III.1. Définition	13
III.2. Constitution d'une centrale nucléaire	13
III.3. Les différents bâtiments d'une centrale nucléaire et leur rôle	13
III.3.1. La salle de commande	13
III.3.2. Le bâtiment réacteur	14
III.3.3. Le bâtiment combustible	14

III.3.4. La salle des machines.....	14
III.3.5. Une station de pompage.....	15
III.3.6. Une ou plusieurs tours de refroidissement	15
III.4. Le cœur du réacteur	16
III.4.1. Le combustible nucléaire	17
III.4.2. La fission nucléaire.....	18
III.4.3. Le caloporteur et le générateur de vapeur.....	19
III.5. Les différents types de réacteurs	20
III.5.1. Réacteur à eau pressurisée (ou REP)	20
III.5.2. Réacteur à eau bouillante (ou REB)	21
III.5.3. Réacteur à eau lourde.....	21
III.5.4. Réacteur à neutrons rapides (ou RNR)	21
III.5.5. Réacteur caloporteur gaz (RCG).....	21
III.6. Générations de réacteurs	21
III.7. Le fonctionnement d'une centrale nucléaire	22
III.7.1. Le circuit primaire	22
III.7.2. Le circuit secondaire	22
III.7.3. Le circuit de refroidissement	23
III.8. Puissance produite	23
III.9. Exploitation.....	23
III.10. Impacts sur l'environnement	24
III.11. Inconvénients	24
III.12. Perspectives d'avenir.....	24
III.13. Conclusion	26
Chapitre IV : Les centrales hydrauliques.....	27
IV.1. Introduction.....	27
IV.2. Définition	27
IV.3. Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique	27
IV.4. Les ouvrages de génie civil	28
IV.4.1. Les différents types des barrages	29
IV.4.1.1. Les barrages à poids.....	29
IV.4.1.2. Les barrages-voûtes	29

IV.4.1.3. Les barrages à contreforts	30
IV.4.1.4. Les barrages en remblais	30
IV.4.2. Les conduites d'eau	31
IV.4.3. La centrale	32
IV.5. Equipements hydrauliques.....	32
IV.5.1. Les turbines à action :.....	32
IV.5.1.1. La turbine Pelton.....	32
IV.5.2. Les turbines à réaction	33
IV.5.2.1. La turbine Francis.....	33
IV.5.2.2. La turbine Kaplan	33
IV.6. Equipements électriques.....	34
IV.6.1. La génératrice	34
IV.6.2. Les pylônes.....	34
IV.6.3. Les lignes de transport.....	35
IV.6.4. Autres composants électriques	35
IV.7. Les différents types des centrales hydroélectriques	35
IV.7.1. Les centrales au fil de l'eau ou de basse chute	36
IV.7.2. Les centrales par écluses ou de moyenne chute.....	36
IV.7.3. Les centrales des lacs ou de haute chute	37
IV.7.4. Les centrales de pompage-turbinage ou stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)	38
IV.7.5. Les centrales maritimes	38
IV.8. Transformation de l'Énergie Hydraulique en Électricité	39
IV.9. Puissance produite	40
IV.10. Avantages et Inconvénients	41
IV.11. Conclusion	41
Chapitre V : L'énergie solaire.....	43
V.1. Introduction.....	43
V.2. Définition.....	43
V.3. L'énergie solaire thermique	43
V.3.1. Principes de fonctionnement	43
V.3.2. Éléments constituant la chaîne de conversion.....	44

V.3.2.1. Les capteurs	44
V.3.2.2. Le fluide caloporteur	45
V.3.3. Les différentes technologies de capteurs existantes	45
V.4. Différentes utilisations de la chaleur solaire	46
V.5. Centrale solaire thermique (l'énergie solaire thermodynamique)	48
V.5.1. Le fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique	48
V.5.2. Les différents types de centrales thermodynamiques	49
V.5.2.1. Centrale solaire à tour	49
V.5.2.2. Centrale solaire à collecteurs cylindro-paraboliques	50
V.5.2.3. Centrale solaire à collecteur Fresnel	50
V.5.2.4. les centrales à collecteurs paraboliques	51
V.5.3. Le stockage de l'énergie thermique	52
V.6. Centrale solaire photovoltaïque (L'énergie solaire photovoltaïque)	52
V.6.1. Le fonctionnement d'une centrale photovoltaïque	53
V.6.2. La cellule photovoltaïque	54
V.6.3. Les types d'installations photovoltaïques et leurs applications	55
V.7. Potentiel solaire en Algérie	57
V.8. Le solaire photovoltaïque en chiffres	58
V.8.1. Les principaux producteurs	59
V.8.2. Le solaire dans la production d'électricité mondiale	59
Chapitre VI : L'énergie éolienne.....	61
VI.1. Introduction.....	61
VI.2. Définition	62
VI.3. Types des turbines éoliennes	62
VI.3.1. Eolienne à axe verticale	62
VI.3.2. Eolienne à axe horizontal	63
VI.4. Composants d'une éolienne à axe horizontal	64
VI.5. Classification des éoliennes à axe horizontal	65
VI.5.1. Eolienne sous le vent	65
VI.5.2. Eolienne face au vent	65
VI.6. Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne	66
VI.6.1. Eoliennes Onshore	66

VI.6.2. Eoliennes Offshore	67
VI.6.2.1. Définition	67
VI.6.2.2. Les caractéristiques de l'éolien « Offshore »	67
VI.7. Chaîne de conversion de l'énergie éolienne	68
VI.8. Principe de conversion de l'énergie éolienne	69
VI.9. La centrale hybride photovoltaïque-éolienne.....	70
VI.9.1. Usage d'une éolienne hybride	71
VI.9.2. Principaux composants du Système d'énergie hybride photovoltaïque -éolien	72
VI.9.2.1. Schéma équivalent d'un système hybride photovoltaïque éolien	73
VI.9.3. Descriptions des composants du système hybride photovoltaïque-éolien	73
VI.9.3.1. Générateurs photovoltaïques	73
VI.9.3.2. Générateurs éoliens.....	74
VI.9.3.3. Différentes classes d'un système éolien	77
VI.9.3.3.1. Système éolien à vitesse fixe.....	77
VI.9.3.3.2. Système éolien à vitesse variable	78
VI.9.4. Systèmes de stockage	78
VI.9.5. Convertisseurs	78
VI.9.6. La charge.....	79
Chapitre VII : Le groupe électrogène	80
VII.1. Introduction.....	80
VII.2. Définition.....	80
VII.3. Composants d'un groupe électrogène	81
VII.4. Le principe fonctionnel de groupe électrogène	82
VII.5. Les différents types de groupe électrogène	82
VII.5.1. Les groupes électrogènes Diesel	82
VII.5.2. Groupe électrogène à Essence	83
VII.5.3. Les groupes électrogènes Insonorisés.....	84
VII.6. Fonctionnement de groupe électrogène	84
VII.6.1. Le rendement.....	84
VII.6.2. Régulation.....	85
VII.6.3. Technologie.....	85
VII.6.4. Groupe électrogène temps zéro (GTZ)	86

VII.7. Utilisation des groupes électrogènes	87
VII.8. Pollution des groupes électrogènes	88
VII.9. Les groupes électrogènes et l'environnement.....	88
VII.10. Les groupes électrogènes et la santé	89
Chapitre VIII : La pile à combustible	90
VIII.1. Introduction.....	90
VIII.2. Le combustible et son stockage	90
VIII.3. Différents types des piles à combustible	90
VIII.3.1. La pile Alcaline AFC	92
VIII.3.2. La pile à combustible à méthanol direct (DMFC)	93
VIII.3.3. La pile à combustible à membrane électrolyte polymérique (PEMFC)	93
VIII.3.4. La pile à acide phosphorique (PAFC)	94
VIII.3.5. La pile à carbonate fondu (MCFC)	94
VIII.3.6. La pile à oxyde solide(SOFC)	95
VIII.4. Principe de fonctionnement.....	96
VIII.5. Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible	97
VIII.5.1. Les avantages.....	97
VIII.5.2. Les inconvénients	97
Bibliographie et Webographie	99

Chapitre I : Généralités

I.1. Introduction

L'énergie électrique représente l'énergie transférée d'un système à un autre grâce à l'électricité. Plus du tiers de l'énergie primaire est convertie en énergie électrique. L'électricité est donc un vecteur énergétique essentiel qui facilite l'exploitation industrielle des sources d'énergie primaire. Elle permet le transport de grandes quantités d'énergie facilement utilisables pour des usages industriels ou domestiques

Cette électricité provient d'une centrale électrique. Quels sont les différents types de centrales ? Comment fonctionne chacune des centrales ? Quelles sont les énergies utilisées ?

I.2. Centrale électrique

Une centrale électrique est destinée pour la production d'électricité. Les centrales électriques alimentent en électricité, au moyen du réseau électrique, les consommateurs, particuliers ou industriels éloignés de la centrale.

I.3. La production de l'électricité

La production d'électricité est assurée par la conversion en énergie électrique d'une énergie primaire qui peut être : mécanique, chimique, nucléaire ou solaire.

I.4. Types de production d'électricité

Pour La production de l'électricité on distingue deux classements :

I.4.1. Selon l'énergie primaire

Pour alimenter les centrales, il existe deux sortes d'énergie. Parmi elles, les énergies renouvelables (elles englobent les énergies effectivement renouvelables telles que la biomasse et celles quasiment inépuisables telles que l'énergie solaire, l'énergie hydraulique ou l'énergie éolienne) et celles qui constituent des ressources non renouvelables dont la disponibilité est limitée dans le temps (combustibles fossiles ou nucléaire).

-Les combustibles fossiles : ce sont encore aujourd'hui les énergies primaires les plus utilisées dans le monde pour la génération d'électricité. C'est principalement le charbon, le fioul et le

gaz naturel, qui sont brûlés soit dans des chaudières, soit dans des turbines à combustion (turbines à gaz).

-Les autres combustibles : on peut également, pour la production d'électricité, brûler dans des chaudières spécifiques la biomasse ou des déchets (ordures ménagères).

-L'énergie nucléaire : la chaleur permettant la génération de vapeur d'eau, est produite par la fission d'uranium.

-L'énergie solaire : elle est utilisée soit dans des concentrateurs solaires produisant de la vapeur d'eau destinée à être turbinée, soit dans des centrales constituées d'une multitude de panneaux photovoltaïques

-L'énergie hydraulique : dans les centrales hydrauliques, c'est soit la force du courant des rivières (centrales au fil de l'eau), soit celle de la chute d'eau (barrages, conduites forcées) qui est utilisée pour actionner la turbine entraînant l'alternateur.

-L'énergie éolienne : la force du vent permet également d'entraîner un alternateur pour produire de l'électricité.

I.4.2. Selon la technologie

L'électricité produite principalement par conversion d'énergie mécanique au moyen d'alternateurs, utilisant plusieurs technologies de turbines on trouve :

- turbine hydraulique
- turbine d'éolienne
- turbine à vapeur ou à gaz
- Energie chimique (pétrole, gaz, bois, déchets...)
- Energie nucléaire

I.5. L'alternateur

Un alternateur permet d'obtenir de l'énergie électrique à partir d'un mouvement. Il transforme donc une énergie mécanique en énergie électrique. Un alternateur est constitué d'une bobine et d'un aimant (Figures I.1 et I.2).

Un alternateur est utilisé dans toutes les centrales électriques quelle que soit la source d'énergie utilisée.

Un alternateur par définition est rotor tournant à l'intérieur d'un stator

Exemple d'alternateur de forte puissance 1300MW-1500 t/min-50 Hz triphasé



Figure I-1. Alternateur dans une salle des machines.

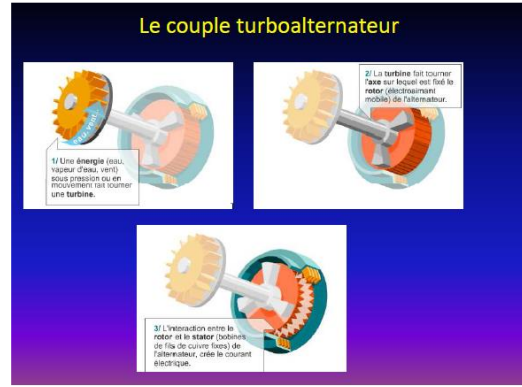


Figure I-2. Alternateur triphasé de forte puissance

I.6. Le transformateur

Avant d'être injectée dans le réseau électrique, la tension générée par l'alternateur est adaptée par un transformateur (Figure I.3 et I.4).

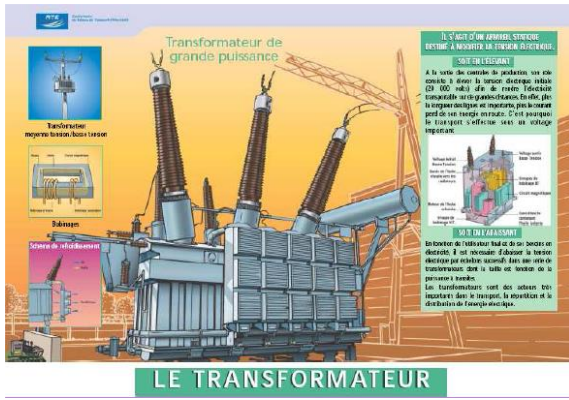


Figure I-3. Transformateur de grande puissance.



Figure I-4. Chemin de l'électricité

I.7. Différents types de centrales électriques

Une centrale électrique est le point de départ de notre réseau électrique. Il existe plusieurs types de centrales :

- Les centrales thermiques :
 - à flamme (62,5% de la production mondiale)
 - nucléaires (17,5% de la production mondiale)

- Les énergies renouvelables : les centrales hydrauliques, solaire, géothermique, éolienne, hydrolienne... (20% de la production mondiale)

I.8. Fonctionnement des centrales électriques

Le fonctionnement d'une centrale électrique peut varier en fonction de son type, mais voici les étapes générales du fonctionnement d'une centrale électrique (Figure I.5) :

1. Production d'énergie : La centrale électrique utilise une source d'énergie primaire (comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole, l'eau, le vent, le soleil, ou l'énergie nucléaire) pour produire de l'électricité.
2. Conversion de l'énergie : L'énergie primaire est convertie en énergie électrique par le biais de différents processus, tels que la combustion, la fission nucléaire, la force de l'eau, le vent ou la lumière solaire.
3. Génération d'électricité : L'électricité est produite par des générateurs qui transforment l'énergie mécanique en électricité. Les générateurs sont généralement couplés à des turbines qui sont mises en rotation par la force motrice de l'énergie primaire.
4. Transformation et distribution : L'électricité produite est transformée en courant alternatif à haute tension pour faciliter son transport sur de longues distances à travers les lignes électriques. Elle est ensuite distribuée aux consommateurs finaux via les réseaux de distribution.

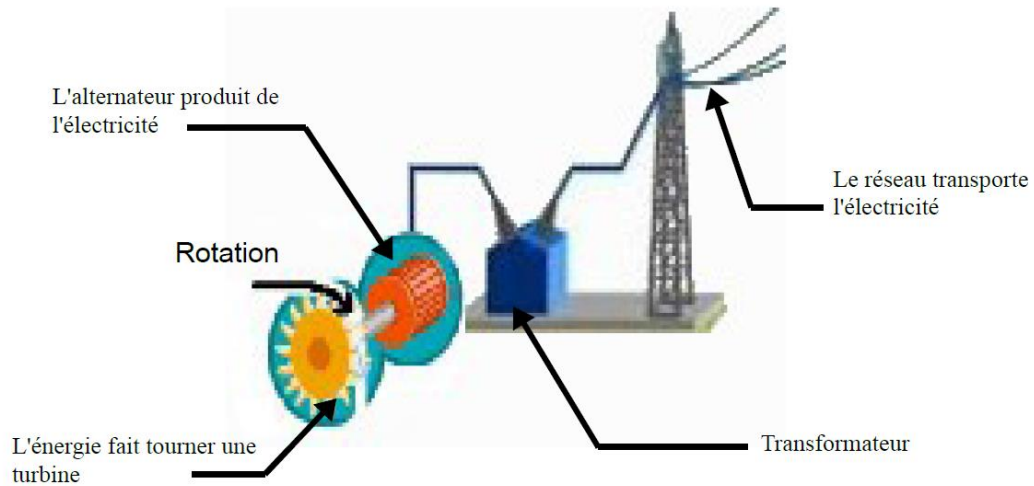


Figure I-5 Fonctionnement d'une centrale électrique.

I.9. Les différents pourcentages de production d'énergie électrique.

Les principaux taux de production d'énergie électrique sont :

- les centrales thermiques :
 - à flamme (62,5% de la production mondiale)
 - nucléaire (17,5% de la production mondiale)
- les énergies renouvelables : les centrales hydrauliques, solaire, géothermique, éolienne, hydrolienne... (20% de la production mondiale)

Chapitre II : Les centrales thermiques

II.1. Définition

Une centrale thermique est une centrale électrique qui produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur.

L'origine de cette source de chaleur dépend de type de la centrale thermique, on compte :

- Les centrales thermiques à flamme
- les centrales nucléaires
- Centrales à turbines à combustion
- Les centrales géothermiques
- Les centrales solaires thermiques à concentration

II.2. Les centrales thermiques à flamme (classique)

C'est le type le plus répandu et le plus ancien .Les centrales thermiques à flamme fonctionnent avec du charbon, du gaz, du pétrole ou des combustibles biomasse (bois, plantes) et déchets (industriels, agricoles ou ménagers). Elles utilisent une chaudière à vapeur.

Une centrale thermique à flamme est composée de 3 parties (Figure II.1):

- la chaudière dans la quelle est brûlé le combustible
- la salle des machines où est produite l'électricité
- les lignes électriques qui évacuent et transportent l'électricité

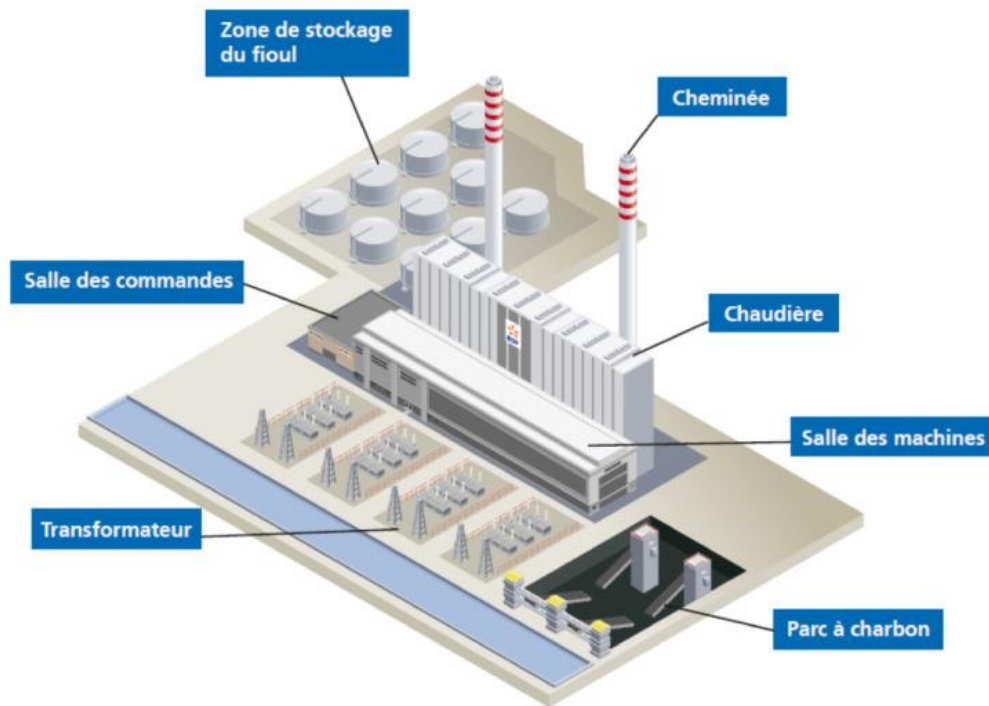


Figure II-1. Construction d'une centrale thermique à flamme

II.3. Fonctionnement d'une centrale thermique à flamme

Une centrale thermique à flamme produit de l'électricité à partir d'une chaudière à charbon, à mazout, à bois ou à gaz chauffe et vaporise de l'eau. Cette vapeur actionne une turbine, qui entraîne un turbo-alternateur. La production de l'électricité est assurée par les étapes suivantes(figure II.2):

(1) La combustion

Un combustible (gaz, charbon, fioul) est brûlé dans les brûleurs d'une chaudière pouvant mesurer jusqu'à 90 m de hauteur. Le charbon est d'abord réduit en poudre, le fioul est chauffé pour le rendre liquide puis vaporisé en fines gouttelettes et le gaz est injecté directement sans traitement préparatoire.

(2) La production de vapeur

La chaudière est tapissée de tubes dans les quels circule de l'eau froide. En brûlant, le combustible dégage de la chaleur qui va chauffer cette eau. L'eau se transforme en vapeur, envoyée sous pression vers les turbines.

(3) La production d'électricité

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

(4) Le recyclage

À la sortie de la turbine, la vapeur est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur dans le quel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve. L'eau ainsi obtenue est récupérée et recircule dans la chaudière pour recommencer un autre cycle.

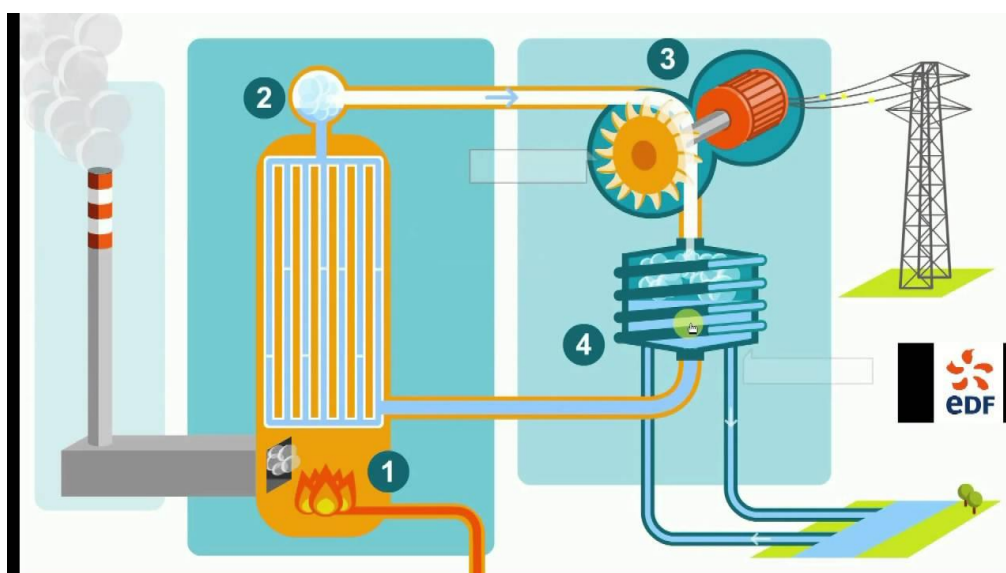


Figure II-2. Fonctionnement d'une centrale thermique à flamme

II.4. Le traitement des fumées

Les fumées sont dépoussiérées grâce à des filtres et sont évacuées par de grandes cheminées pouvant atteindre 240 mètres de hauteur. Avant d'être évacuées, ces fumées sont analysées en permanence pour contrôler le respect des critères d'environnement.

II.5. Puissance produite

Il en existe trois sortes, suivant le combustible utilisé :

-Thermique au charbon

La puissance des centrales thermiques au charbon peut aujourd'hui dépasser les 1000 MW.

-Thermique au fioul

Le fioul, trop visqueux pour être utilisé tel quel, doit être liquéfié en le chauffant avant de l'injecter dans les brûleurs.

La puissance installée des centrales thermiques au fioul se situe généralement entre 250 à 750 MW par unité de production.

-Thermique au gaz

Une centrale thermique au gaz utilise un gaz à fort pouvoir calorifique, tel le gaz naturel, pour produire de l'électricité. On distingue plusieurs catégories :

- les centrales à turbine à vapeur (TAV): elles fonctionnent comme les centrales au fioul, mais brûlent du gaz au lieu du fioul. Elles sont peu répandues et progressivement remplacées par les centrales à turbine à gaz.
- les centrales à turbine à gaz (turbine à combustion (TAC)), elles comprennent :
- les centrales à cycle simple, constituées d'une turbine à combustion fonctionnant au gaz entraînant un alternateur.
- les centrales à cycle combiné, de plus en plus répandues grâce à leur rendement énergétique plus élevé (jusqu'à 60%). La chaleur contenue dans les fumées à la sortie de la turbine à combustion est récupérée pour produire de la vapeur alimentant une turbine à vapeur.

La puissance installée des centrales les plus récentes se situe entre 400 et 800 MW. Les centrales à turbine à gaz permettent de faire de la cogénération, ce qui augmente encore plus significativement leur rendement (80 à 90%).

II.6. Exploitation

Les centrales thermiques à flamme sont :

- Utilisées en période de pointe pour ajuster la production à l'augmentation de la demande, (être facilement mises en fonctionnement ou arrêtées selon les besoins).
- Rapidement mobilisables, elles peuvent être utilisées pour compenser les variations rapides de puissance des parcs éoliens (variations de la force du vent) ou des centrales photovoltaïques (passages de nuages).
- Technologie bien maîtrisée présentant peu de risques.

II.7. Impacts sur l'environnement

- Les centrales thermiques sont des moyens de production d'énergie très sales (cendres et fumées chargées en dioxines).

- Elles rejettent dans l'atmosphère énormément de gaz à effet de serre (principalement du dioxyde de carbone CO₂, oxydes de soufre (SO₂, SO₃) et oxydes d'azote (NO_x)).
- Elles sont responsables des pluies acides et de la pollution de l'air.
- Elles utilisent des énergies fossiles donc épuisement des ressources (pétrole, gaz).

Remarque

Le fioul est plus polluant que le gaz naturel, et moins que le charbon.

II.8. Turbine à combustion (TAC)

Une turbine à combustion fonctionne sur le principe d'un gros réacteur d'avion auquel on aurait connecté un alternateur. Un mélange d'air comprimé et de fioul ou de gaz est injecté dans la chambre de combustion. Ce mélange gazeux est porté à plus de 1 000 °C alors il s'enflamme et produit l'énergie nécessaire pour faire tourner la turbine. Celle-ci entraîne l'alternateur qui produit l'électricité. Ce type de centrale démarre en seulement quelques minutes.

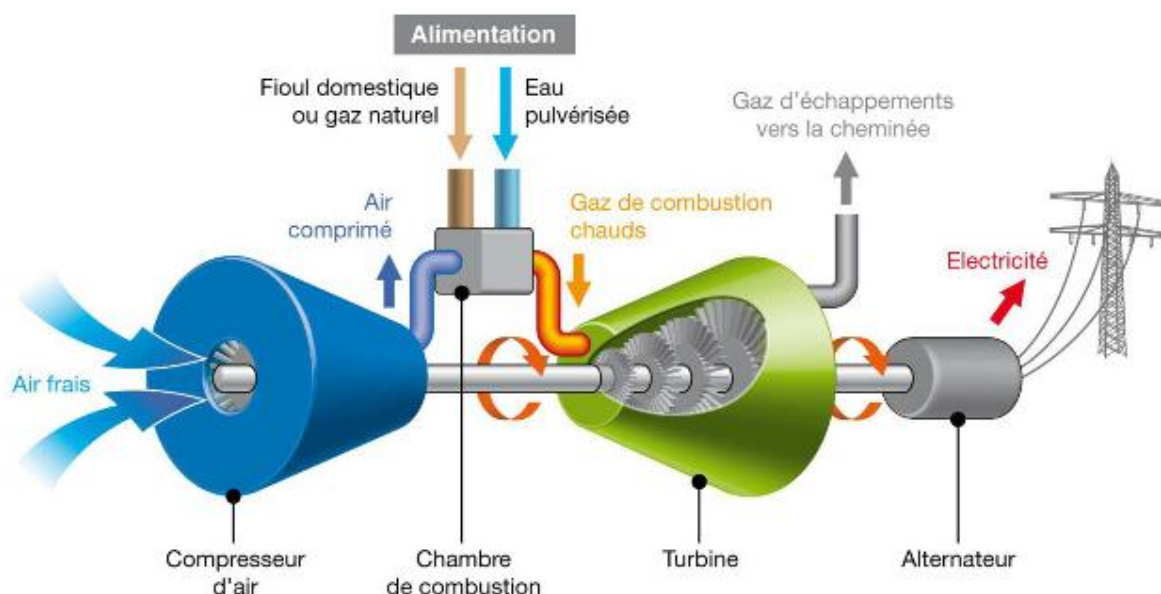


Figure II-3. Fonctionnement d'une turbine à combustion

II.9. La Turbine à Combustion (TAC) à Cycle Combiné

Un cycle combiné à gaz est composé d'une turbine à combustion et d'une turbine à vapeur (TAV).

Dans un premier temps, le gaz naturel fait fonctionner la TAC. Ensuite, les gaz chauds d'échappement de la TAC sont utilisés pour produire de la vapeur, dirigée vers une deuxième

turbine, la TAV. La TAC et la TAV entraînent alors un ou deux alternateurs. La même quantité de combustible sert à une double production d'électricité : celle de la TAC et celle de la TAV.

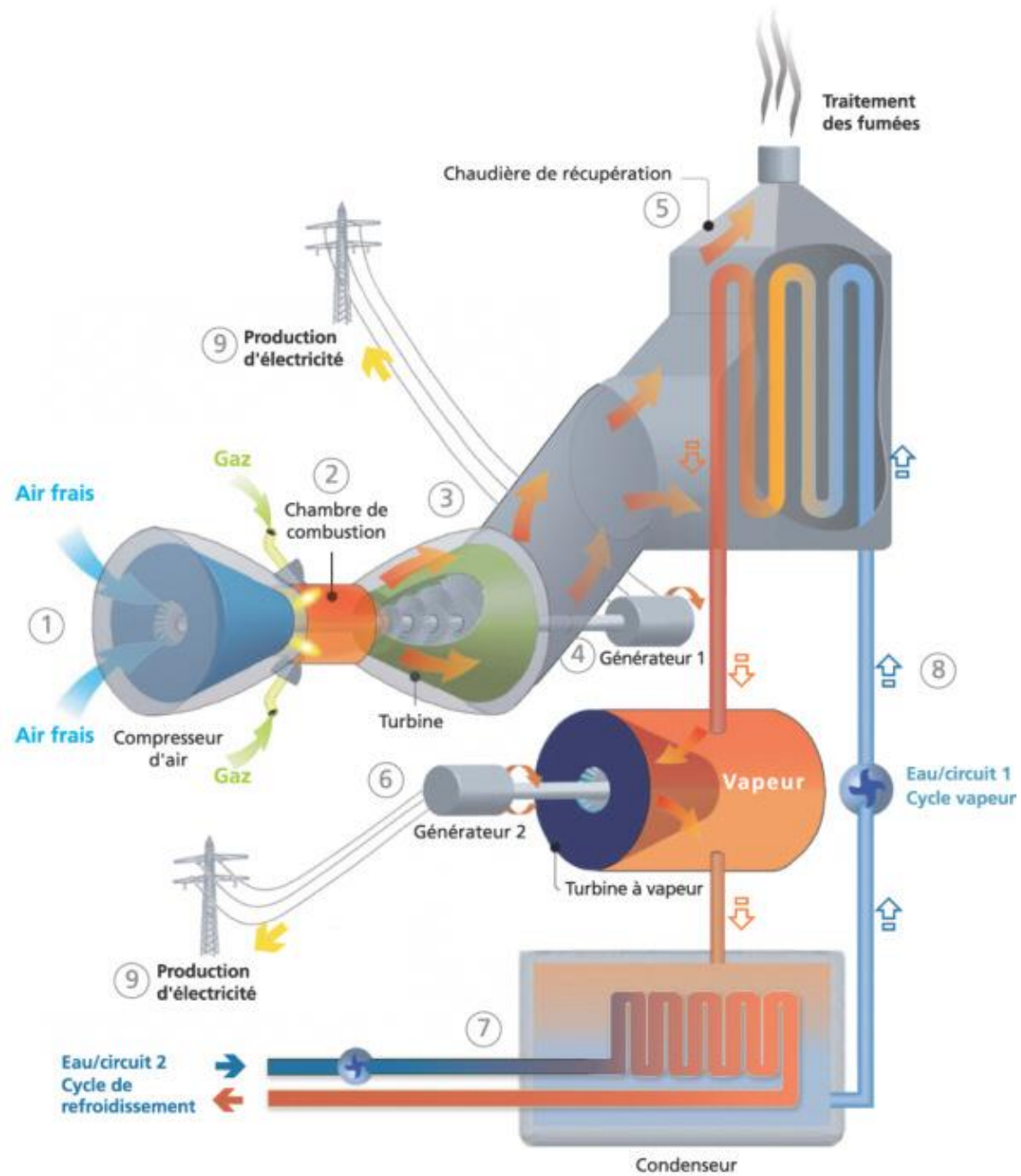


Figure II-4 La Turbine à Combustion à Cycle Combiné.

II.10. Impacts et perspectives du gaz

➤ La technologie du cycle combiné gaz, grâce à des rendements supérieurs à 50%, diminue considérablement la consommation énergétique, et donc les émissions globales dans l'atmosphère (CO₂ et NO_x).

- Cette technologie demande un investissement plus faible que d'autres types de centrales conventionnelles de puissance plus forte et assure un rendement énergétique nettement supérieur à celui d'une centrale thermique classique (65 % contre 38 %).
- Ce type de centrale peut être facilement implanté au plus près des lieux de consommation (zones urbaines, installations industrielles).
- Considéré comme un combustible souple, efficace, facile à stocker, à transporter, à utiliser, générant moins de gaz à effet de serre que les autres combustibles fossiles, et face à une demande qui ne cesse d'augmenter, le gaz est amené à jouer un rôle important dans le mix énergétique de demain.

Chapitre III : Les centrales nucléaires

III.1. Définition

Une centrale nucléaire, comme une centrale thermique, utilise le même principe de fonctionnement, à savoir la transformation de chaleur en électricité. Dans une centrale nucléaire, c'est la fission d'un noyau atomique qui permet de produire cette chaleur. L'objectif est de faire chauffer de l'eau afin d'obtenir de la vapeur. La pression de la vapeur permet de faire tourner une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité.

III.2. Constitution d'une centrale nucléaire

Une centrale nucléaire se compose de quatre parties principales :

- le bâtiment contenant le réacteur dans le quel a lieu la fission
- la salle des machines où est produite l'électricité
- les départs de lignes électriques qui évacuent et transportent l'électricité
- des tours de refroidissement uniquement au bord de rivière

III.3. Les différents bâtiments d'une centrale nucléaire et leur rôle

Une centrale nucléaire regroupe l'ensemble des installations permettant la production d'électricité. Chaque tranche correspond à un groupe d'installations conçues pour fournir une puissance électrique donnée. Une centrale nucléaire comprend fréquemment plusieurs réacteurs installés sur le même site, appelés parfois « tranches », identiques ou non.

III.3.1. La salle de commande

Chaque réacteur nucléaire dispose d'une salle de commande. Les opérateurs centralisent l'ensemble des données liées au fonctionnement du réacteur et prennent les décisions concernant notamment la modulation de la puissance du réacteur (augmenter ou diminuer la puissance de celui-ci).

La salle de commande doit prendre en charge des dysfonctionnements occasionnels au fur et à mesure qu'ils se présentent. Loin d'être réduits à un dispositif passif de surveillance d'un système technique très automatisé, les membres de l'équipe sont au centre d'un flot d'activités très hétérogènes (discussions, lecture, écriture, coups de téléphones, etc.) visant à gérer en temps réel les problèmes très variés qu'occasionne le fonctionnement quotidien et normal d'une installation complexe (Figure III.1).



*Figure III-1 Salle de commande du réacteur EPR
de Flamaville – Copyright : MORIN ALEXIS*

III.3.2. Le bâtiment réacteur

Il se compose généralement d'une enceinte (cette enceinte est double dans le cas du réacteur EPR) étanche qui contient la cuve principale renfermant le cœur du réacteur nucléaire, le pressuriseur (pour maintenir l'eau du circuit primaire à l'état liquide), les générateurs de vapeur (trois ou quatre selon la puissance de la centrale), les pompes primaires (pour faire circuler le fluide caloporteur), le circuit d'eau primaire, (pour assurer le transfert thermique entre le cœur du réacteur et les générateurs de vapeur) et une partie du circuit d'eau secondaire.

III.3.3. Le bâtiment combustible

Accolé au bâtiment réacteur, il sert de stockage des assemblages du combustible nucléaire avant leur chargement dans le cœur (combustibles neufs) ou après leur déchargement du cœur (combustibles usés). Comme les combustibles usés dégagent encore de la chaleur une fois déchargés (du fait de leur très grande radioactivité), l'eau de la piscine sert au refroidissement de ces combustibles usés (un tiers ou un quart du combustible est remplacé tous les 12 à 18 mois). Le combustible est maintenu immergé dans ces piscines dont l'eau sert d'écran radiologique.

III.3.4. La salle des machines

Elle abrite la turbine à vapeur et l'alternateur, le condenseur, suivi de turbopompes alimentaires et les locaux périphériques d'exploitation, notamment la salle de commande est le véritable « cerveau » d'une tranche nucléaire. C'est dans la salle de commande que sont centralisées les principales données relatives au fonctionnement de la tranche. C'est de là que

partent les « ordres » transmis par les opérateurs aux différents composants et systèmes. Ce pilotage télécommandé fait largement appel à l'automatisation et à l'informatique. Il s'agit là d'aides indispensables pour les opérateurs. Mais ce sont eux qui restent les responsables à part entière du pilotage de la tranche et qui prennent les décisions prévues par les procédures.

III.3.5. Une station de pompage

Elle est nécessaire pour assurer les besoins en eau.

✓ L'importance de l'eau

Le nucléaire utilise de l'eau pour des besoins de refroidissement indispensables au procédé de production d'électricité.

Pour assurer le confinement de la radioactivité à l'intérieur du circuit primaire uniquement, les eaux contenues dans les autres circuits (le circuit secondaire et le circuit de refroidissement) ne se mélangent pas.

Les centrales implantées en bord de mer ou sur des fleuves à gros débit fonctionnent en circuit ouvert : l'eau, prélevée à raison de plusieurs dizaines de m^3/s , est intégralement restituée au milieu aquatique, réchauffée de quelques degrés. Lorsque le fleuve n'a pas un débit suffisant ou s'il y a plusieurs centrales rapprochées le long d'un même cours d'eau, les installations sont équipées de tours aéroréfrigérantes (on parle de circuit fermé). La quantité d'eau prélevée est alors de l'ordre de quelques $m^3/seconde$ seulement.

III.3.6. Une ou plusieurs tours de refroidissement

C'est l'édifice le plus visible des centrales thermiques ou nucléaires. Ces aéroréfrigérants n'équipent que les centrales dont la source froide ne permet pas d'évacuer la chaleur nécessaire au fonctionnement et permettent ainsi de diminuer la pollution thermique de cette source froide. Certaines centrales nucléaires ne possèdent pas de réfrigérant atmosphérique. Elles sont refroidies uniquement par l'eau venant de la rivière ou de la mer.

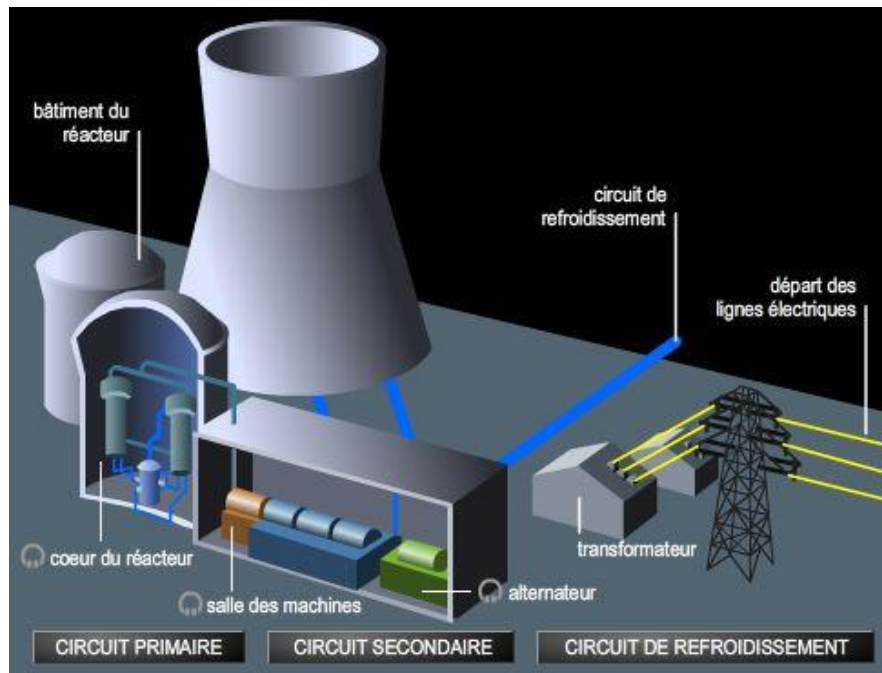


Figure III-2 Constitution d'une centrale nucléaire.

La production d'électricité d'origine nucléaire est développée plus largement à partir de 1974, au lendemain du 1er choc pétrolier.

III.4. Le cœur du réacteur

L'énergie nucléaire utilisée pour produire de l'électricité est produite par un réacteur nucléaire. Dans le réacteur se produisent des réactions en chaîne de fission nucléaire d'une manière contrôlée. L'élément qui se fissionne, le combustible nucléaire, est l'uranium naturel ou enrichi (Figure III.3).

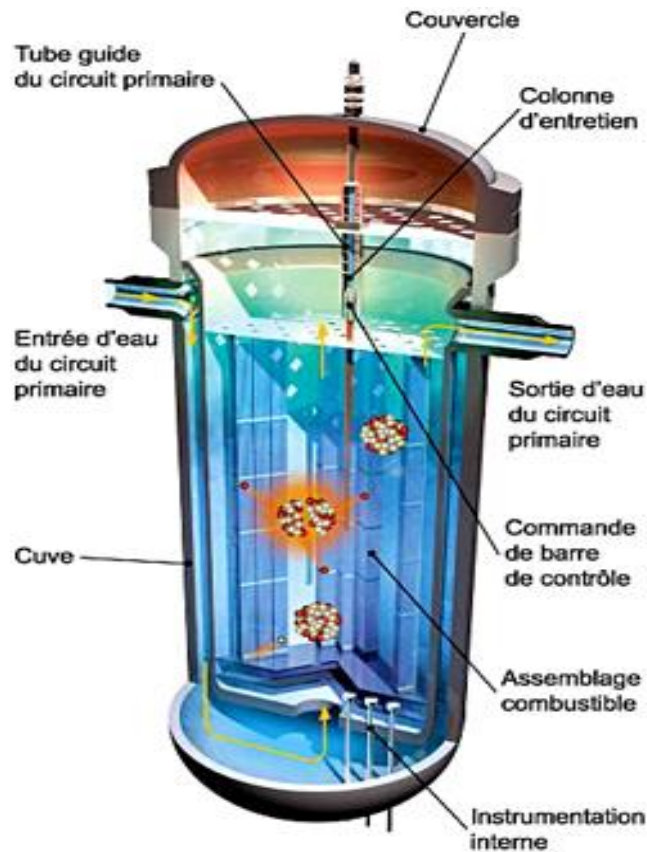


Figure III-3 La cuve d'un réacteur

III.4.1. Le combustible nucléaire

Le combustible d'une centrale nucléaire contient des atomes fissiles c'est-à-dire des atomes dont le noyau a la capacité de se casser sous l'action d'un neutron, faisant libérer une quantité considérable d'énergie. Les principaux atomes fissiles sont l'uranium 233, l'uranium 235, le plutonium 239 et le plutonium 241. Seul l'uranium 235 se trouve à l'état naturel. C'est donc le plus souvent lui qui est utilisé comme combustible dans les centrales nucléaires. Le combustible nucléaire est placé dans le cœur du réacteur.

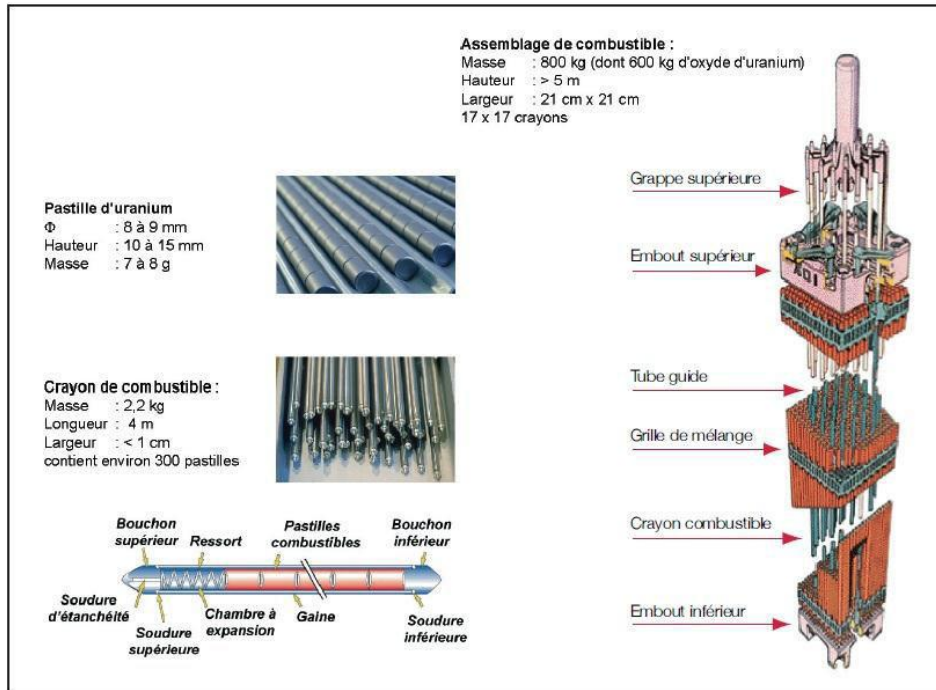


Figure III-4 La préparation des assemblages du combustible .

III.4.2. La fission nucléaire

Quand un noyau d'uranium 235 absorbe un neutron, il peut se fractionner en deux fragments. Ce phénomène, appelé « fission », génère une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur (Figure III.5) .

Le principe d'un réacteur nucléaire consiste à récupérer cette chaleur pour chauffer un fluide et produire de la vapeur qui permettra d'activer la turbine. Chaque fission produit à son tour des neutrons d'énergie élevée qui, en se déplaçant parmi les atomes d'uranium 235 ou de plutonium, peuvent provoquer la fission d'un nouveau noyau d'atome d'uranium 235 et générer ainsi des réactions en chaîne (cascade de fissions).

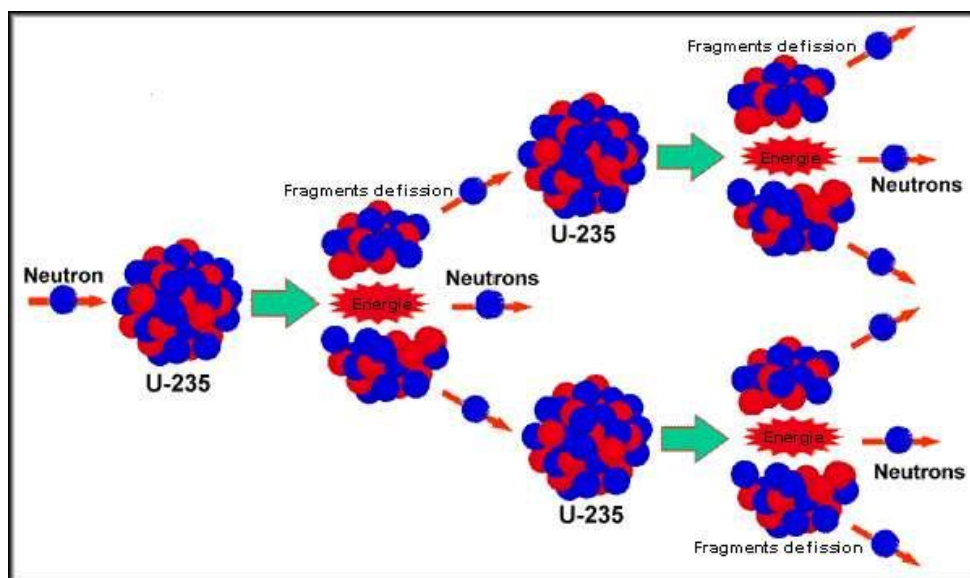


Figure III-5 La fission nucléaire.

Dans un réacteur nucléaire, la réaction en chaîne est maîtrisée et se maintient à un rythme de fissions constant grâce à des barres de contrôle qui régulent le nombre de neutrons et à un modérateur qui régule leur vitesse (ralentissement des neutrons afin d'augmenter les chances qu'ils provoquent une fission). La fission d'un gramme d'uranium produit plus de chaleur que la combustion d'une tonne de pétrole.

III.4.3. Le caloporteur et le générateur de vapeur

L'énergie libérée sous forme de chaleur doit être récupérée pour produire de l'électricité. C'est le caloporteur, un fluide pouvant être un gaz ou un liquide, qui joue ce rôle. Le caloporteur s'échauffe au contact du combustible chauffé par les fissions. En circulant autour des barreaux d'uranium, il récupère la chaleur du combustible pour la transporter hors du cœur du réacteur.

Le caloporteur sort du cœur du réacteur à une température élevée, entre 300 et 550°C (Figure III.6) .

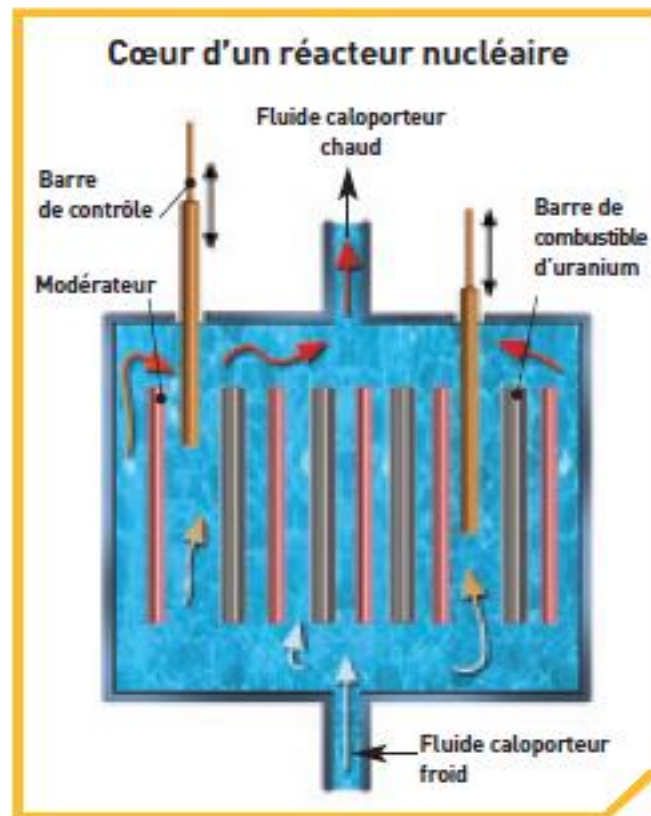


Figure III-6 Le caloporteur et le générateur de vapeur.

III.5. Les différents types de réacteurs

Même si le principe de fonctionnement est identique dans toutes les centrales nucléaires, il existe plusieurs familles de réacteurs, que l'on appelle filières.

On peut les classer en cinq grandes catégories en fonction de la nature du combustible utilisé, de la substance qui transporte la chaleur appelée caloporteur et de la substance qui ralentit les neutrons appelée modérateur :

III.5.1. Réacteur à eau pressurisée (ou REP)

L'eau sous pression (donc à l'état liquide) est à la fois le caloporteur et le modérateur. Le combustible utilisé est de l'uranium enrichi.

Ce type de réacteur est le plus répandu dans le monde, représentant environ 55 % des réacteurs installés.

En France, tous les réacteurs destinés à la production d'électricité sont des REP, excepté le réacteur de recherche Phénix (exploité par le CEA et EDF) mis à l'arrêt à l'automne 2009.

III.5.2. Réacteur à eau bouillante (ou REB)

L'eau est aussi le caloporteur, mais elle n'est plus pressurisée. À pression atmosphérique ambiante, elle devient bouillante. Le combustible utilisé est de l'uranium enrichi. Ce type de réacteur représente 22 % des réacteurs installés dans le monde.

III.5.3. Réacteur à eau lourde

L'eau lourde est à la fois le caloporteur (mis sous pression) et le modérateur. C'est une eau constituée de molécules d'eau dont l'atome d'hydrogène est un atome de deutérium, isotope lourd de l'hydrogène.

Le combustible utilisé est de l'uranium naturel.

III.5.4. Réacteur à neutrons rapides (ou RNR)

Ils n'utilisent pas de modérateur et cherchent à exploiter de façon plus complète les propriétés du combustible. Le fluide caloporteur est un métal liquide (tel le sodium) ou un gaz (par exemple l'hélium). Le combustible utilisé est de l'uranium enrichi ou du plutonium. Ils peuvent générer de la matière fissile, d'où leur nom de surgénérateurs.

Le réacteur Phénix en France fonctionne avec cette technologie.

III.5.5. Réacteur caloporteur gaz (RCG)

L'hélium est le caloporteur. Porté à haute température, il peut alimenter directement la turbine sans échangeur intermédiaire.

Il peut permettre la réalisation de centrales de petites tailles (de 100 à 300 MW) et peut également fonctionner avec des neutrons rapides.

III.6. Générations de réacteurs

Les réacteurs nucléaires ont été classés en plusieurs générations en fonction de l'âge de leur conception:

- Les réacteurs actuellement en service sont dits de génération II, La seconde génération s'est développée essentiellement pendant la période 1970-90 (voire I pour les plus anciens; e.g. Magnox au Royaume-Uni).
- Les réacteurs actuellement en construction (EPR, AP1000) sont dits de génération III ou III+ (voire II+ pour les CPR1000 chinois).
- Les réacteurs de génération IV sont à l'étude.

III.7. Le fonctionnement d'une centrale nucléaire

La fission des atomes d'uranium produit de la chaleur, chaleur qui transforme alors de l'eau en vapeur et met en mouvement une turbine reliée à un alternateur qui produit de l'électricité

Figure III-7.

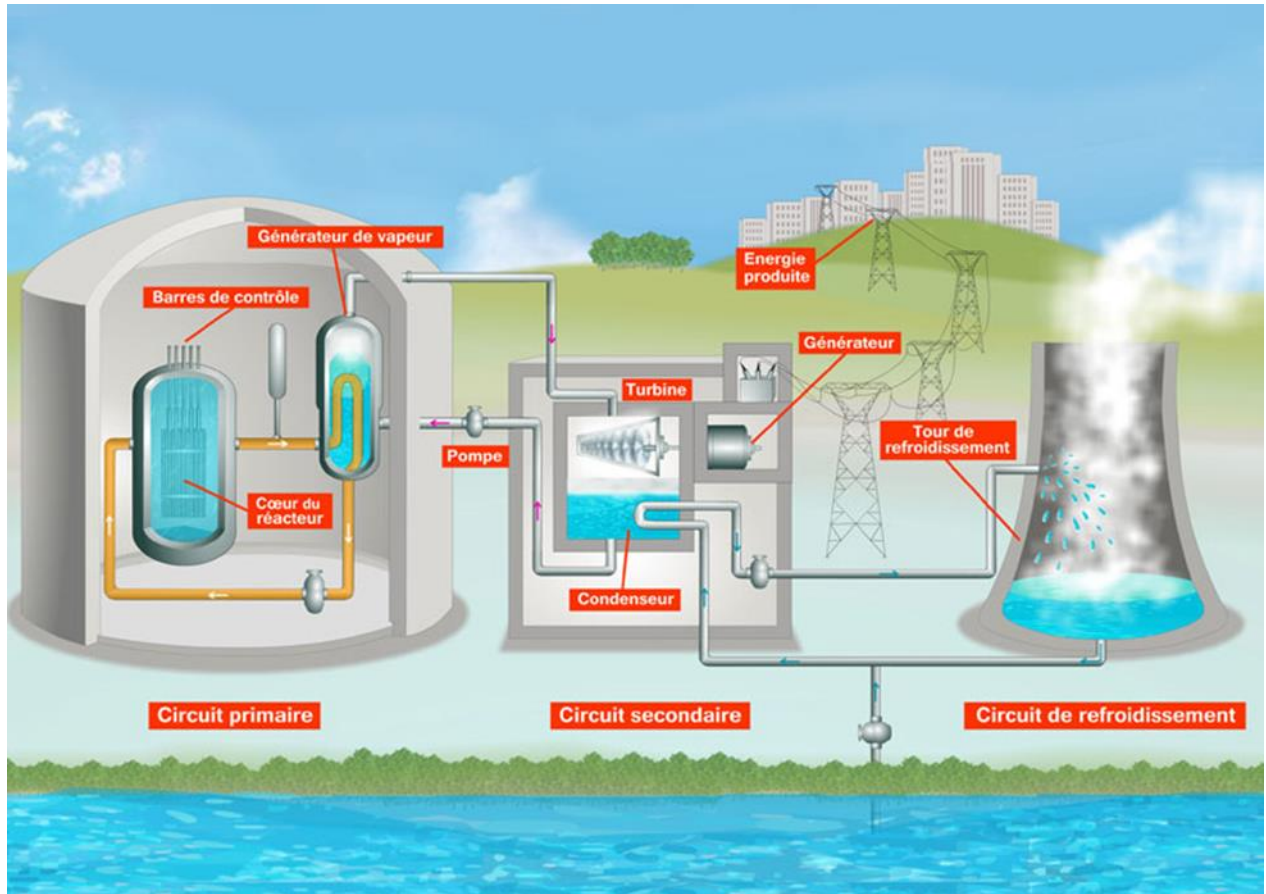


Figure III-7 Le fonctionnement d'une centrale nucléaire.

III.7.1. Le circuit primaire

Dans le réacteur, la fission des atomes d'uranium produit une grande quantité de chaleur. Cette chaleur fait augmenter la température de l'eau qui circule autour du réacteur, à 320 °C. L'eau est maintenue sous pression pour l'empêcher de bouillir. Ce circuit fermé est appelé circuit primaire.

III.7.2. Le circuit secondaire

Le circuit primaire communique avec un deuxième circuit fermé, appelé circuit secondaire par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. Dans ce générateur de vapeur, l'eau

chaude du circuit primaire chauffe l'eau du circuit secondaire qui se transforme en vapeur. La pression de cette vapeur fait tourner une turbine qui entraîne à son tour un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.

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

III.7.3. Le circuit de refroidissement

À la sortie de la turbine, la vapeur du circuit secondaire est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve. Ce troisième circuit est appelé circuit de refroidissement.

En bord de rivière, l'eau de ce troisième circuit peut alors être refroidie au contact de l'air circulant dans de grandes tours, appelées aéroréfrigérants.

Les 3 circuits d'eau sont étanches les uns par rapport aux autres.

III.8. Puissance produite

Une centrale nucléaire permet de produire de très grandes quantités d'électricité : La puissance délivrée par un réacteur REP (Réacteur à eau pressurisée) va de 900 à 1450 MW. L'EPR (European Pressurized water Reactor) est un réacteur à eau pressurisée de troisième génération. A partir d'une même quantité de combustible, il produit plus d'électricité. La puissance de ce réacteur sera de 1600 MW.

III.9. Exploitation

-La centrale nucléaire est utilisée en base (on ne peut pas arrêter la centrale pour ajuster la production à la demande, mais seulement en cas d'absolue nécessité (maintenance ou risque d'accident). puisque pour des raisons techniques, il est très difficile d'arrêter la réaction en chaîne, et cela endommage le combustible.

-Elle produit de grandes quantités d'électricité, répondant à une demande qui ne cesse de croître, à un coût très compétitif.

-Sa production est généralement ajustable entre 60 à 100% de sa puissance.

III.10. Impacts sur l'environnement

- Production des déchets radioactifs dangereux (uranium appauvri, plutonium, MOX), qui doivent être isolés pour des centaines d'années (On ne connaît pas à l'heure actuelle la solution pour les éliminer totalement).
- Elle produit de grandes quantités d'électricité sans émettre de CO₂
- La gestion des déchets toxiques à vie longue : à ce jour, ni le stockage ni le retraitement n'offrent de solutions totalement satisfaisantes sur le plan environnemental.

III.11. Inconvénients

Les inconvénients d'une centrale nucléaire sont comme suit :

- Utilisation d'une énergie non renouvelable (matière première en quantité limitée)
- Production des déchets radioactifs dangereux (uranium appauvri, plutonium, MOX), qui doivent être isolés pour des centaines d'années. On ne connaît pas à l'heure actuelle la solution pour les éliminer totalement.
- Des risques d'accidents, qui, s'ils sont rares, peuvent être graves et catastrophiques. (Tchernobyl 1986)
- Demande un certain niveau de technologie qui n'est pas accessible à tous les pays du monde

III.12. Perspectives d'avenir

- L'EPR (3^{ème} génération de réacteurs) : en utilisant le MOX (combustible recyclé, à base de plutonium et d'uranium appauvri), il réduit de 15 à 30% les déchets radioactifs, et sa sûreté est améliorée.
- Le surgénérateur (4^{ème} génération), ou réacteur à neutrons rapides : il utilise la totalité de l'uranium sans nécessiter d'enrichissement, et permet de détruire les déchets à vie longue des générations précédentes (cycle Uranium/Plutonium). Un autre système de combustible est envisagé, le thorium 232-uranium 233. Le thorium présente l'avantage d'être trois à quatre fois plus abondant que l'uranium sur la terre avec une bonne répartition.

Exploitation

Pour des raisons techniques, il est très difficile d'arrêter la réaction en chaîne, et cela endommage le combustible.

On ne peut donc pas arrêter la centrale pour ajuster la production à la demande, mais seulement en cas d'absolue nécessité (maintenance ou risque d'accident).

La centrale nucléaire est utilisée en base.

Sa production est généralement ajustable entre 60 à 100% de sa puissance.

Pollution

L'avantage du nucléaire, c'est qu'il permet une production continue de grandes quantités d'électricité, tout en n'émettant que très peu de CO₂. L'inconvénient, c'est qu'il produit des déchets radioactifs dangereux (uranium appauvri, plutonium, MOX), qui doivent être isolés pour des centaines d'années, voire des millénaires. On ne connaît pas à l'heure actuelle la solution pour les éliminer totalement.

Impacts socio-économiques

La filière nucléaire dispose d'atouts de taille :

- Elle produit de grandes quantités d'électricité, répondant à une demande qui ne cesse de croître, à un coût très compétitif.
- Elle produit l'électricité sans utiliser de ressources fossiles en voie d'épuisement, et sans émettre de CO₂, ce qui la donne un avantage important.

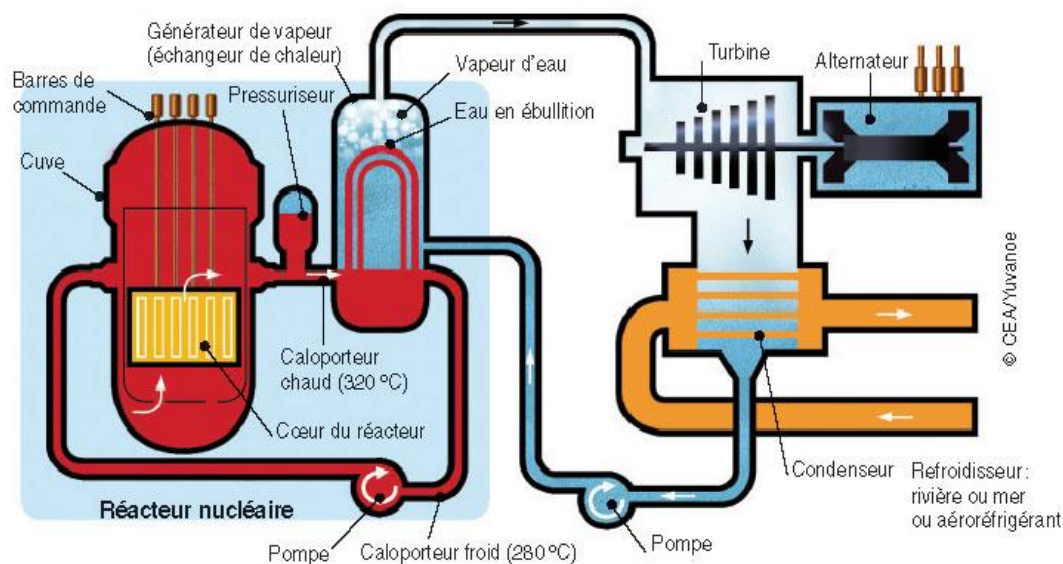
Le revers de la médaille, c'est que cette puissance formidable pose des problèmes de sûreté

- La gestion des déchets toxiques à vie longue : à ce jour, ni le stockage ni le retraitement n'offrent de solutions totalement satisfaisantes sur le plan environnemental.
- Les stress-tests des centrales françaises menés suite à l'accident de Fukushima : ils ont révélé la nécessité d'investir de 5 à 10 milliards d'euros pour remettre l'ensemble du parc aux normes, ce qui influera sur les coûts de production.
- Les incidents ou accidents qui surviennent régulièrement dans les installations nucléaires : pas toujours relayés par les médias, ils suscitent des doutes sur la transparence des autorités sur la sûreté nucléaire.
- La mauvaise acceptation du public des risques d'accidents, qui, s'ils sont rares, peuvent être catastrophiques.

III.13. Conclusion

Un principe de fonctionnement identique dans toutes les centrales nucléaires, mais plusieurs familles de réacteurs.

Schéma de principe d'un réacteur à eau sous pression



Les réacteurs à eau sous pression produisent près de la moitié de l'électricité d'origine nucléaire dans le monde.

Chapitre IV : Les centrales hydrauliques

IV.1. Introduction

L'énergie hydraulique permet de produire de l'électricité, appelée hydroélectricité, dans les centrales hydroélectriques, grâce à la force des chutes d'eau d'origine naturelle ou créées artificiellement à partir des retenues de barrage.

IV.2. Définition

Une centrale hydroélectrique est une usine où l'on produit de l'électricité en utilisant l'eau comme force motrice pour faire tourner des turbines qui entraînent à leur tour des alternateurs. Cette force dépend soit de la hauteur de la chute d'eau (centrales de haute ou moyenne chute), soit du débit des fleuves et des rivières (centrales au fil de l'eau).

L'hydroélectricité constitue la première source renouvelable et la troisième source générale de production électrique au monde (16,3 % en 2011)⁽¹⁾ derrière le charbon (40,6%) et le gaz (22,2%).

IV.3. Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

Une centrale hydroélectrique fonctionne en utilisant l'énergie de l'eau en mouvement pour produire de l'électricité. Voici les principales étapes du fonctionnement d'une centrale hydroélectrique Figure IV-1:

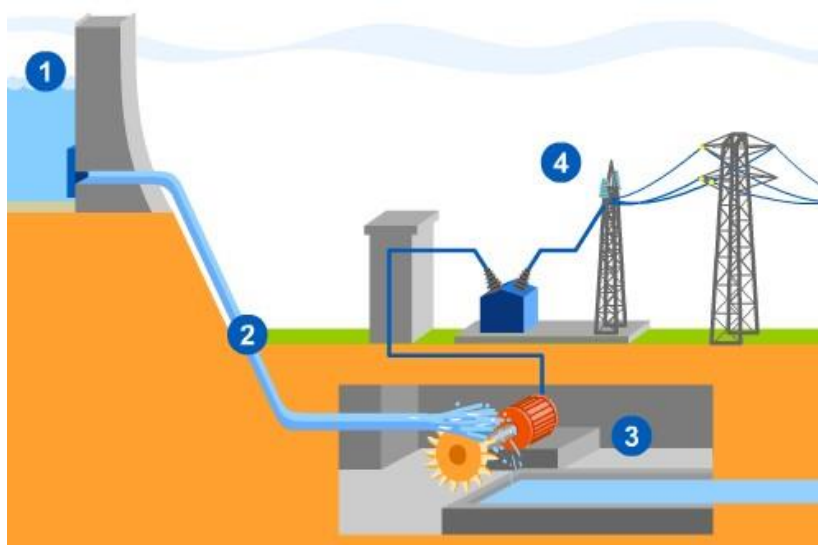


Figure IV-1 Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique.

1- La retenue de l'eau

Le barrage retient une partie de l'eau qui s'écoule et crée un lac de retenue.

2- La conduite forcée de l'eau

Une fois l'eau stockée, on canalise l'eau qui va s'écouler vers un mécanisme de production d'énergie, dans de longs tuyaux métalliques appelés conduites forcées. Le débit est contrôlé par des vannes. Ces tuyaux conduisent l'eau vers la centrale hydraulique, située en contrebas.

3- La production d'électricité

A la sortie de la conduite, l'eau est projetée sur une turbine. Cette eau actionne les turbines qui entraînent à leur tour des alternateurs pour produire du courant électrique.

La puissance de la centrale dépend de la hauteur, de la chute et du débit de l'eau. Plus ils seront importants, plus cette puissance sera élevée.

4- L'adaptation de la tension

Un transformateur injecte ensuite cette électricité dans le réseau, où elle est transportée par des lignes à haute ou très haute tension.

L'eau turbinée qui a perdu de sa puissance rejoint la rivière par un canal spécial appelé canal de fuite.

❖ Avec cette présentation du fonctionnement de la centrale hydroélectrique, On distingue qu'il y a trois types de travaux qui sont accumulés entre eux et permettent la production de l'hydroélectricité tels que les ouvrages de génie civil, les équipements électriques et les équipements hydrauliques.

IV.4. Les ouvrages de génie civil

Les principaux ouvrages de génie civil sont le barrage, les conduites d'eau et la centrale en elle-même.

IV.4.1. Les différents types des barrages

Depuis longtemps l'homme a eu recours à des barrages pour stocker de l'eau. Ils étaient composés de bois mais de nos jours, ce sont d'incroyables structures de béton qui se différencient par leurs formes et leurs tailles. Parmi les barrages, on distingue :

IV.4.1.1. Les barrages à poids

Le barrage à poids est un barrage dont la propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau. Ce sont des barrages souvent relativement épais, dont la forme est généralement simple (leur section s'apparente dans la plupart des cas à un triangle rectangle).

Les barrages-poids sont privilégiés lorsque le rocher du site (vallée, rives) est suffisamment résistant et lorsque les conditions pour construire un barrage-voûte ne sont pas réunies

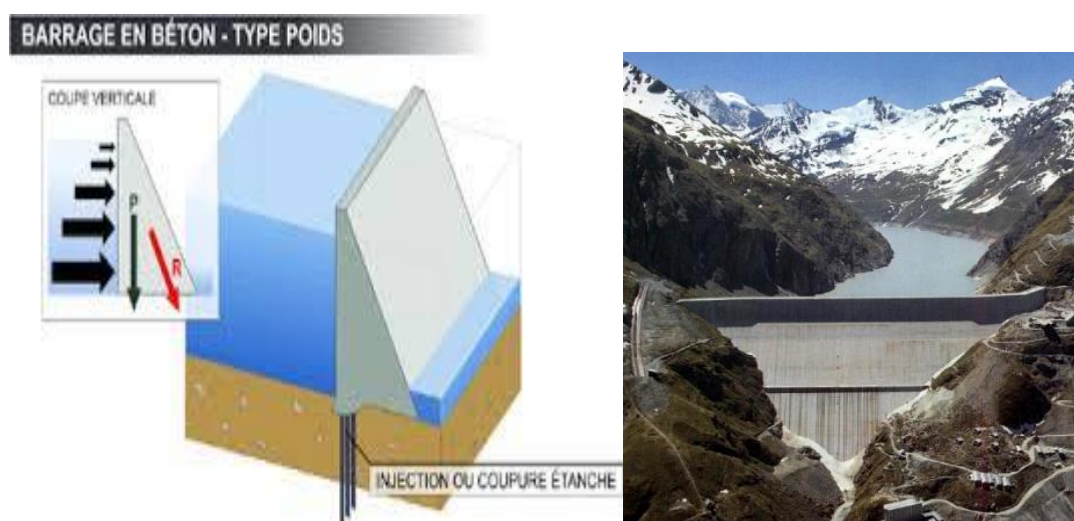


Figure IV-2 Le barrage de la Grande-Dixence en Suisse.

IV.4.1.2. Les barrages-voûtes

Est un type de barrage à forme arquée dont la courbe permet de reporter les efforts dus à la poussée de l'eau sur chaque côté des rives plutôt que sur le barrage lui-même.

Les barrages-voûtes sont essentiellement utilisés dans des vallées étroites disposant de versants rigides.

Exemple :

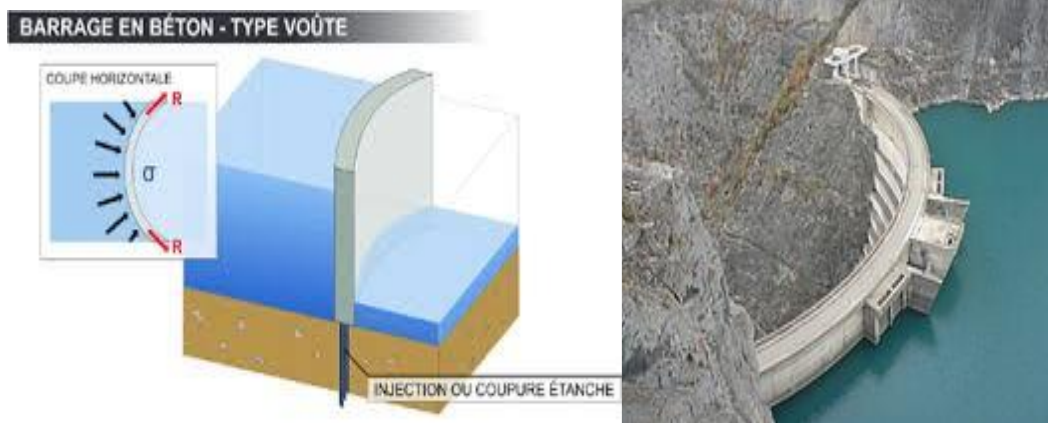


Figure IV-3 Barrage de Tignes, en Savoie.

IV.4.1.3. Les barrages à contreforts

(Ou barrage à voûtes multiples) est un barrage qui s'appuie sur une série de voûtes qui permettent de transmettre la poussée de l'eau vers la fondation du barrage. Ces barrages reportent la pression sur les fondations inférieures ainsi que sur les rives. Le terrain doit donc posséder une fondation rocheuse solide, de bonne qualité et être assez large.



Figure IV-4 Le barrage de la Girotte, en Savoie.

IV.4.1.4. Les barrages en remblais

Ce type des barrages est constitué d'un matériau meuble, qu'il soit très fin ou très grossier (enrochements), ce qui le différencie du barrage-poids. Les barrages en remblais regroupent plusieurs catégories très différentes. Les différences proviennent des types de matériaux utilisés, et de la méthode employée pour assurer l'étanchéité.

Exemple :



Figure IV-5 Le barrage d'Assouan, en Egypte.

IV.4.2. Les conduites d'eau

Les conduites d'eau sont les suivantes :

- Une conduite forcée, qui peut parfois prendre la forme d'un tunnel souterrain, qui amène l'eau jusqu'à la turbine de la centrale. Elle est généralement en acier galvanisé, en fer et plus rarement en fibre de
- L'entrée et la sortie de la turbine, qui incluent les soupapes et les vannes nécessaires pour arrêter l'arrivée d'eau lors de la fermeture pour l'entretien. Ces composants sont généralement en acier.
- Un canal de fuite, qui transporte l'eau de la sortie de la turbine jusqu'à la rivière. Ce canal est en général excavé, muni de vanne en bois qui permettent les opérations d'entretien.



Figure IV-6 Photo de conduites d'eau.

IV.4.3. La centrale

La centrale en elle-même contient la ou les turbines et la plupart des équipements mécaniques et électriques. La centrale doit assurer une infrastructure, un accès pour l'entretien et un niveau de sécurité adéquats. La centrale est construite en béton et autres matériaux locaux.

IV.5. Equipements hydrauliques

Comme équipements hydrauliques on peut citer les turbines. Les turbines constituent l'organe qui justifie l'existence de nombreux barrages, ce sont elles qui permettent la production d'hydroélectricité en entraînant l'alternateur qui va transformer l'énergie hydraulique en énergie électrique. Ils existent deux types des turbines hydrauliques : les turbines à action et à réaction.

IV.5.1. Les turbines à action :

Les turbines à action qui transforment la pression hydraulique en énergie cinétique par un dispositif statique (injecteur), avant d'actionner la partie mobile. Par exemple :

IV.5.1.1. La turbine Pelton

Est une machine à action, elle 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).

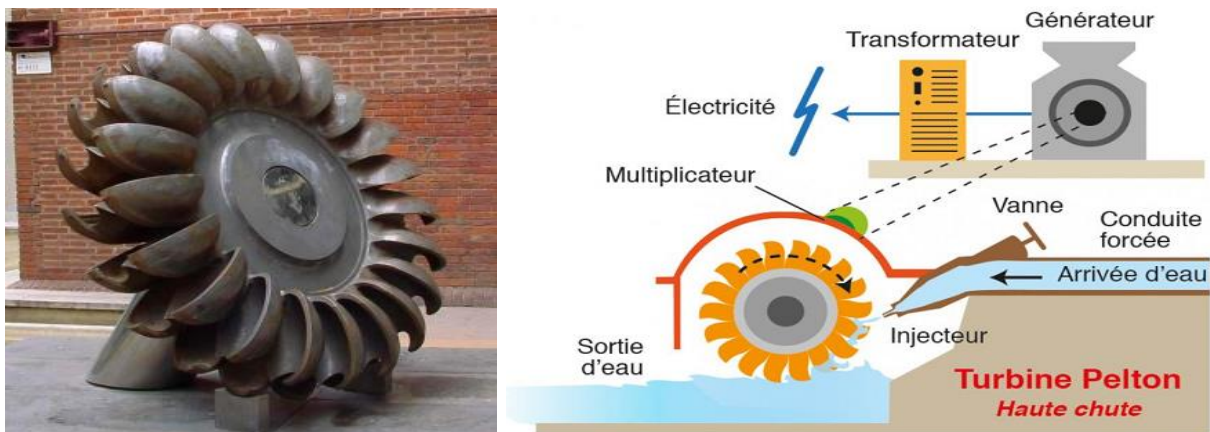


Figure IV-7 Turbine Hydraulique Pelton.

IV.5.2. Les turbines à réaction

La partie mobile provoque au contraire une différence de pression entre l'entrée et la sortie. Par exemple :

IV.5.2.1. La turbine Francis

Est une machine à réaction, ce qui signifie que la pression à l'entrée de la roue est supérieure à la pression de sortie de la roue. Les turbines Francis sont utilisées pour de moyennes chutes (40 à 600 mètres) et moyen débit et peuvent développer des puissances très importantes.

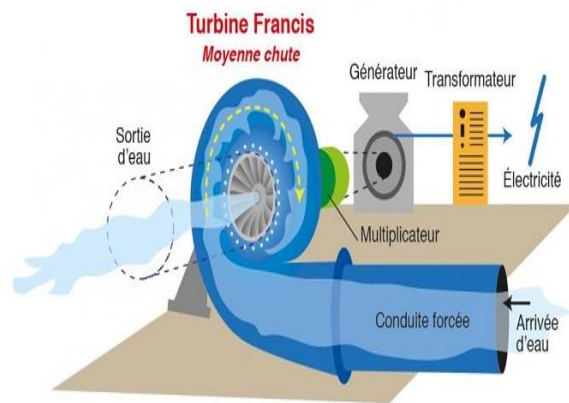
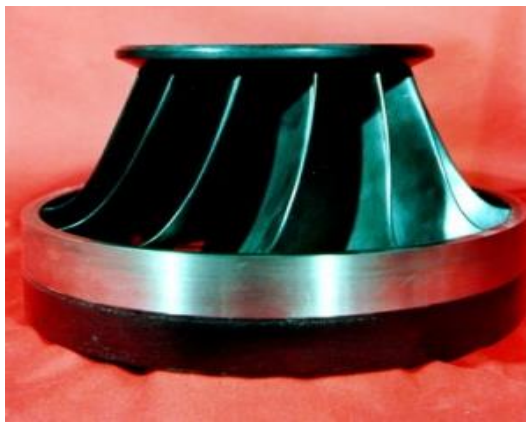


Figure IV-8 Turbine Francis.

IV.5.2.2. La turbine Kaplan

C'est aussi une machine à réaction elle est privilégiée pour les faibles chutes (5 à 50 mètres) et les débits importants, ses pales sont orientables ce qui permet d'ajuster la puissance de la turbine à la hauteur de chute en conservant un bon rendement.

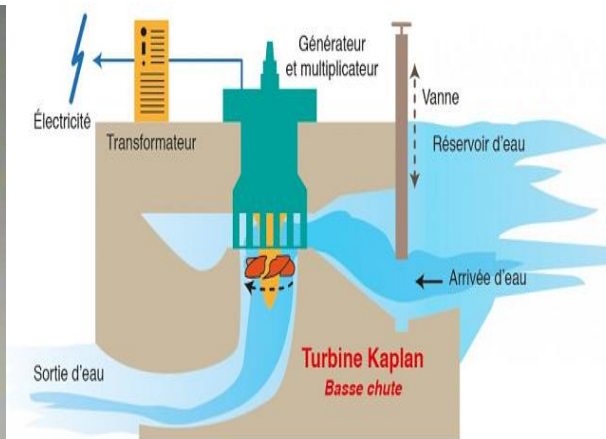


Figure IV-9 Turbine Kaplan.

IV.6. Equipements électriques

On distingue la génératrice, les pylônes, les lignes de transport et autres composants électriques.

IV.6.1. La génératrice

Est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie.

Les génératrices utilisées sont de deux grands types : synchrones et asynchrones (ou à inductions). La génératrice synchrone peut fonctionner isolément, tandis que la génératrice asynchrone doit normalement fonctionner de concert avec d'autres ou être raccordée au réseau principal. Les premières sont utilisées comme principale source d'énergie par les compagnies d'électricité et pour les petites centrales hydrauliques isolées en milieu rural. Les génératrices à induction d'une capacité inférieure à 500 kW sont généralement préférées pour les petites centrales hydroélectriques qui fournissent l'électricité à un important réseau de distribution existant.



Figure IV-10 Photo d'une génératrice.

IV.6.2. Les pylônes

Le rôle des pylônes est de porter les câbles électriques dans un réseau aérien. Ils doivent être capables de supporter le poids de ces câbles ainsi que celui des composants

installés en haut de poteau, tout en résistant aux contraintes mécaniques et aux agressions chimiques du milieu extérieur.

On distingue trois (03) types de pylônes : les pylônes en bois, les pylônes en béton et les pylônes en acier.



Figure IV-11 Photo de pylônes en acier.

IV.6.3. Les lignes de transport

Ces lignes servent à transporter le courant électrique.

IV.6.4. Autres composants électriques

Les autres composants constituant une centrale hydraulique sont les suivants :

- Système électrique de protection et de contrôle, tableau de commande avec coffret de puissance.
- Dispositif de commutation électrique.
- Transformateurs auxiliaires et de transport de l'énergie.
- Services auxiliaires, notamment l'éclairage, ainsi que l'énergie pour alimenter les systèmes de contrôle et le dispositif de commutation électrique.
- Système de ventilation.

IV.7. Les différents types des centrales hydroélectriques

Une centrale hydroélectrique se compose d'une retenue d'eau et d'une installation de production. L'utilisation de la force motrice de l'eau peut s'envisager soit au "fil de l'eau" soit à partir de retenues obtenues par des barrages.

Il existe une grande diversité d'installations hydroélectriques, en fonction de leur situation géographique, du type de cours d'eau, de la hauteur de la chute, de la nature du barrage :

IV.7.1. Les centrales au fil de l'eau ou de basse chute

Principalement installées dans des zones de plaines présentent pour ces raisons des retenues de faible hauteur.

Elles sont implantées sur le cours de grands fleuves ou de grandes rivières. Elles sont caractérisées par un débit très fort avec une chute de moins de 30 m. Dans ce cas, il n'y a pas de retenue d'eau et l'électricité est produite en temps réel (elles turbinent en continu l'eau descendant des rivières). Elles fournissent une énergie en base très peu coûteuse.

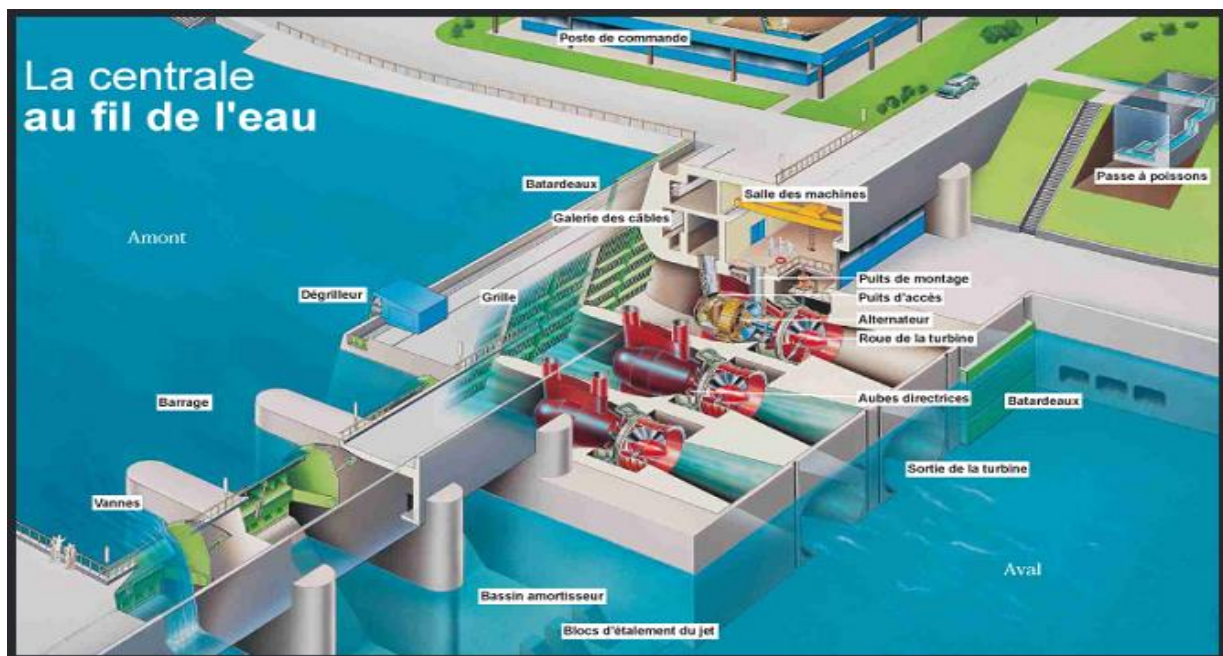


Figure IV-12 Les centrales au fil de l'eau.

IV.7.2. Les centrales par éclusées ou de moyenne chute

Présentent des lacs plus importants. Ces centrales permettent un stockage quotidien ou hebdomadaire de quantités moyennes d'eau. La chute est comprise entre 30m et 300m. Leur gestion permet de suivre la variation de la consommation sur ces horizons de temps (pics de consommation du matin et du soir, différence entre jours ouvrés et weekend, etc.). Elles sont typiques des aménagements réalisés en moyenne montagne.



Figure IV-13 Les centrales d'éclusées.

IV.7.3. Les centrales des lacs ou de haute chute

Elles permettent de produire de l'électricité en retenant l'eau dans un réservoir (lac) situé en amont d'un barrage. Elles correspondent aux ouvrages présentant les réservoirs les plus importants. Ceux-ci permettent un stockage saisonnier de l'eau, et une modulation de la production pour passer les pics de charge de consommation électrique : l'été pour les pays où la pointe de consommation est déterminée par la climatisation, l'hiver pour ceux où elle est déterminée par le chauffage. Ces centrales sont typiques des aménagements réalisés en moyenne et haute montagne.

La chute est supérieure à 300m.

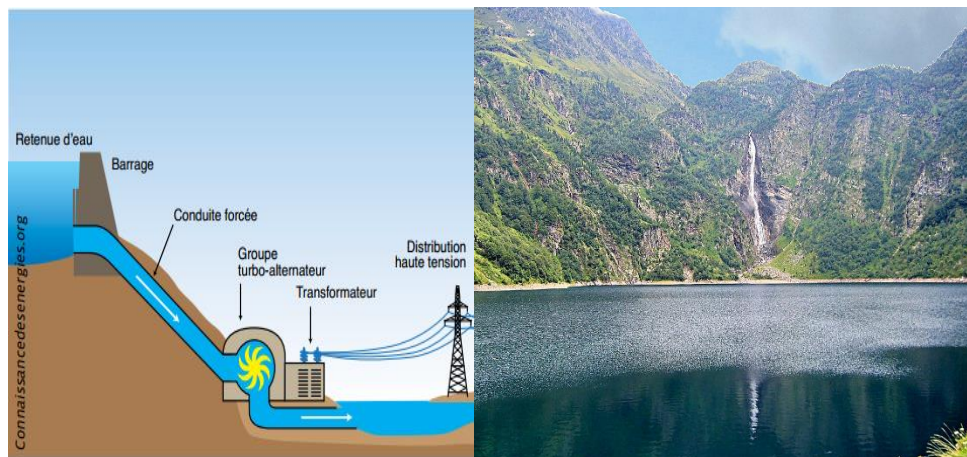


Figure IV-14 Les centrales de lacs.

IV.7.4. Les centrales de pompage-turbinage ou stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP), 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 inférieure à la production, par exemple la nuit, pour la redistribuer, en mode turbinage, lors des pics de consommation. Ces centrales possèdent deux bassins, un bassin supérieur et un bassin inférieur entre lesquels est placée une machine hydroélectrique réversible : la partie hydraulique peut fonctionner aussi bien en pompe, qu'en turbine et la partie électrique aussi bien en moteur qu'en alternateur (machine synchrone).

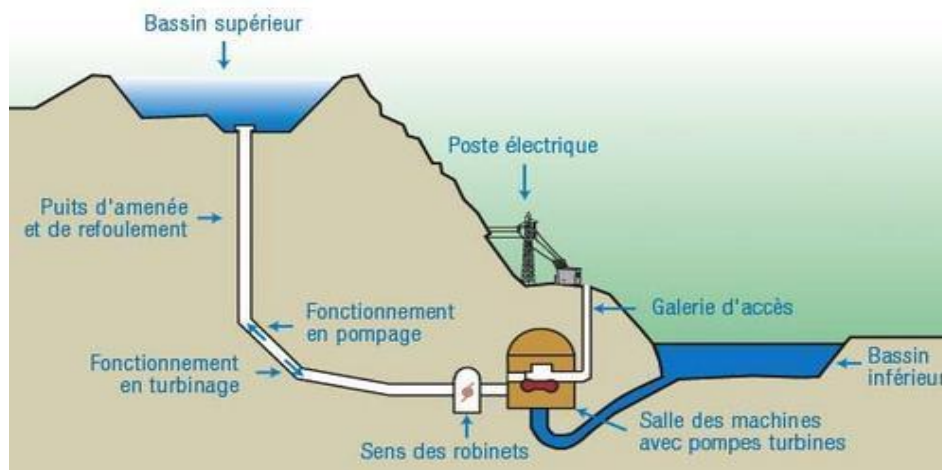


Figure IV-15 Le fonctionnement du pompage (STEP).

IV.7.5. Les centrales maritimes

Ce sont des centrales hydroélectriques qui utilisent l'énergie des marées pour produire de l'électricité. L'énergie marémotrice est issue du mouvement des marées (qui sont-elles mêmes causées par les forces de gravitation de la Lune et du Soleil).

Cette énergie peut être captée de deux manières :

- soit en exploitant les variations du niveau de la mer comme dans l'usine marémotrice de la Rance (énergie potentielle).
- soit en exploitant les courants de marée captés par des turbines appelées "hydroliennes" (énergie cinétique).

Pour exploiter l'énergie marémotrice, on construit un barrage qui laisse passer la mer à marée montante. L'eau remplit un bassin de retenue qui sert ensuite à faire tourner les turbines à marée basse.

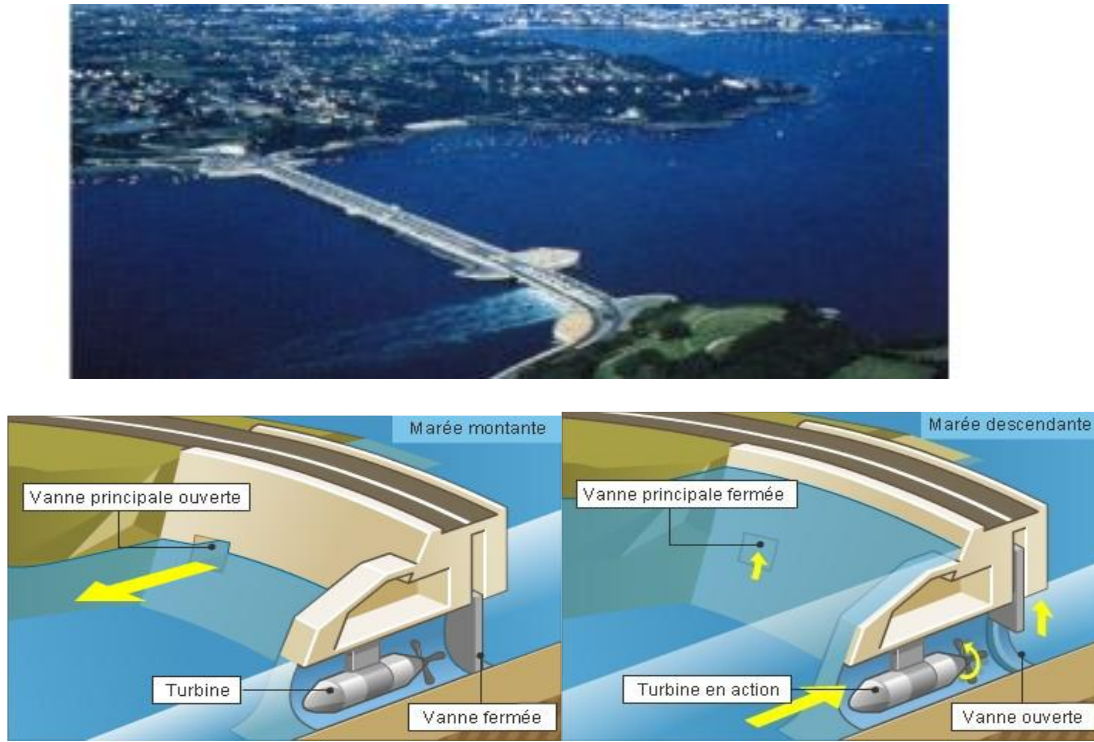
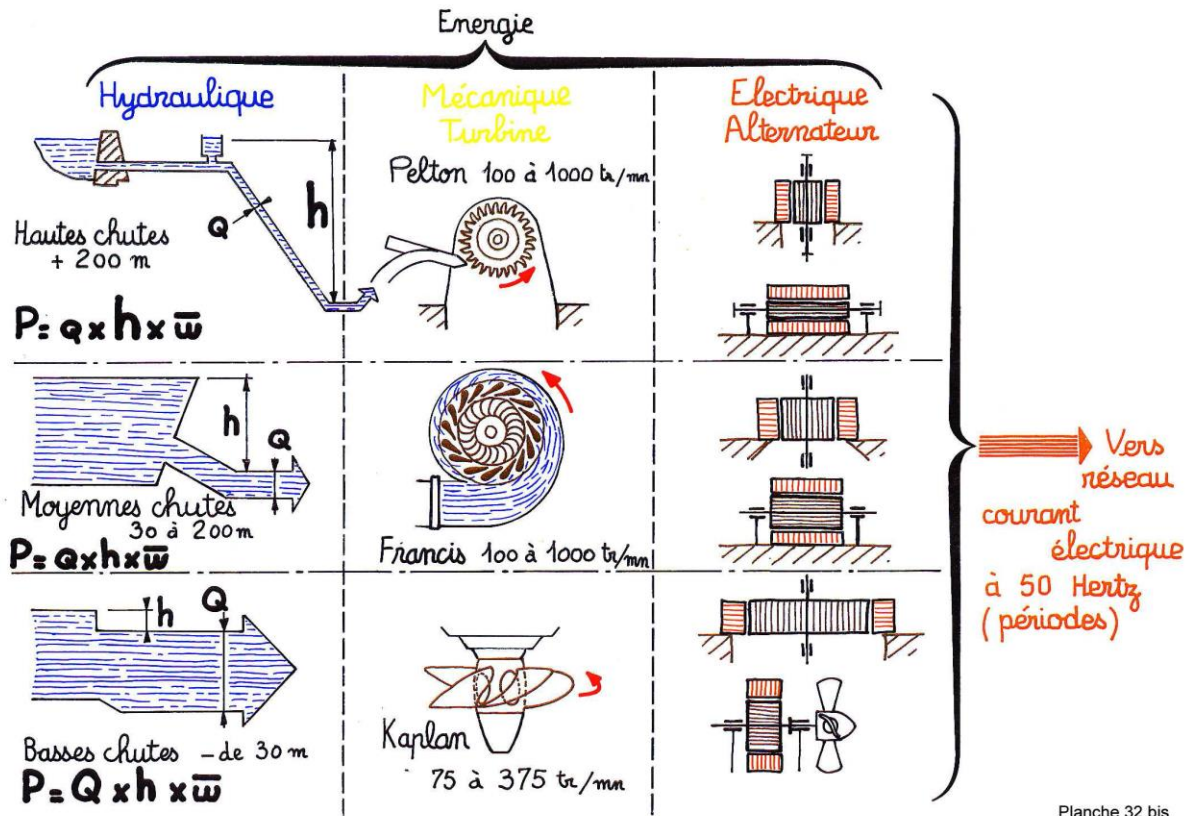


Figure IV-16 Les centrales maritimes.

IV.8. Transformation de l'Énergie Hydraulique en Électricité

La transformation de l'énergie hydraulique en électricité se déroule dans une centrale hydroélectrique. Une centrale hydroélectrique utilise l'énergie hydraulique pour faire tourner une turbine, qui à son tour actionne un générateur pour produire de l'électricité. Ce processus dépend de type de cours d'eau, de la hauteur de la chute. On peut résumer cette diversité selon que suit :



IV.9. Puissance produite

La puissance hydraulique d'une chute d'eau, exprimée en watts (W), est le produit de la masse volumique de l'eau 1000 kg/m³ par le débit Q (exprimé en m³/s) et par la hauteur de chute H, exprimée en mètres.

- **Les centrales au fil de l'eau** : utilisent le débit du fleuve, et fournissent une électricité à **faible coût**. La puissance délivrée dépend du débit du fleuve. Leur capacité peut aller de qq dizaines de kW à qq centaines de MW.

- **Centrale de barrage** : La puissance de la centrale dépend de la hauteur de chute et du débit. Plus ceux-ci sont élevés, plus la puissance délivrée sera importante. Elle peut aller de quelques dizaines à plusieurs centaines de mégawatts.

À l'heure actuelle, l'installation ayant la plus grande puissance de production jamais construite est le barrage des Trois Gorges en Chine. L'installation a une puissance totale installée de 22 500 MW.

IV.10. Avantages et Inconvénients

- Avantages :

- L'hydroélectricité provient d'une source d'énergie primaire renouvelable et inépuisable (énergie primaire gratuite).
- Les centrales hydrauliques ne produisent ni émissions de CO₂, ni rejets polluants, ni déchets (Il s'agit donc d'une énergie propre).
- fournit l'électricité à la demande (centrale de barrage).
- capables de fournir rapidement de grandes quantités d'électricité.
- Les centrales au fil de l'eau sont proches des consommateurs, elles contribuent à limiter les pertes sur le réseau.

-Inconvénients :

- un peu dépendant des conditions météorologiques (problème lors des sécheresses).
- en cas de défaillance du barrage, les conséquences peuvent être graves en aval.
- délocalisation de la population.

IV.11. Conclusion

Les centrales hydroélectriques sont un moyen efficace, économique et écologique d'obtenir de l'électricité.

Les centrales hydroélectriques produisent de l'électricité de manière très efficace. En fait, elles convertissent environ 90 % de l'énergie de l'eau en électricité.

Le rendement des centrales hydroélectriques est plus important que tout autre type de production d'énergie électrique. A titre d'exemple, le rendement d'une centrale nucléaire est inférieur à 40%.

Les centrales hydroélectriques produisent 20% de l'électricité mondiale et plus de 40% dans les pays les plus développés.

Exemple : Le barrage des trois gorges (Chine)



Figure IV-16 Turbine de l'une des 26 centrales hydroélectriques

Le barrage des trois gorges sur le fleuve Yangzi

-Puissance : 22,5GW (26 generateurs = 10 % de la capacite installée en Chine ,ou six fois la capacite des centrales hydroelectriques du Rhone ou encore l'equivalent d'une douzaine de tranches de centrale nucleaire)

-Hauteur : 100 m

-Longueur : 2,3 km

-Volume d'eau retenu : 39 milliards de m³

-Volume de beton utilise : 27 millions de m³

-Reservoir de : 660 km de long

-Deplacement de : 1,8 millions d'habitants

-2 000 sites archeologiques menaces

-entrer en service dans sa totalité en 2009

-La puissance des trois Gorges est le triple de la puissance installée de la plus grande centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa (7 réacteurs) d'une puissance installée totale de 8 212 MW.

-La puissance de la deuxième plus grande centrale hydroélectrique, celle d'Itaipu à la frontière entre le Brésil et le Paraguay, est de 14 000 MW.

Chapitre V : L'énergie solaire

V.1. Introduction

L'énergie solaire fait partie des énergies renouvelables. L'homme a compris depuis longtemps l'intérêt d'exploiter cette source d'énergie. Toutefois, il a été confronté jusqu'à aujourd'hui aux difficultés de récupérer cette énergie, de la transporter, de la stocker ou de la transformer en électricité : l'exploitation de cette source énergétique est récente et se développe mais reste encore très coûteuse.

V.2. Définition

-L'énergie solaire est l'énergie fournie par les rayons du soleil. -Les technologies actuelles permettent de convertir l'énergie solaire sous deux formes : en chaleur (énergie thermique) ou en électricité.

- Selon les besoins énergétiques et les conditions présentes, trois filières d'exploitation de l'énergie solaire sont disponibles.

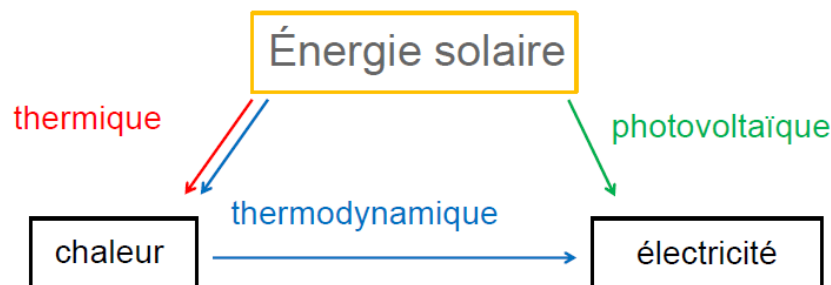


Figure V-1 Les voies de l'énergie solaire.

V.3. L'énergie solaire thermique

V.3.1. Principes de fonctionnement

L'énergie solaire thermique est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau ou des locaux. On utilise pour cela des capteurs thermiques. Le capteur thermique absorbe les photons solaires et les transforme en chaleur. Cette chaleur est ensuite transmise à un fluide caloporteur qui la transporte vers un réservoir de stockage d'énergie, comme il pourra être utilisé pour :

-le chauffage d'un bâtiment,

-la production d'eau chaude.

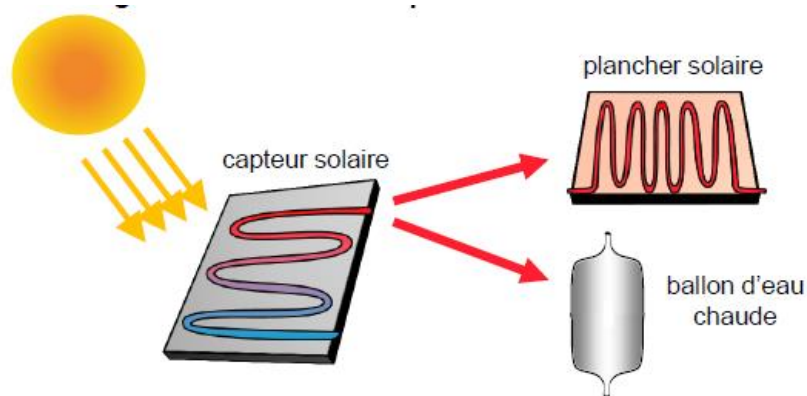


Figure V-2 L'énergie solaire thermique.

V.3.2. Éléments constituant la chaîne de conversion

V.3.2.1. Les capteurs

Le capteur est l'élément constituant la chaîne de conversion, le matériau qui le recouvre doit être fortement absorbant, tel l'oxyde de chrome.

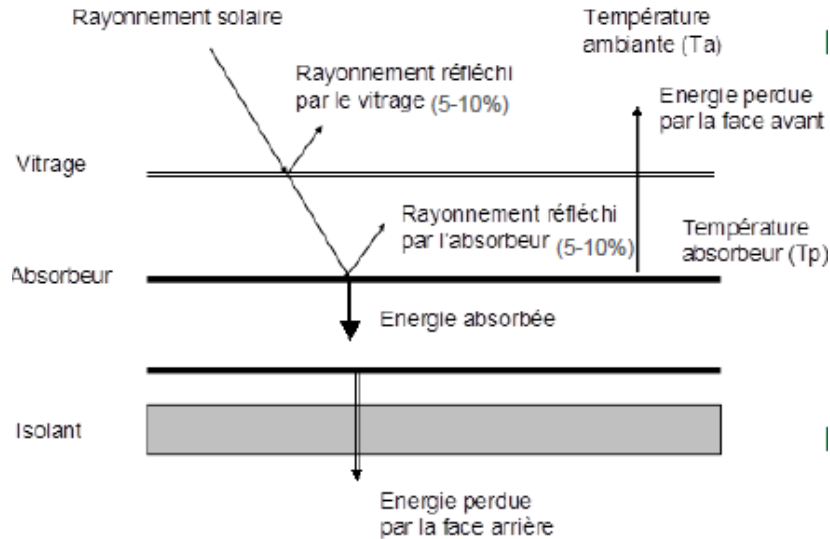


Figure V-3 Constitution d'un caloporteur.

Ils existent plusieurs types de capteurs (plans, sans vitrage, à tubes sous vide). Leur utilisation dépend de la quantité de chaleur qu'on souhaite produire, le type d'installation qu'ils doivent intégrer (centrales, maisons...), et la région dans la quelle on se trouve.

V.3.2.2. Le fluide caloporteur

Ce fluide va circuler dans les capteurs et récupérer l'énergie thermique collectée. Généralement, l'eau ou un fluide antigel sont utilisés.

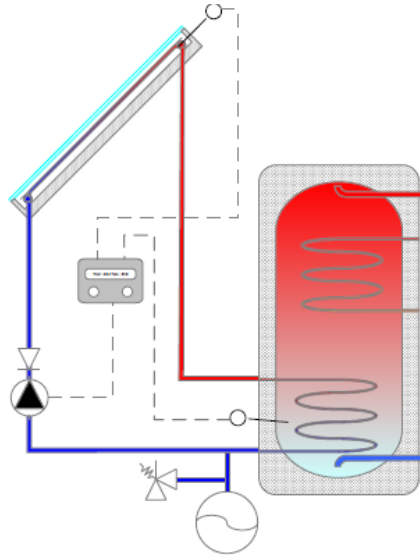


Figure V-4 Le fluide caloporteur

V.3.3. Les différentes technologies de capteurs existantes

-Capteurs solaires sans vitrage : les plus simples, qui atteignent les niveaux de températures les moins élevés, utilisés principalement pour le chauffage des piscines.



Figure V-5 Panneau solaire pour le chauffage de piscine

-Capteurs solaires plans :

Ils sont composés d'un vitrage qui laisse traverser le rayonnement solaire, d'un absorbeur en cuivre ou aluminium, d'un collecteur constitué de tubes en cuivre dans lequel circule le fluide. Le tout est isolé thermiquement en face arrière. Ils sont principalement destinés à la production d'eau chaude sanitaire et au chauffage.

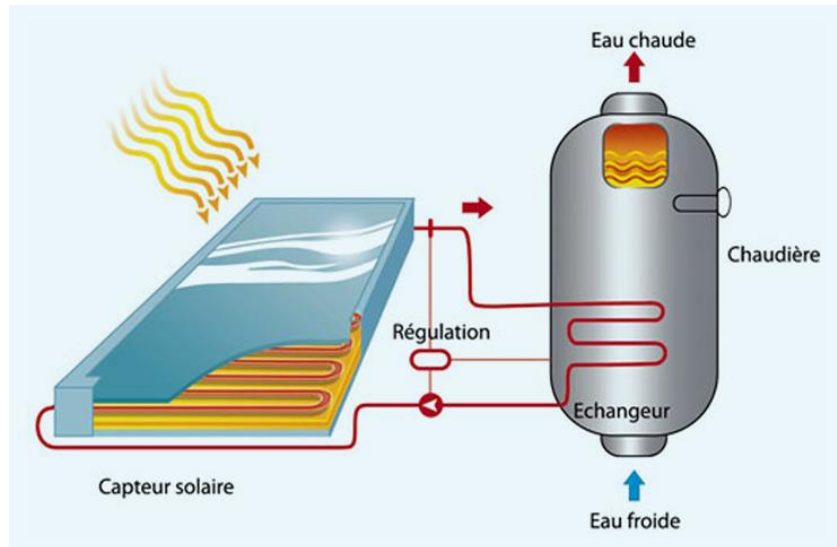
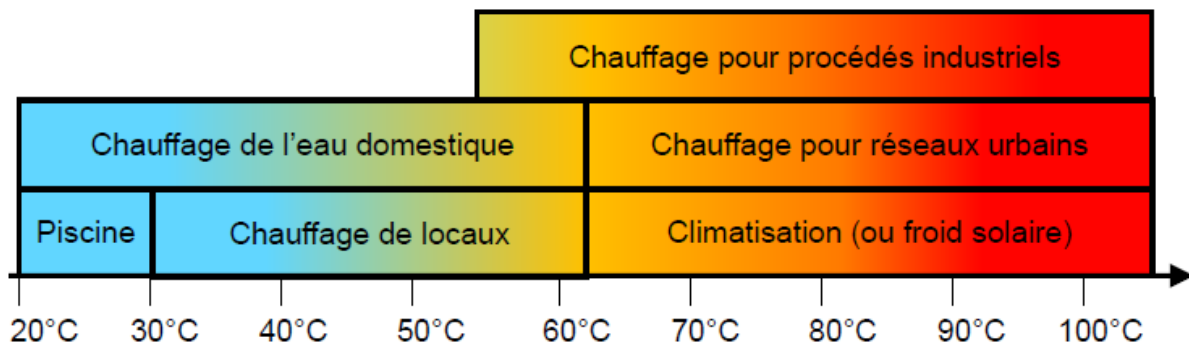


Figure V-5 Capteurs solaires plans.

V.4. Différentes utilisations de la chaleur solaire

Il existe 3 utilisations générales de l'énergie thermique, chaque utilisation nécessitant une gamme de température à atteindre :

- **Utilisation 1** : Chauffage de l'eau sanitaire
- **Utilisation 2** : Chauffage de bâtiment
- **Utilisation 3** : Climatisation intérieure, ou « froid solaire »

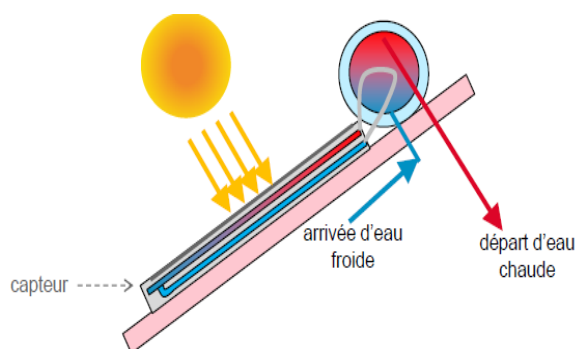


Exemples:

-Chauffage de l'eau sanitaire



Photo : chauffe-eau solaire monobloc



Principe du chauffe-eau solaire monobloc

-Le chauffage de bâtiment

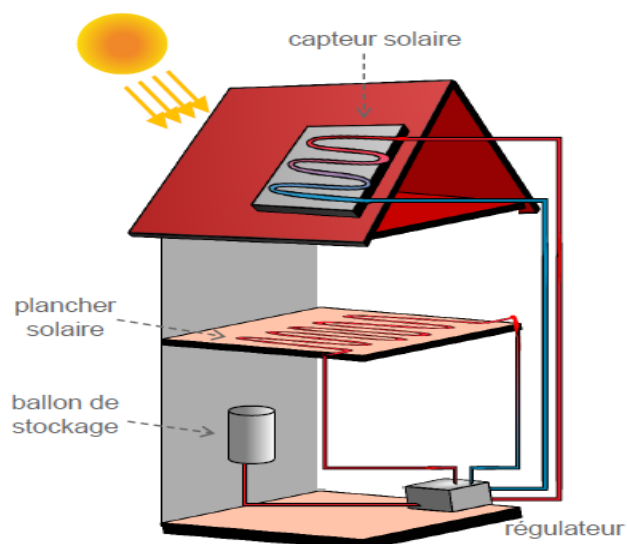


Schéma : Principe du chauffage de bâtiment par plancher solaire direct (PSD) ou hydroaccumulation

V.5. Centrale solaire thermique (l'énergie solaire thermodynamique)



L'énergie thermique du Soleil permet aussi de produire de l'électricité par voie thermodynamique. Cela nécessite des températures importantes (de l'ordre de 1000 °C) que l'on atteint en concentrant la lumière solaire avec des miroirs.

V.5.1. Le fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique

Le fonctionnement des centrales solaires thermodynamiques reposent sur la technique suivante :

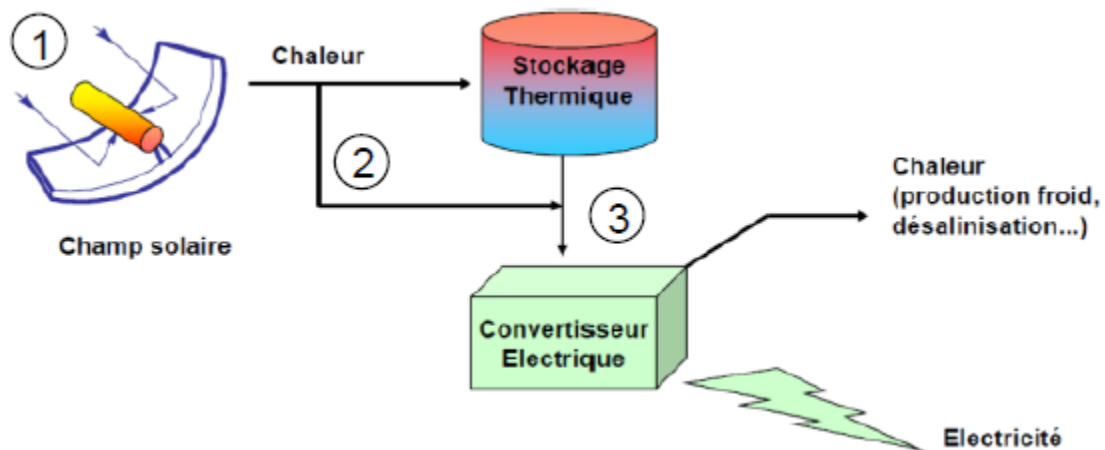


Figure V-6 fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique

1. Des miroirs captent le rayonnement solaire en un point de façon à générer des températures très élevées (de 400 à 1 000 °C).
2. La chaleur obtenue transforme de l'eau en vapeur d'eau dans une chaudière.
3. La vapeur sous pression fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur.

4. L'alternateur produit un courant électrique alternatif.

V.5.2. Les différents types de centrales thermodynamiques

Il existe plusieurs types de centrales, combinant différentes technologies.

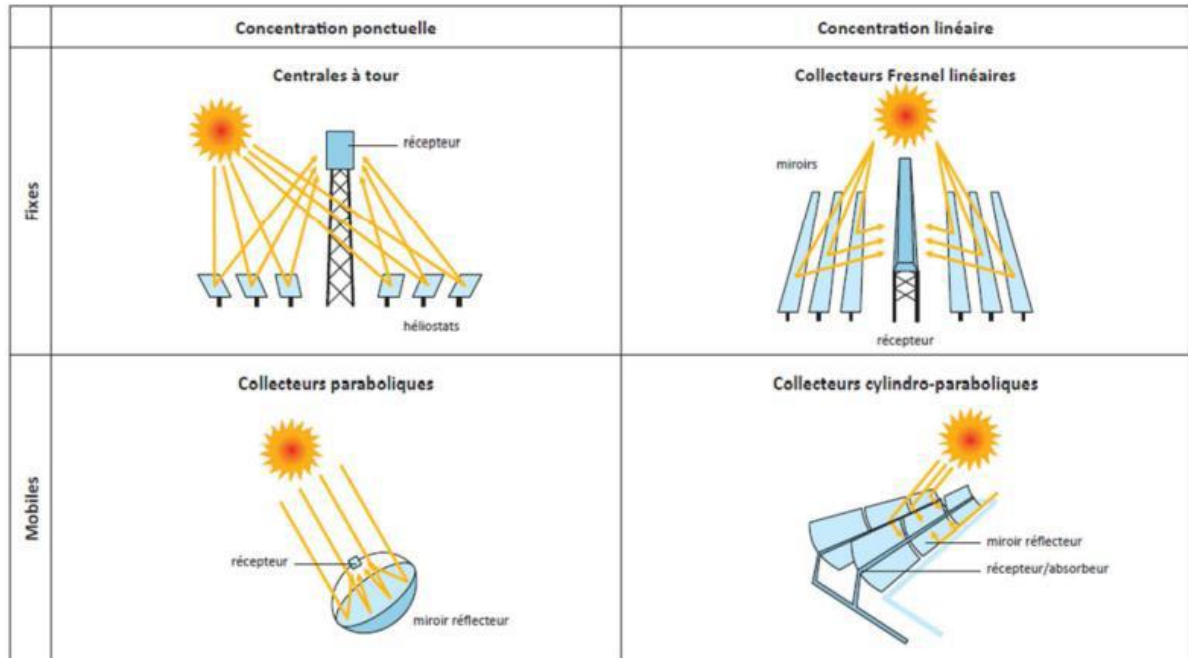


Figure V-7 Les quatre principales technologies de centrales solaires Thermodynamiques

V.5.2.1. Centrale solaire à tour

Un champ de miroirs orientables situés au sol renvoie les rayons solaires sur une chaudière située en haut d'une tour.



Plateforme solaire Abengoa, à Séville
(Espagne)



Récepteur à cavité d'une tour
solaire

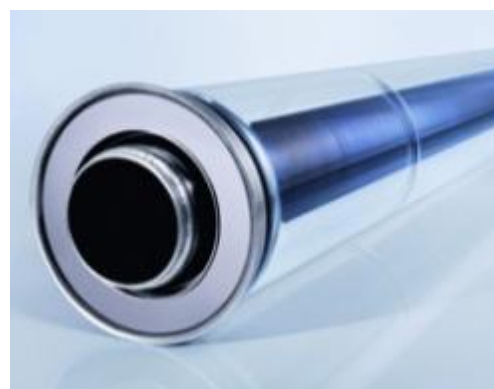
Puissance :	Grandes centrales
Température de fonctionnement :	300°C – 1000°C
Réflecteurs :	Héliostats (suivi 2 axes)
Récepteurs :	Central
Fluides caloporteurs :	Eau, sels fondus, air

V.5.2.2. Centrale solaire à collecteurs cylindro-paraboliques

Pour ce type, de longs miroirs tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons sont concentrés sur un tube dans le quel circule le fluide qui servira à transporter la chaleur vers la centrale.



Centrale solaire à collecteurs cylindro-paraboliques



Tube sous vide

Puissance :	Moyennes et grandes centrales
Température de fonctionnement	200°C – 500°C
Réflecteurs :	Parabolique (<i>suivi 1 axe</i>)
Récepteurs :	Linéaire mobile
Fluides caloporteurs :	Eau, sels fondus, huile, air

| PAGE 37

V.5.2.3. Centrale solaire à collecteur Fresnel

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques repose sur la mise en forme du verre pour obtenir sa forme parabolique. Une alternative possible consiste à approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans et de 1000 m de long. C'est le principe du concentrateur de Fresnel. Chacun des

miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube ou un ensemble de tubes récepteurs linéaires fixes.



Centrale solaire à collecteurs de Fresnel



Récepteur absorbeur

Puissance :	Moyennes et grandes centrales
Température de fonctionnement :	200°C – 450°C
Réflecteurs :	Linéaire (<i>suivi 1 axe</i>)
Récepteurs :	Linéaire fixe
Fluides caloporteurs :	Eau, sels fondus, huile

V.5.2.4. les centrales à collecteurs paraboliques

Le rayonnement solaire est concentré sur la focale de paraboles orientables dans les quelles se trouve des mini-centrales électriques.



Collecteur parabolique

Puissance :	Petites centrales
Température de fonctionnement :	300°C – 1000°C
Réflecteurs :	Parabole (<i>suivi 2 axes</i>)
Récepteur :	Central et mobile
Fluides caloporteurs :	Air

V.5.3. Le stockage de l'énergie thermique

-**Objectif** : ajuster la production à la consommation.

-**Principe** : stocker l'excédent d'énergie thermique du milieu de journée pour produire de l'électricité en fin de journée.

-**Le stockage de l'énergie thermique est efficace et peu coûteux.**



Figure V-8 Cuves de stockage thermique.

V.6. Centrale solaire photovoltaïque (L'énergie solaire photovoltaïque)

Les panneaux photovoltaïques permettent de convertir l'énergie solaire directement en électricité, cette conversion, appelée "effet photovoltaïque".

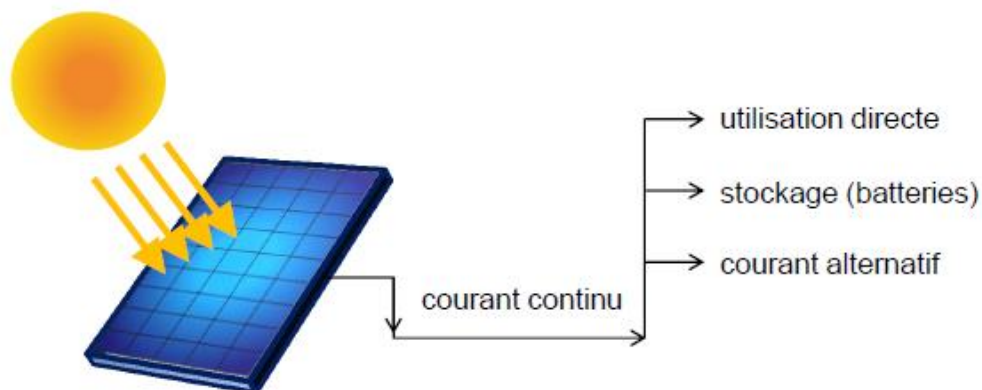


Figure V-9 Principe de l'énergie solaire photovoltaïque.

V.6.1. Le fonctionnement d'une centrale photovoltaïque

Une centrale photovoltaïque est un moyen de production d'électricité industriel qui permet de produire de l'électricité grâce à la lumière du soleil. Selon les étapes suivantes :

1. Le captage des rayons

Les panneaux solaires installés en rangées et reliés entre eux captent la lumière du soleil.

2. La production d'électricité

Sous l'effet de la lumière, le silicium, un matériau semi-conducteur contenu dans chaque cellule, libère des électrons pour créer un courant électrique continu. Le courant continu ainsi produit est récolté par un fil conducteur qui relie les cellules entre elles. Le courant produit par chaque panneau est alors regroupé progressivement, via des boîtes de jonction.

3. La transformation du courant

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

4. L'utilisation de l'électricité

L'électricité est consommée par les appareils électriques. Si l'installation n'est pas raccordée au réseau (site isolé), elle peut être stockée dans des batteries. Sinon, tout ou partie de la production peut être réinjectée dans le réseau.

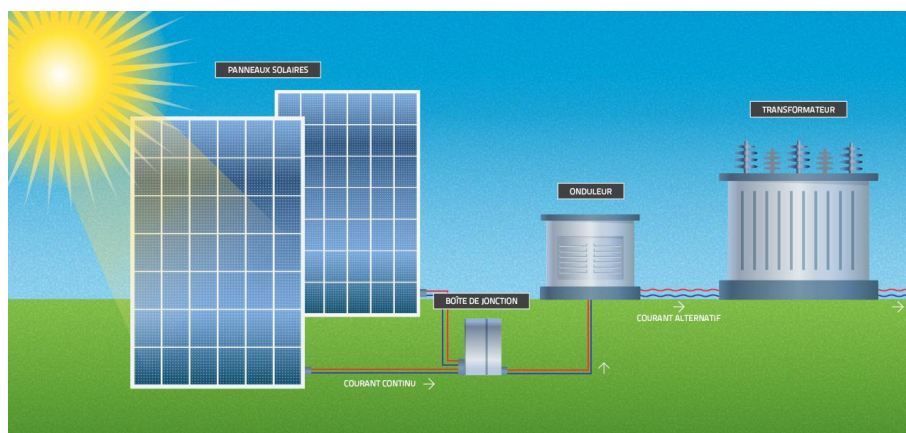


Figure V-9 Fonctionnement d'une centrale photovoltaïque

V.6.2. La cellule photovoltaïque

Dans un panneau solaire, chaque cellule photovoltaïque est composée de matériaux semi-conducteurs dits « photosensibles ». Ces matériaux, par exemple le silicium, ont la propriété de libérer leurs électrons lorsqu'ils sont frappés par des photons (composants de la lumière).

Dans la nature, les électrons libérés au sein des matériaux photosensibles se recombinent immédiatement, donc aucun courant électrique n'est généré. La particularité d'une cellule photovoltaïque est d'arriver à forcer le déplacement des électrons libérés dans une direction donnée pour créer un courant électrique.

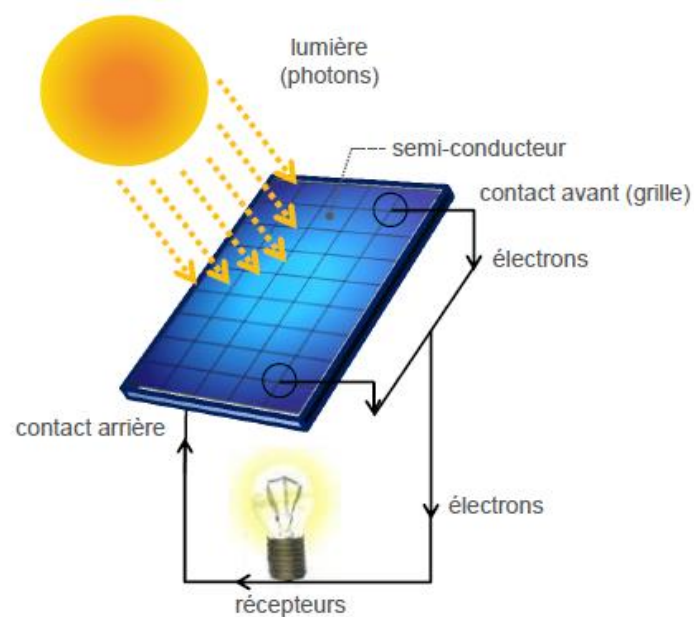


Figure V-10 L'« effet photovoltaïque »

➤ **Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque**

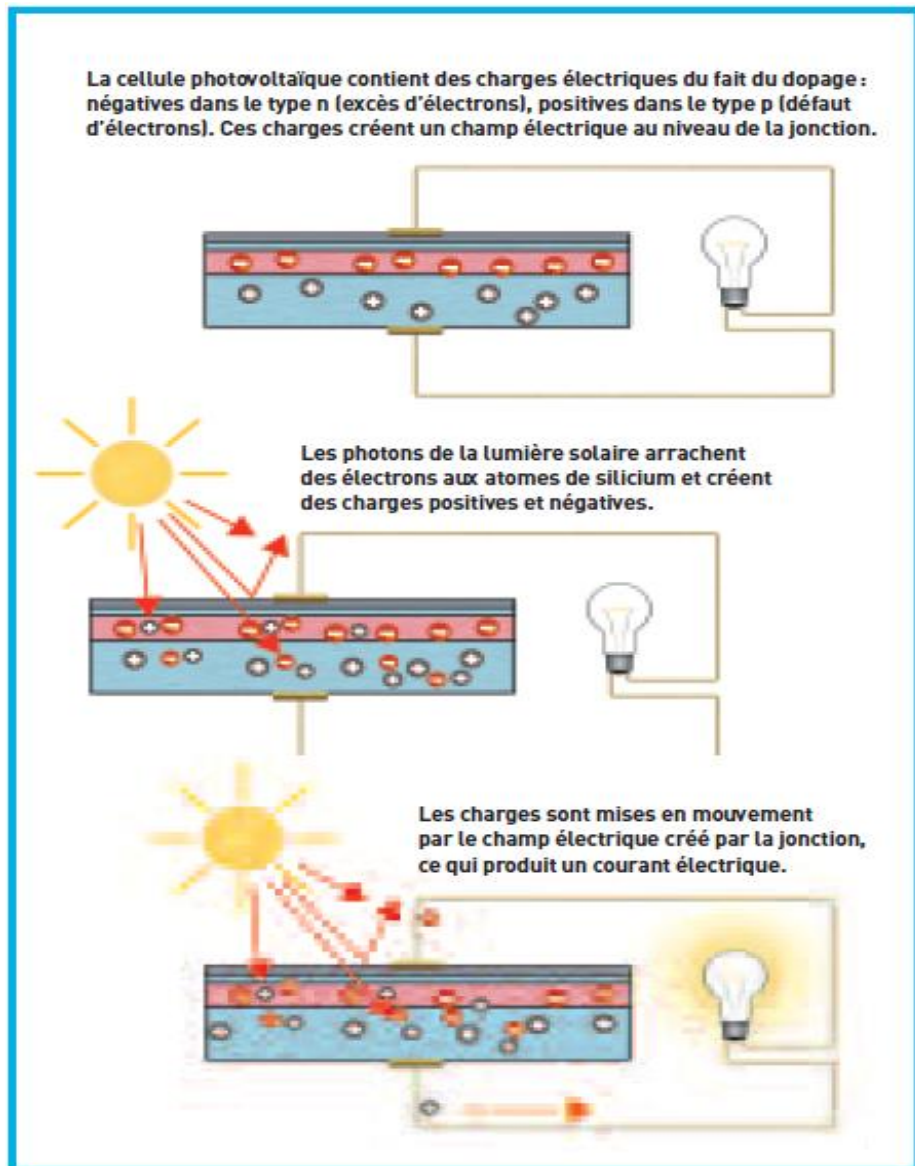


Figure V-11 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

V.6.3. Les types d'installations photovoltaïques et leurs applications

Actuellement, un tiers de la population mondiale n'a pas accès à l'électricité, or le soleil est partout. C'est pourquoi cette technique constitue une solution pour des applications peu consommatrices d'énergie : citons quelques exemples, dans les régions rurales, pour l'éclairage, pour alimenter les pompes à eau, les réfrigérateurs, les téléviseurs, etc. On distingue deux marchés en croissance rapide:

Les installations photovoltaïques, selon les besoins, peuvent se décliner sous plusieurs formes :

1. pour une production locale d'électricité (les applications autonomes) : où l'énergie est produite, stockée et utilisée en un lieu unique.

Installations résidentielles



bâtiments industriels et commerciaux



Panneaux photovoltaïques en toiture de maison

Panneaux photovoltaïques en toiture d'entrepôt

2. pour une production centralisée (toit photovoltaïque)

La seconde application, avec connexion au réseau, consiste à intégrer des modules photovoltaïques dans les toits et façades de bâtiments et maisons, produisant de l'électricité qui sera soit consommée sur place soit injectée dans le réseau.

Les centrales solaires



Au-delà du secteur du bâtiment, les technologies photovoltaïques peuvent être utilisées dans d'autres secteurs : le transport



*Parking solaire pour véhicules
Electriques*



L'avion Solar Impulse

La première application, la plus répandue jusqu'en 1990, est apparue dans le domaine spatial pour les satellites puis les télécommunications, le balisage maritime et aérien, les bornes d'arrêt d'urgence, l'éclairage domestique, l'audiovisuel et le pompage de l'eau. Mais comme le Soleil n'est pas présent 24 heures sur 24, cette application nécessite l'utilisation de batteries qui assurent le stockage de l'énergie en vue d'une consommation hors période d'ensoleillement.

V.7. Potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh. Sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh /m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays.

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau selon l'ensoleillement reçu annuellement [13].

Tableau V-1-Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500

Energie moyenne reçue	1700	1900	2650
(KWh/m2/an)			

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 169.000TWh / an pour le solaire thermique, 13,9TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10grands gisements de gaz naturel qu'auraient été découverts à Hassi R'Mel.

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

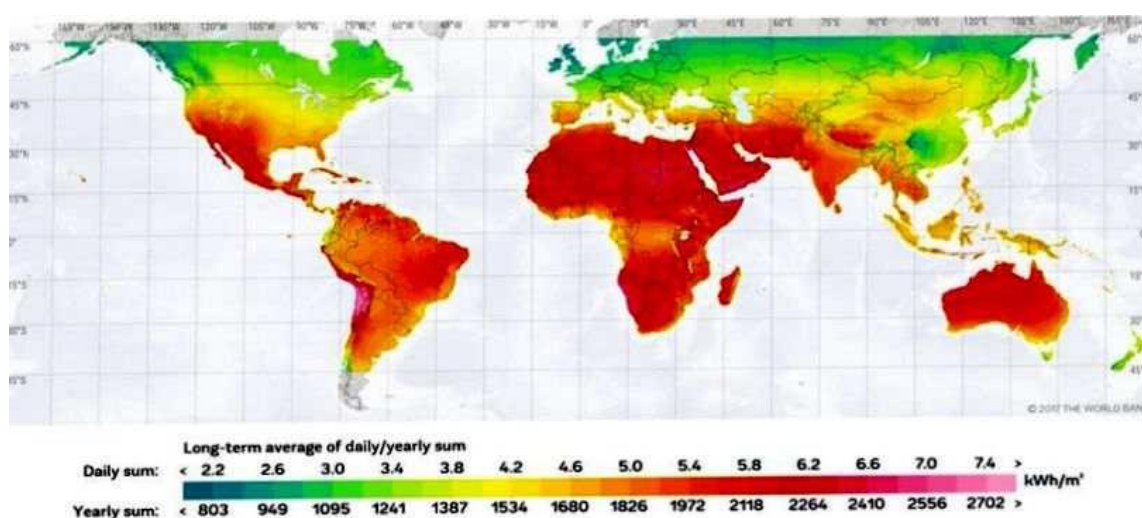


Figure V-11 Modélisation de l'inégale répartition de l'énergie solaire dans le monde.

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'office national de la météorologie (O N M) réparties sur tout le territoire algérien [14]. Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage. La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre [15]

V.8. Le solaire photovoltaïque en chiffres

Parmi les Énergies Renouvelables, le solaire occupe encore une place minime mais connaît une très forte progression depuis quelques années.

En 2013, le solaire a représenté 2,84 % de la production mondiale d'électricité d'origine renouvelable.

V.8.1. Les principaux producteurs

Bien que le soleil soit un élément à la portée de la majorité des pays de la planète, l'énergie solaire est surtout développée dans les pays industrialisés. L'Allemagne est de loin le 1^{er} producteur mondial.

Par pays, en TWh, en 2013 (International Energy Agency Statistics)		
Allemagne	31,0	21,5 %
Italie	21,6	14,9 %
États-Unis	15,7	10,8 %
Chine	15,5	10,7 %
Japon	14,3	9,9 %
Espagne	12,7	8,8 %
France	4,7	3,2 %
Australie	3,8	2,6 %
Grèce	3,6	2,5 %
Inde	3,4	2,4 %

Par zone géographique en TWh, en 2013 (International Energy Agency Statistics)	
Europe	59,4 %
Asie et Océanie (1)	28,4 %
Amérique du Nord	11,2 %
Eurasie (2)	0,4 %
Afrique	0,4 %
Amérique Centre et Sud	0,3 %
(1) dont Moyen-Orient	
(2) Arménie, Azerbaïdjan, Biélorussie, Géorgie, Kazakhstan, Kirghizstan, Moldavie, Ouzbékistan, Russie, Tadjikistan, Turkménistan et Ukraine	

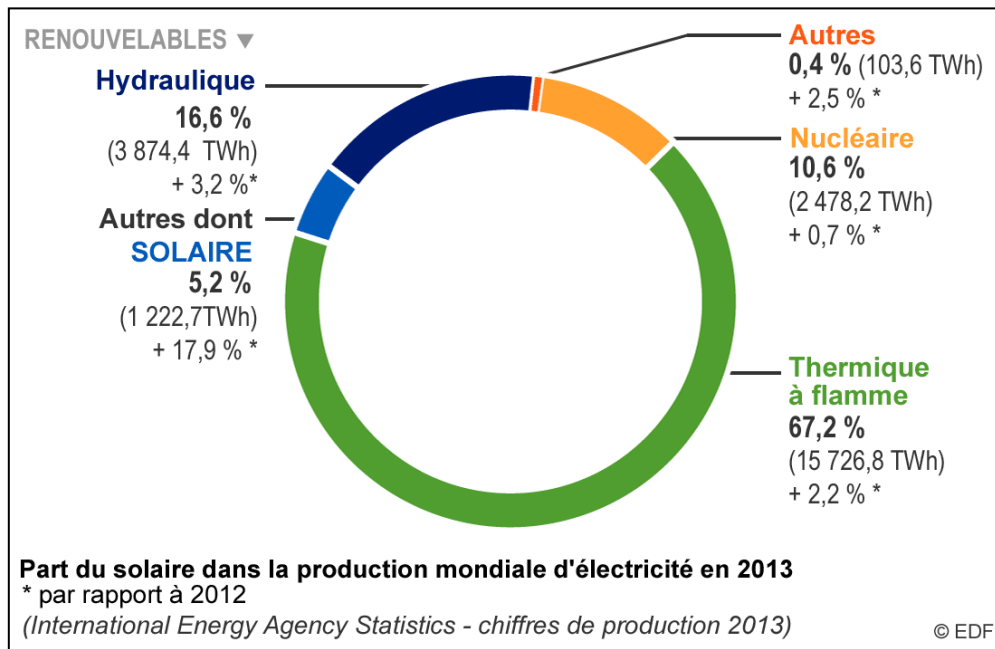
Principaux producteurs d'électricité solaire dans le monde par pays en 2013



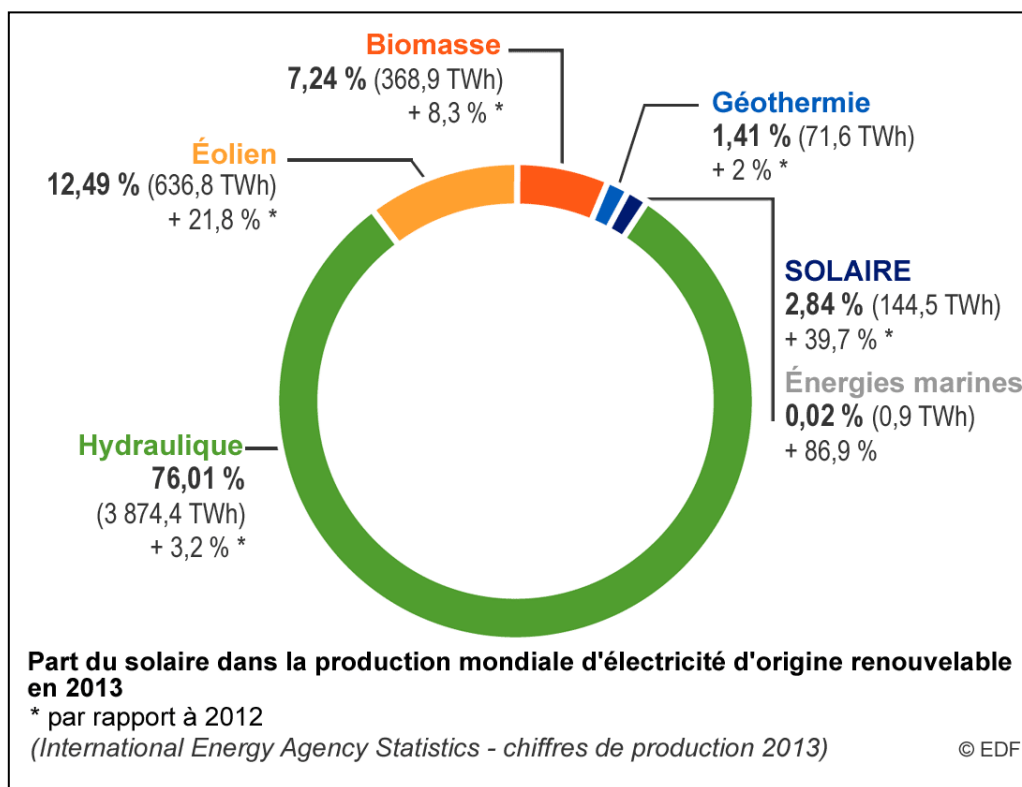
Principaux producteurs d'électricité solaire dans le monde par zone géographique en 2013



V.8.2. Le solaire dans la production d'électricité mondiale



La production mondiale d'électricité en 2013 a représenté un total de 23 405,7 TWh dont la majeure partie est issue du thermique à flamme essentiellement du fait du développement industriel de pays tels que la Chine qui dispose de grandes réserves de charbon. Les autres énergies renouvelables, dans lesquelles se trouve le solaire, représentent une faible partie de la production d'électricité.



Parmi les Energies Renouvelables, la part de l'énergie solaire demeure encore assez faible même si elle a progressé de près de 10% en 1 an.

Chapitre VI : L'énergie éolienne

VI.1. Introduction

L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie. Cette énergie propre et renouvelable existe depuis toujours. La technologie des aéromoteurs (où capteurs éoliens) a connu une évolution fulgurante surtout ces dernières décennies. Notamment dans le domaine

de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent et leurs structures sont de plus en plus performantes. Ainsi dans ce qui suit nous allons énoncer une étude sur l'énergie et les centrales éoliennes.

VI.2. Définition

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des Vents.



Figure VI.1: Parc éolien Danemark.

VI.3. Types des turbines éoliennes

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui diffèrent essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéro-turbine. En effet, selon sa position par rapport au sol on obtient.

- Éolienne à axe verticale
- Éolienne à axe horizontale

VI.3.1. Eolienne à axe verticale

Ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connu. Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité, paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Les éoliennes à axe vertical ressemblent un peu aux roues hydrauliques classiques qui sont construites de façon à laisser

arriver l'eau perpendiculairement à l'axe de rotation de la roue. En fait, certaines éoliennes à axe vertical pourraient également fonctionner avec un axe horizontal, mais il est peu probable qu'elles soient aussi efficaces qu'une éolienne munie d'un rotor du type hélice.

Il existe trois structures de ce type d'éoliennes : les rotors Savonius, les rotors Darrieus et la structure en H. Elles présentent comme avantages : l'absence de la tour (la génératrice, le multiplicateur, etc., sont placés à terre) ; pas de mécanisme d'orientation pour diriger le rotor dans la direction du vent. Leurs inconvénients principaux sont : la vitesse du vent est très faible à proximité de la surface du sol, faible rendement aérodynamique, elles nécessitent un dispositif de démarrage ; enfin, la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour des puissances élevées.



Figure VI.2 Éolienne à axe vertical.

VI.3.2. Eolienne à axe horizontal

Aujourd'hui, la plus grande partie des éoliennes commerciales sont à axe horizontal. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Elles sont construites avec un rotor du type hélice, monté sur un axe horizontal. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3.



FigureVI-3 Eolienne à axe horizontal.

VI.4. Composants d'une éolienne à axe horizontal

Une éolienne est généralement composée de :

- ❖ Le mât : Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique qui supporte le rotor de la turbine. Il est important qu'il soit assez élevé (40 à 60 m de hauteur pour une éolienne de 500 kW). Il permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal), ou à une hauteur où le vent souffle de façon plus forte et plus régulière qu'au niveau du sol. Le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.). Les mâts sont généralement en acier, mais des mâts de béton sont de plus en plus utilisés par certains producteurs.

- ❖ Les pales : Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

- ❖ La nacelle : Elle rassemble tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une

machine synchrone ou asynchrone. La nacelle peut tourner pour orienter la machine dans la bonne direction.

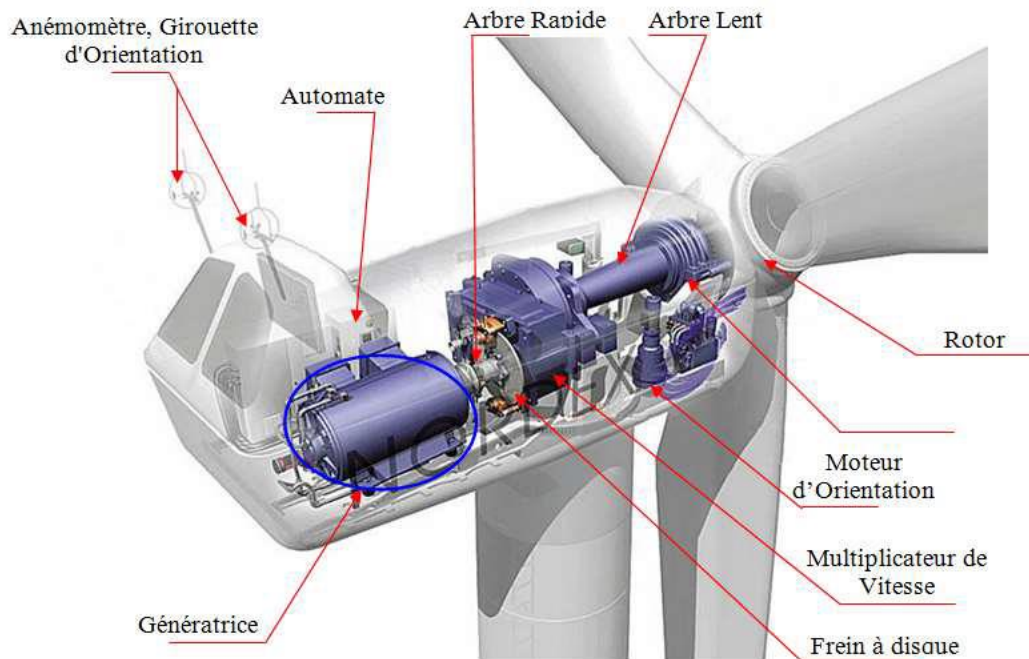


Figure VI-4 Composition d'une éolienne à axe horizontal.

VI.5. Classification des éoliennes à axe horizontal

En général, on les classe en deux types : "sous le vent" et "face au vent" :

VI.5.1. Eolienne sous le vent

Ce sont les plus simples car ici le positionnement du rotor est naturel et automatique en fonction de la direction du vent. Le rotor se situe derrière le pylône. Un grand avantage de ce montage réside dans le fait que les pales du rotor peuvent être flexibles, ce qui allège donc leur construction et diminue aussi la taille du pylône.

VI.5.2. Eolienne face au vent

Ce sont les plus répandues. Le rotor est orienté dans la direction du vent en amont et n'est pas perturbé par le pylône.

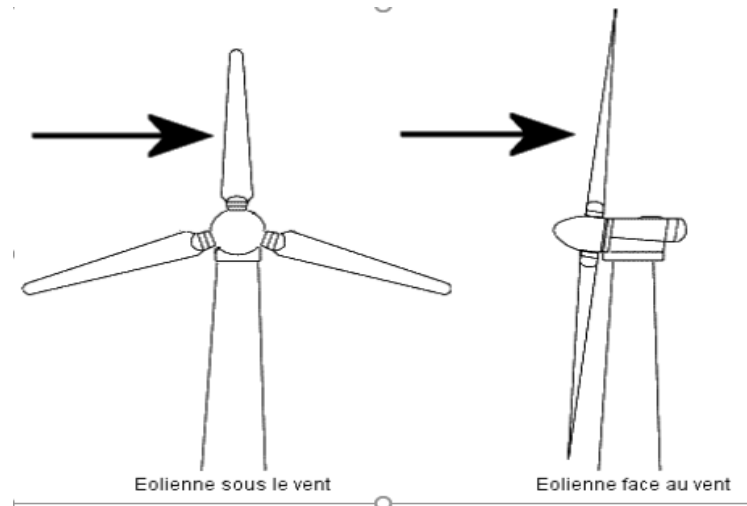


Figure VI-5 L'éolienne et la direction du vent.

VI.6. Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne

- On distingue deux types de modes d'exploitation de l'énergie éolienne :
 - Les éoliennes terrestres dites « onshore » sont installées sur la terre.
 - Les éoliennes dites « offshore » sont installées en mer.
- On distingue par ailleurs deux typologies d'installations :
 - Industrielles : les grands parcs éoliens (ou « fermes éoliennes ») raccordés au réseau électrique.
 - Domestiques : des petites éoliennes installées chez les particuliers.

VI.6.1. Eoliennes Onshore

Une éolienne terrestre, ou onshore est par définition installée sur la terre ferme et se distingue des éoliennes offshore installées en mer, elle permet de convertir dans un premier temps l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, cette conversion est proche de celui d'une dynamo alimentant les feux d'un vélo. Dans le cadre du petit éolien, les éoliennes terrestres sont de plus petite taille et peuvent répondre aux besoins de particuliers ou petits producteurs agricole, leur puissance varie entre 0,1 et 36 KW. Ces éoliennes peuvent alimenter des bâtiments isolés non reliés au réseau électrique ou bien être raccordées au réseau afin de vendre la production électrique. En citant l'exemple du plus grand parc éolien en Allemagne : Eoliennes Enercon avec une capacité de production atteint 26000 MW en 2011.



Figure VI-6 Eolienne onshore.

VI.6.2. Eoliennes Offshore

VI.6.2.1. Définition

Le « offshore » consiste à implanter les aérogénérateurs en mer, à proximité des côtes. Ainsi, l'impact sur le paysage est modéré et il n'y a plus de nuisance sonore. Cependant, l'installation d'éoliennes en mer est beaucoup plus coûteuse qu'à terre : les mâts doivent être étudiés pour résister à la force des vagues et du courant, la protection contre la corrosion (particulièrement importante du fait des embruns) doit être renforcée, l'implantation en mer nécessite des engins spécialisés, le raccordement électrique implique des câbles sous-marins coûteux et fragiles, et la moindre opération de maintenance peut nécessiter de gros moyens. En revanche, les éoliennes « offshore » bénéficient d'un vent plus fort et plus régulier. Leur puissance nominale est donc plus importante ainsi que leurs rendements. Les parcs éoliens en mer permettent de bénéficier de meilleures conditions de vent et d'un espace sans obstacle. L'installation et l'entretien sont toutefois plus complexes et coûteux, il s'agit donc d'un projet ambitieux dotés d'éoliennes plus grandes et puissantes que leurs cousines terrestres.

VI.6.2.2. Les caractéristiques de l'éolien « Offshore »

- Puissance : peut dépasser 5 MW
- Dimensions :
 - _ Les pales : jusqu'à 115m de diamètre
 - _ Le mât : jusqu'à 120m de hauteur



Figure VI-7 Eolienne offshore.

VI.7. Chaîne de conversion de l'énergie éolienne

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, on retrouve dans les différentes configurations les mêmes éléments de base à savoir :

- Une turbine qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique.
- Une transmission mécanique.
- Une génératrice.
- Un système de liaison électrique.

Selon l'utilisation de l'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développées, on distingue deux grandes familles d'éoliennes:

- Les éoliennes raccordées au réseau.
- Les éoliennes autonomes.

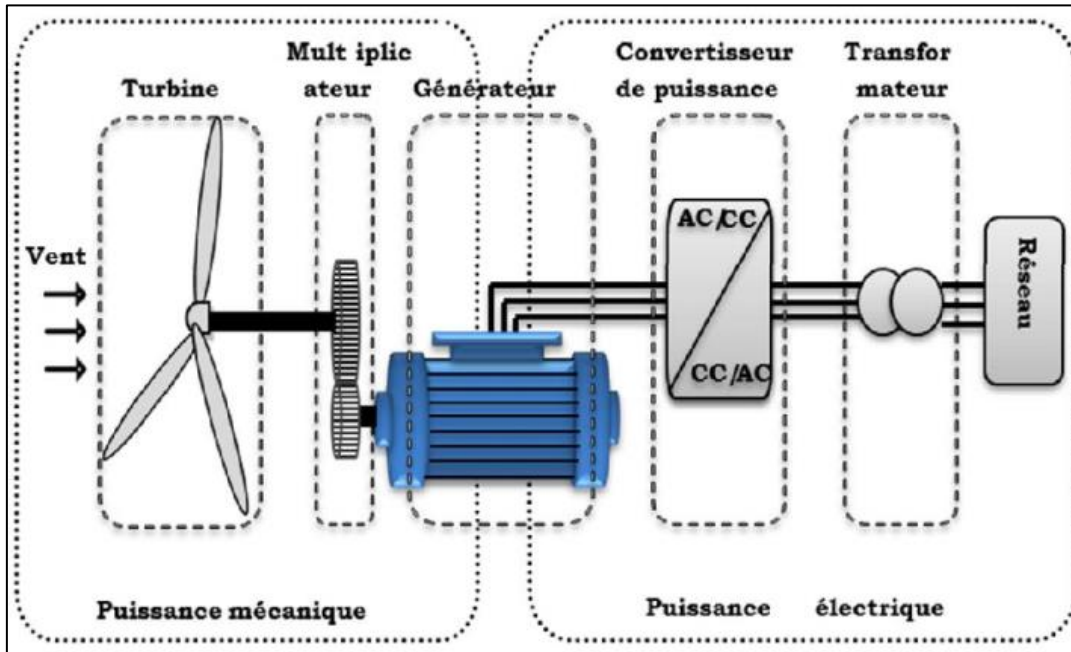


Figure VI-8 Conversion de puissance.

VI.8. Principe de conversion de l'énergie éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit de l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/mn pour une machine à 2 parties de pôles. Des convertisseurs électroniques de vitesse nécessaires au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent [10]. La tension de l'électricité produite par le générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mat. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public.

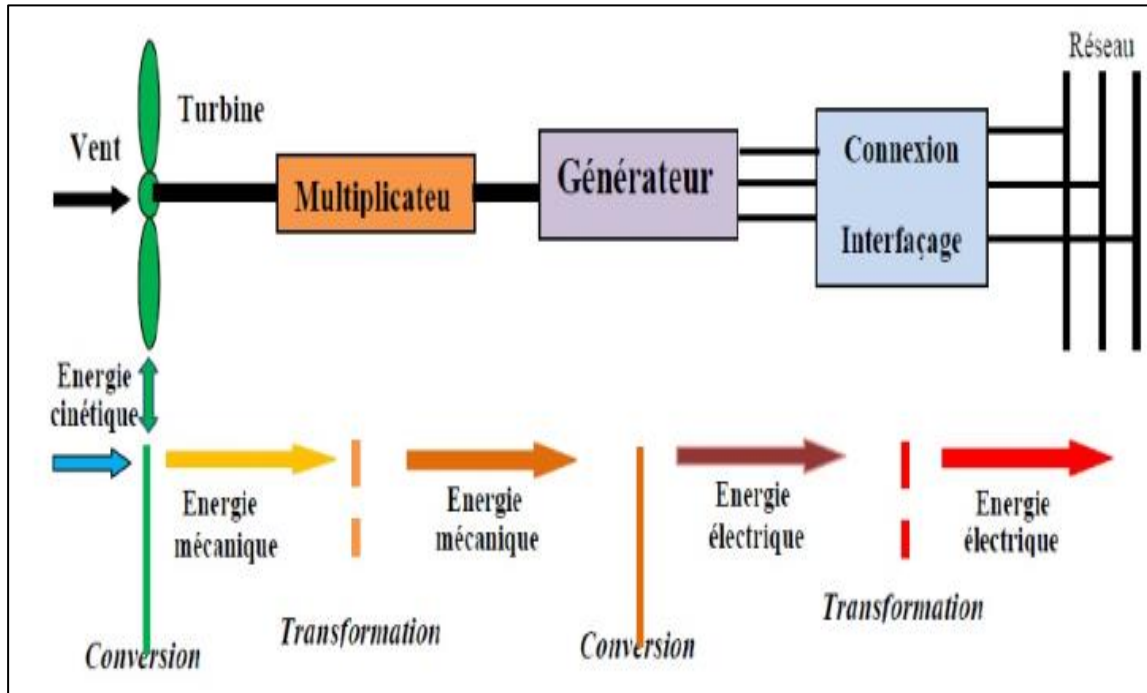


Figure VI-9 Principe de conversion d'énergie mécanique électrique.

VI.9. La centrale hybride photovoltaïque-éolienne

On appelle « éolienne hybride » une éolienne domestique couplée à des capteurs solaires photovoltaïques, disposés sur le mat de l'éolienne ou, plus classiquement, sur une toiture. L'éolienne en elle-même n'a pas de caractéristique particulière. En revanche l'aspect « hybride » se trouve dans l'installation électrique, qui peut être alimentée par :

- L'éolienne ;
- Les panneaux solaires ;
- Les deux à la fois ;
- Ou aucun des deux (s'il n'y a ni vent, ni soleil).



Figure VI-10 Centrale hybride photovoltaïque-éolienne.

VI.9.1. Usage d'une éolienne hybride

Comme on l'a mentionné plus haut, l'éolienne hybride se base sur la cogénération énergétique : vent et soleil.

Si vous êtes situé en site isolé (trop éloigné du réseau électrique pour pouvoir être raccordé), il est nécessaire de pouvoir stocker l'électricité produite par l'éolienne et les capteurs photovoltaïques pour en disposer en l'absence de vent et de soleil. Pour ce faire, on utilise des batteries à décharge lente, c.-à-d. l'éolienne hybride permet grâce au concours de panneaux solaires, d'alimenter un nombre plus élevé d'appareils, par rapport à une petite éolienne classique ou des panneaux solaires portables, ainsi, durant la journée la production électrique pourrait être assurée par les panneaux solaires, tandis que la nuit, l'éolienne prendrait le relais.

Le système hybride éolienne /solaire est également très répandu dans le milieu nautique (éolienne pour bateaux + panneaux solaires pour bateaux).

La consommation totale des différents appareils électriques utilisés doit être inférieure à la production moyenne totale de l'éolienne hybride (éolienne + solaire).

Si vous êtes situé en proximité, l'électricité produite sera alors consommée en direct.

VI.9.2. Principaux composants du Système d'énergie hybride photovoltaïque -éolien

Les systèmes hybrides photovoltaïque-éolien comprennent généralement :

- Un système générateur ;
- Un système de régulation ;
- Un système de stockage ;
- Des équipements de puissance ;
- Une charge.

Le système générateur est composé par les modules photovoltaïques et les aérogénérateurs. Il est indispensable que les deux fonctionnent à la même tension nominale 12 ou 24 V et en courant continu.

La régulation doit tenir compte du fait qu'il s'agit de deux courants de nature différents :

→Le photovoltaïque assez constant et d'un seuil bas

→L'éolien, très variable.

Le système de régulation se chargera donc de faire fonctionner le système générateur en un point optimal pour la charge des batteries.

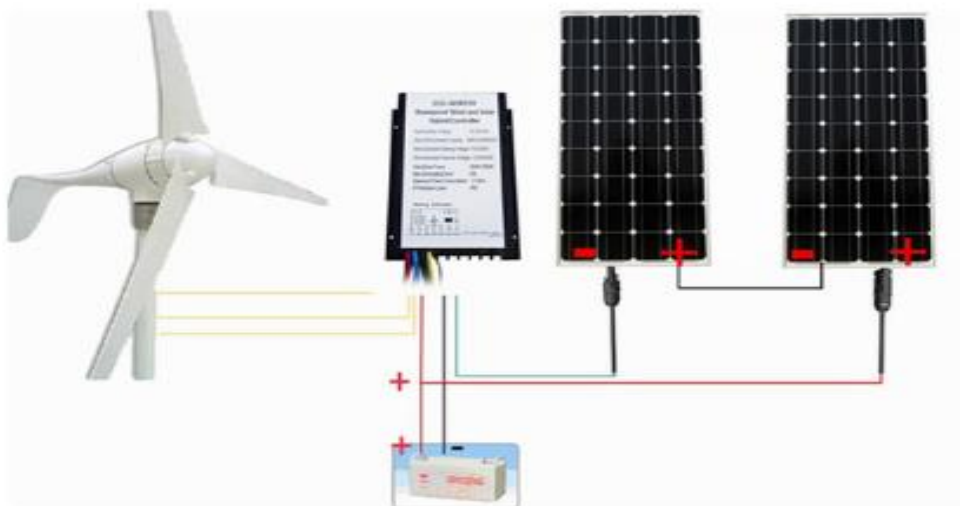


Figure VI-11 Composants d'une centrale hybride.

VI.9.2.1. Schéma équivalent d'un système hybride photovoltaïque éolien

Ce système est caractérisé par deux sources énergétiques (photovoltaïque et éolienne), le générateur photovoltaïque (PV) est connecté à la charge par un convertisseur DC/DC commandé en MPPT(Maximal Power Point Tracking) et la turbine éolienne (WT) entraîne un générateur à aimants permanents (GSAP) qui lui-même est connecté à la charge par un convertisseur AC/DC commandé. Le couplage des deux systèmes est fait par l'intermédiaire d'un bus continu.

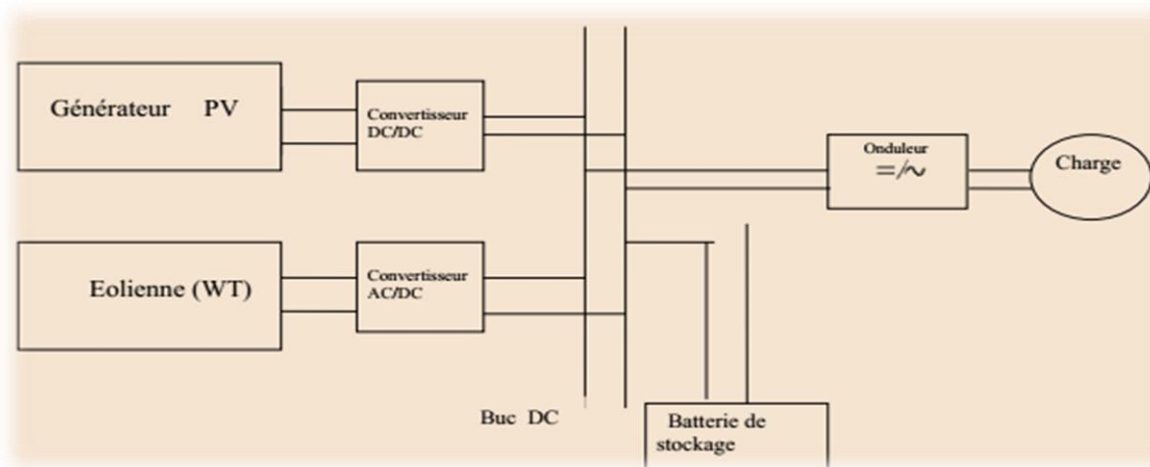


Figure VI-12 Schéma équivalent d'un système hybride photovoltaïque-éolien.

VI.9.3. Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque-éolien

VI.9.3.1. Générateurs photovoltaïques

Un générateur photovoltaïque est constitué à la base par des cellules photovoltaïques. Elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire. Elles ne polluent pas, n'ont aucune pièce mobile, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne produisent aucun bruit. La cellule photovoltaïque est donc un moyen sûr et écologique de produire de l'énergie.

➤ **Modèle d'une cellule solaire photovoltaïque :** Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et R_{sh} (voir la figure suivante).

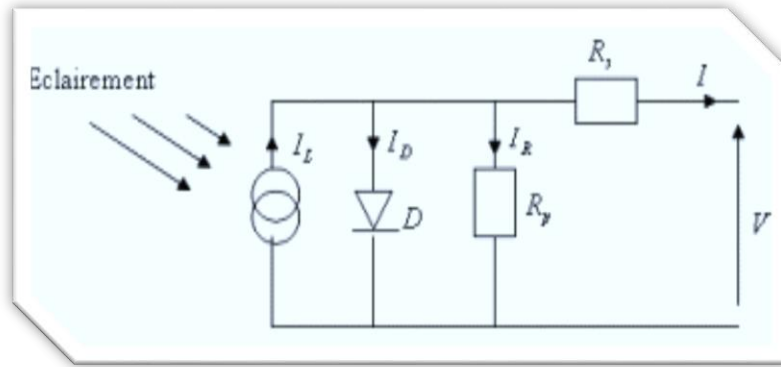


Figure VI-13 Cellule photovoltaïque.

La cellule comporte une résistance série R_s et une résistance en dérivation ou Shunt R_p . La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule.

VI.9.3.2. Générateurs éoliens

✓ Définition :

Un système éolien ou un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique.

La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal. La part de marché représentée par les systèmes à axe vertical est minuscule.

Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines. Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire.

✓ Types d'aérogénérateur dans les systèmes éoliens

La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique peut être identifiée selon le générateur électrique utilisé :

✓ **Générateur asynchrone**

C'est une machine à induction asynchrone qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique. Pour réaliser la génération de l'énergie électrique la machine doit être entraînée au-delà de la vitesse de synchronisme (variable suivant la charge) le cas d'une génératrice à cage d'écureuil. Son rotor peut être à cage d'écureuil ou bobinée. La puissance nécessaire à sa magnétisation est fournie par le réseau lorsqu'elle est couplée en parallèle ou par une batterie de condensateurs dans le cas d'une utilisation isolée. Pour les petites puissances, le rotor est à cage d'écureuil, pour des puissances plus importantes, le rotor est bobiné, relié à l'extérieur via un collecteur simplifié à trois bagues, et court-circuité en fonctionnement normal. Mais on peut aussi modifier les propriétés électromécaniques du générateur en agissant sur le rotor par ces connexions « Machine Asynchrone Double Alimentée MADA ».

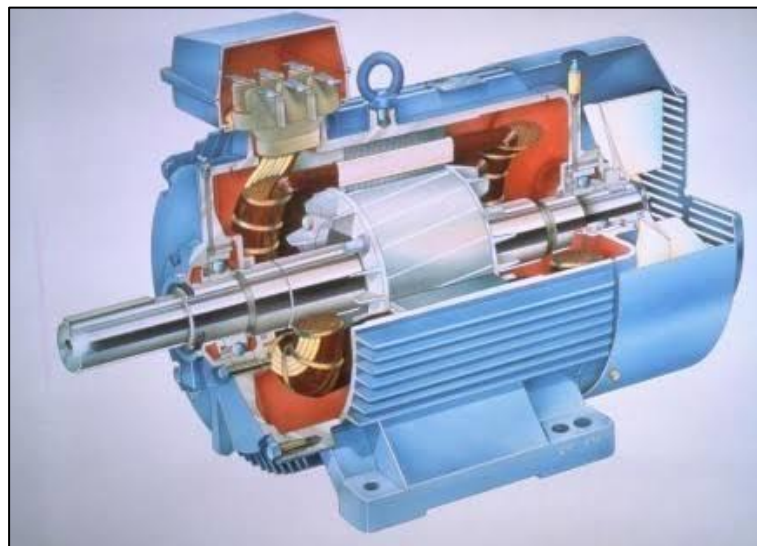


Figure VI-14 Machine asynchrone.

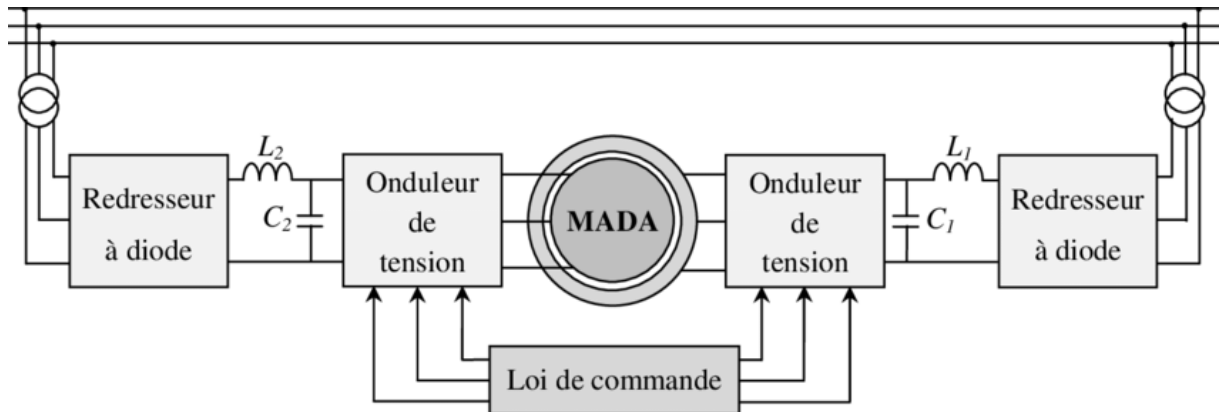


Figure VI-15 Fonctionnement machine asynchrone double alimentation.

✓ Générateur synchrone

La génératrice synchrone (ou alternateur) n'a pas besoin de magnétisation extérieure pour créer son champ magnétique. Celui-ci est créé par des bobines ou par des aimants permanents, placés sur le rotor tournant induisant un courant dans le stator bobiné. Cette génératrice étant indépendante du réseau, elle fournit une fréquence variable en fonction de la vitesse de rotation, donc de la vitesse du vent.

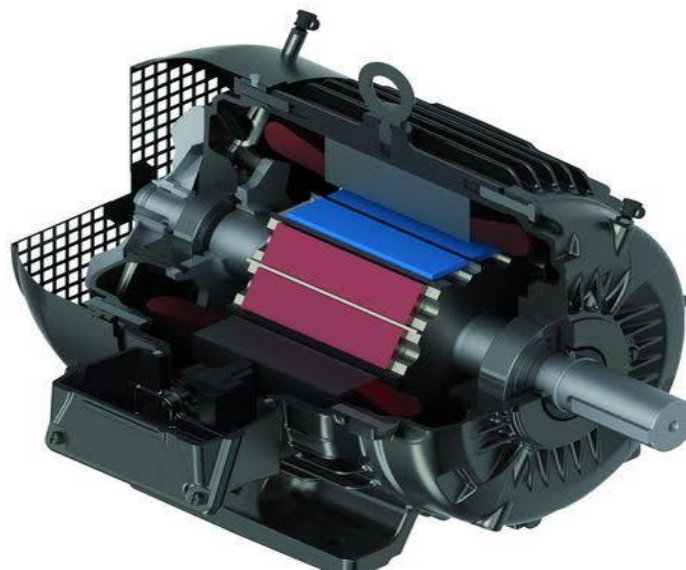


Figure VI-16 Machine synchrone.

✓ Génératrice électrique à courant continu

La génératrice à courant continu (à excitation séparée) est une machine tournante qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique apparaissant sous forme de tension et courant continu. Elle comporte deux circuits bobinés : (voir la figure ci-dessous)

1. l'un est un circuit inducteur, porté par le stator, et il crée un champ de direction fixe sous les pôles de la machine ; il est pour cela appelé « circuit de champ » ou encore « Circuit d'excitation ».
2. Et l'autre est un circuit induit ou circuit d'armature, porté par l'armature du rotor ; il crée des forces électromotrices induites 'F.E.M'.

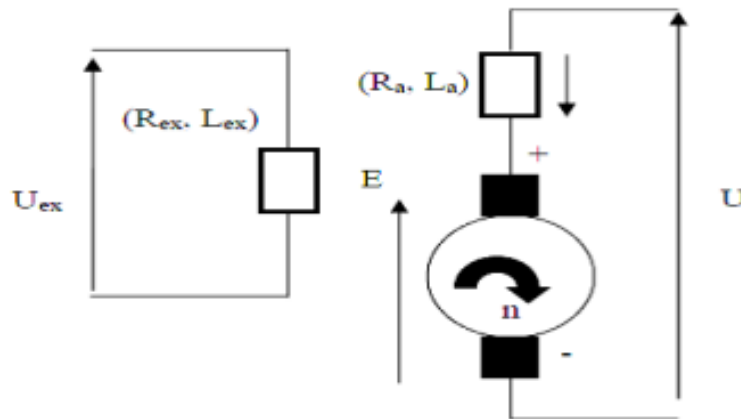


Figure VI-17 Schéma équivalent d'une machine à courant continu.

✓ Générateur à structures spéciales

Des machines à structures spéciales avec un principe de fonctionnement spécial aussi. Le but de leurs fabrications est la réponse au besoin actuelle, mentionnant par exemple : la machine à réluctance variable, la Machine Asynchrone Double Stator, ...etc.

VI.9.3.3. Différentes classes d'un système éolien

On peut classer les systèmes éoliens à axe horizontal en deux différentes classes :

VI.9.3.3.1. Système éolien à vitesse fixe

Ce sont des systèmes qui fonctionnent pour des vitesses fixes et bien déterminées afin de produire de l'électricité selon les normes. Cette vitesse est définie selon le générateur électrique utilisé. Ce genre de système est destiné à travailler pour des vitesses égales à la vitesse nominale et cela si on admet que la vitesse nominale est celle qui donne au générateur électrique la possibilité de générer une puissance électrique à 50Hz.

VI.9.3.3.2. Système éolien à vitesse variable

Ce sont des systèmes aptes à travailler pour des vitesses égales ou différentes des vitesses nominales. Pour cela plusieurs technologies sont mises en service afin d'assurer ce fonctionnement :

- ❖ **Technique mécanique** : C'est une technique qui utilise les paramètres aérodynamiques de la turbine comme outil de variation de la vitesse, et dans ce sens-là on distingue deux modes: le « stall control » (basé sur l'accrochage et le décrochage de la génératrice à la turbine), robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance chute plus vite : il s'agit donc d'une solution passive, et le « pitch control » (basé sur l'abaissement et l'augmentation de l'angle de calage des pales, qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante). Il faut noter que cette technique n'est fonctionnelle que pour des vitesses égales ou supérieures à la vitesse nominale.
- ❖ **Technique électrique** : C'est une technique qui utilise les convertisseurs statiques comme outil de variation de la vitesse.
- ❖ **Technique hybride** : C'est une technique qui utilise les deux techniques précédentes à la fois afin d'améliorer le rendement de production et de sécurité du système.

VI.9.4. Systèmes de stockage

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides afin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec des systèmes connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme. Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb-acide. Les batteries nickel-cadmium sont rarement utilisées.

VI.9.5. Convertisseurs

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs. Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir

d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement. Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.



Figure VI-18 Exemple d'un convertisseur transformateur.

VI.9.6. La charge

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eaux etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

Chapitre VII : Le groupe électrogène

VII.1. Introduction

Dans la société actuelle, toutes les activités, qu'elles soient professionnelles ou privées, sont consommatrices d'énergie électrique. Toute interruption ou perturbation dans la distribution de cette énergie entraîne des désordres qui peuvent devenir insupportables par l'utilisateur. L'importance de la continuité et de la qualité de l'alimentation électrique est fonction de l'activité concernée. Certaines applications exigent une permanence quasi complète de l'alimentation car une absence met en péril la sécurité des personnes ou des biens. En tête de ces consommateurs viennent bien évidemment l'activité hospitalière, les sites recevant du public et les installations de protection contre l'incendie. Le législateur s'est préoccupé de ce problème et tout site de cette nature doit être équipé de moyens d'alimentation de secours en énergie électrique. D'autres consommateurs, pour lesquels la fiabilité de l'alimentation électrique ne se mesure pas en termes de risques humains, ne peuvent admettre toutefois de coupure car celle-ci peut avoir des conséquences extrêmement préjudiciables sur le plan économique. Les activités mettant en jeu des systèmes informatiques sont un exemple évident de ce type d'exigence puisqu'elles ne peuvent admettre la moindre coupure de quelque durée que ce soit.

Divers moyens de secours ont donc été envisagés et mis en œuvre ; le choix de la source de remplacement utilisée est fonction de plusieurs critères :

- le temps de coupure maximal admissible,
- la nature de la charge à réalimenter,
- la puissance de la charge à secourir

VII.2. Définition

Un groupe électrogène fait référence à un équipement dont la fonction est de convertir la capacité thermique en énergie mécanique, puis en énergie électrique il est un dispositif autonome capable de produire de l'électricité. La plupart des groupes sont constitués d'un moteur thermique qui actionne un alternateur. Leur taille et leur poids peuvent varier de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes. La puissance d'un groupe électrogène s'exprime en VA (voltampère), kVA (kilovoltampère) ou MVA (mégavoltampère) selon la

puissance. Les unités les plus puissantes sont mues par des turbines à gaz ou de gros moteurs Diesel.



Figure VII-1 Groupe électrogène.

VII.3. Composants d'un groupe électrogène

La production d'électricité par un groupe électrogènes doit être autonome et ne nécessiter qu'un approvisionnement en carburant loin de toute source d'énergie. Il est composé de :

- **Alternateur** : pour choisir un alternateur, vous devez d'abord définir votre objectif et les conditions de travail, ils peuvent être couplés à plusieurs moteurs, selon les besoins.
- **Moteur** : c'est un composant de base des groupes électrogènes et est conçu dans le but de contribuer à l'amélioration de la productivité et de la performance.
- **Capotage** : c'est une tôle qui peut être en acier, en acier inoxydable ou en aluminium, avec traitement anticorrosion et qui assure l'efficacité du flux d'air qui va refroidir le moteur ;
- **Tableau de transfert de charge** : responsable de l'alternance entre la source principale et la source auxiliaire, en cas de défaillance de la source, assurant ainsi la fourniture continue d'énergie ;
- **Panneau de contrôle** : considéré comme le «cerveau» d'un groupe électrogène il surveille et protège les groupes électrogènes.
- **Châssis** : Il s'agit d'un châssis en acier avec système anti-vibration qui a un réservoir pour stocker le carburant, et peut ou non servir à élever le groupe électrogènes à une

certaine hauteur, en fonction du nombre de litres que le client souhaite dans le réservoir.

L'usage du groupe électrogène repose sur une alimentation de secours. Ils comportent des génératrices ou alternateurs et moteurs thermiques permettant d'entraîner la production de l'énergie. L'alternateur a pour rôle de générer la puissance électrique et le moteur thermique se caractérise par sa capacité à entraîner une génératrice.

VII.4. Le principe fonctionnel de groupe électrogène

Un groupe électrogène est l'association d'une machine produisant de l'énergie mécanique et d'un alternateur. Une centrale de production électrique est en fait un « groupe électrogène couplé à une "chaudière" ». Aussi, dans la pratique, on a l'habitude de parler par exemple de centrale hydraulique, centrale nucléaire, centrale à charbon, ... Mais aussi de groupe turbo-alternateur, groupe hydraulique, groupe à turbine à gaz.

On réserve l'appellation groupe électrogène à l'association moteur à combustion ou à explosion et alternateur (génératrice synchrone et plus rarement génératrice asynchrone ou continue), répondant à la Norme ISO 8528-1.

Pour qu'un groupe électrogène, il faut une régulation de vitesse sur le moteur et une régulation de tension sur l'alternateur. De plus, ils doivent être munis d'un ensemble de capteurs et de sécurités. Enfin, ils sont équipés d'un système de gestion du démarrage et de l'arrêt qui peut être manuel ou automatique.

VII.5. Les différents types de groupe électrogène

Il existe trois types de groupe électrogène dont le rôle est de produire l'énergie. Ils ont un même principe de fonctionnement mais n'utilisent pas la même technologie. Nous avons les groupes électrogènes diesel, groupes électrogènes à essence et les groupes électrogènes insonorisés (ex : Cloueur SpitPaslode).

VII.5.1. Les groupes électrogènes Diesel

Ils sont généralement utilisés dans les grands travaux de chantier car ils produisent des bruits importants inappropriés pour une utilisation domestique. Les groupes électrogènes sont disponibles sous plusieurs tailles en fonction de leur puissance. Ils vont de quelques KW aux milliers en fonction des usages. Ils ont été conçus pour un usage intensif. Leur dépannage se fait avec un démarreur surtout pour les groupes électrogènes de moyenne et de forte

puissance. Les alimentations électriques varient en fonction des modèles, nous avons des monophasée, triphasée ou mixte. D'autres groupes électrogènes diesel par contre sont dotés d'un dispositif qui permet le démarrage automatique, leur motorisation est de 4 temps.

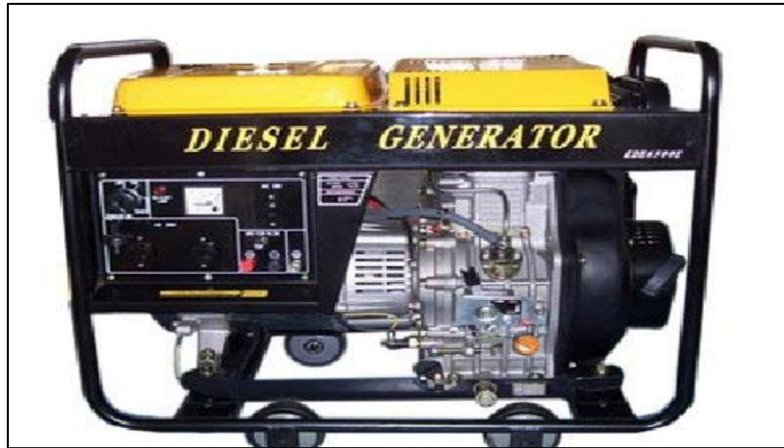


Figure VII-2 Groupe électrogène diesel.

VII.5.2. Groupe électrogène à Essence

Ce sont les plus utilisés et les plus courants. Ils sont généralement destinés à un usage domestique grâce à leur polyvalence. Le démarrage peut se faire à l'aide d'un démarreur électrique ou par un lanceur manuel. Les groupes électrogènes à essence ont une puissance électrique disponible qui va de 1,5 à 6 KW pour les plus gros. Ils sont très adaptés aux ménages car ils produisent moins de nuisances sonores. Ces groupes délivrent une alimentation monophasée avec plusieurs circuits disponibles sur ceux de grosse puissance. Ils ont une motorisation qui varie entre 2 et 4 temps.

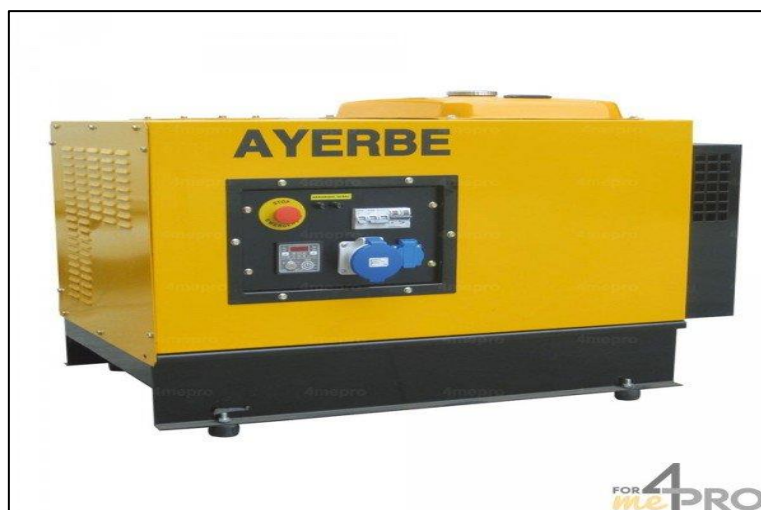


Figure VII-3 Groupe électrogène à essence.

VII.5.3. Les groupes électrogènes Insonorisés

Dotés d'une motorisation allant de 2 à 4 temps, les groupes électrogènes insonorisés génèrent trop de nuisances sonores. C'est d'ailleurs ce qui les distingue des autres types de groupe électrogènes précédents. Ils sont généralement enfermés dans un caisson éloigné afin de réduire significativement les bruits. Leur utilisation est facile en ce sens qu'ils sont moins encombrants et rapides au niveau de la mise en œuvre. La puissance électrique disponible ne va pas au-delà de 2 KW. Ils sont parfois équipés par des moteurs thermiques à essence. Les groupes électrogènes insonorisés sont pratiques pour une utilisation ponctuelle.



Figure VII-4 Groupe électrogène insonorisé.

VII.6. Fonctionnement de groupe électrogène

Ils fonctionnent à partir de tous les carburants. Les plus fréquents sont l'essence, le gazole, le gaz naturel, le GPL, les biocarburants et pour les plus puissants le fioul lourd. Le groupe peut être mis en fonctionnement de différentes manières : manuellement, électriquement ou grâce à l'air comprimé, selon la puissance.

VII.6.1. Le rendement

Le rendement des groupes électrogènes croît avec leur puissance, mais reste limité au maximum que permet le cycle de Carnot, duquel doivent être soustraites les pertes mécaniques et électriques dans l'alternateur et la transmission. En particulier, les groupes de puissance modérée se caractérisent par un médiocre rendement et une consommation élevée.

Par exemple, pour un produit commercial qui délivre 5 500 W, mû par un moteur à essence de 9,55 kW qui consomme environ 2,5 L de carburant à l'heure lorsqu'il est utilisé à $\frac{2}{3}$ de sa

puissance nominale (soit 3 600 W) : compte tenu des pertes thermiques inévitables dans les moteurs à combustion interne, il en résulte un rendement n'excédant pas 40 % (sources fiches constructeurs) du pouvoir calorifique du carburant.

VII.6.2. Régulation

Un groupe électrogène moderne est équipé de deux régulations. La tension de sortie est stabilisée (par exemple : 230 V) par un dispositif électronique qui agit sur l'alternateur. La vitesse de rotation du moteur et donc de l'alternateur doit aussi rester constante afin de garantir constantes la fréquence et la tension de sortie (50 Hz). Cette régulation se fait grâce à un dispositif centrifuge analogue au régulateur à boules de James Watt qui commande directement le carburateur ou la pompe d'injection. Un dispositif à induction fondé sur les courants de Foucault tel que celui qui équipe les anciens indicateurs de vitesse des automobiles, ou un système électronique peuvent encore remplir cette fonction.

VII.6.3. Technologie

Depuis une dizaine d'années, il existe un type de groupe électrogène (dit inverter) qui fonctionne de manière particulière, alors que les groupes électrogènes classiques utilisent directement les sorties d'un alternateur monophasé ou triphasé synchrone pour produire de l'énergie, cette technologie utilise un onduleur alimenté par un alternateur triphasé à excitation variable commandée par un régulateur électronique. Ce régulateur est programmé pour produire l'excitation nécessaire afin de délivrer la puissance requise pour alimenter l'onduleur. Le courant triphasé produit est redressé en courant continu puis transformé en courant alternatif par l'onduleur. Cette technique présente plusieurs avantages par rapport aux générateurs classiques :

- la fréquence et la tension du courant de sortie du groupe ne sont plus dépendantes du régime du moteur, ce qui lui permet de tourner à régime ralenti, si la puissance demandée est faible, ce qui réduit la consommation de carburant et le bruit ;
- si nécessaire, une batterie tampon fournit la puissance requise en cas d'augmentation brutale de la demande en électricité ;
- la fréquence et la tension de sortie sont beaucoup plus précises (ajustée des milliers de fois par seconde par le microprocesseur, dans le cas d'une régulation numérique, de l'ordre de la seconde pour une régulation mécanique simple) ;
- diminution drastique du bruit d'opération, surtout lorsque la demande est faible ;

- fonctionnement sécuritaire pour les appareils électriques sensibles, tels que les ordinateurs mais surtout les appareils médicaux et les instruments de précision ;
- Sécurité temporaire en cas de problème mécanique du moteur laissant le temps de trouver une autre solution.

VII.6.4. Groupe électrogène temps zéro (GTZ)

Il existe également des groupes électrogènes dits « temps zéro » (GTZ) ou groupes no-break. À la différence des groupes électrogènes classiques, ces groupes temps zéro ont un alternateur branché sur le réseau électrique, et en rotation permanente, qui alimente la charge alors que le moteur thermique (Diesel) est à l'arrêt lorsque le secteur est présent. En cas de creux de tension d'alimentation ou de coupure brève, le GTZ dispose d'une réserve d'énergie (batterie électrochimique ou accumulateur cinétique) qui permet de continuer à maintenir la rotation de l'alternateur (et donc de continuer à alimenter la charge). En cas de coupure plus longue, le moteur Diesel est démarré à vide (car l'alternateur est déjà en rotation), lorsqu'il atteint la vitesse nominale, un embrayage à roue libre ou électromagnétique se ferme et, en assurant le couplage du moteur thermique à l'alternateur, permet la reprise de charge tandis qu'un contacteur isole l'alternateur du réseau. Le fonctionnement est alors celui d'un groupe électrogène classique, à la différence que la réserve d'énergie dont dispose le GTZ (cinétique ou électrochimique) permet d'assurer une meilleure qualité d'alimentation puisqu'elle vient en renfort du moteur thermique en cas d'impact de charge, limitant ainsi les variations de fréquence.

Il existe deux principaux types de groupes temps zéro :

- Les plus anciens, dont la conception remonte aux années 1970 et 1980, utilisent un accumulateur cinétique horizontal sur un arbre commun au moteur Diesel et à l'alternateur. L'accumulateur cinétique est relié via un embrayage au Diesel. En cas de coupure électrique, l'accumulateur cinétique est couplé déductivement par impulsion à l'axe de rotation et entraîne ainsi mécaniquement l'alternateur qu'il maintient à la bonne fréquence. Le transfert d'énergie est unidirectionnel et une diminution brutale de charge entraîne une accélération du Diesel. Ces systèmes n'offrent pas la possibilité d'utiliser des batteries comme réserve d'énergie et sont, du fait de l'autonomie limitée des accumulateurs cinétiques horizontaux, exposés à des démarrages Diesel « de

précaution » à chaque défaut secteur (creux de tension ou coupure) de quelques dizaines de millisecondes ;

- Les plus récents, dont la conception remonte à la fin des années 1990, sont appelés « GTZ hybrides ». Dans ce schéma c'est l'alternateur qui est couplé via un embrayage roue-libre au Diesel. La réserve d'énergie qui peut être soit une batterie électrochimique, soit un accumulateur cinétique vertical, est en armoire. Elle maintient électriquement l'alternateur en rotation (et donc l'alimentation de la charge) en cas de coupure. Avec un accumulateur cinétique vertical l'autonomie est suffisante pour ne pas avoir à démarrer le Diesel si le défaut ne dure que quelques secondes ce qui élimine les démarrages dus à des défauts transitoires et limite donc fortement la pollution due au Diesel. Avec batterie, le démarrage du Diesel peut être temporisé plusieurs minutes. Dans le cas des GTZ hybrides à accumulateur cinétique le flux d'énergie est bidirectionnel : l'accumulateur d'énergie vient en assistance au Diesel et lisse les impacts de charge, la fréquence reste constante même en cas de baisse de charge brutale.

VII.7. Utilisation des groupes électrogènes

- Un groupe électrogène est en fait un système motorisé dont le fonctionnement permet d'alimenter une batterie. Il peut aussi être directement connecté au circuit électrique interne d'une habitation ou d'une entreprise pour assurer la fourniture électrique. Le combustible utilisé pour la combustion ménagée peut être de l'essence, du gazole, du gaz naturel, des biocarburants ou du fioul.
- Un groupe électrogène peut être utilisé de plusieurs manières. Ces appareils existent sur le marché en différentes tailles et puissances. Si la plupart sont légers et faciles à transporter, certains sont de dimensions imposantes. Ces installations sont destinées à être fixées durablement sur un support solide.
- Un groupe électrogène transportable et de faible puissance peut facilement être utilisé pour assurer l'éclairage d'une petite habitation ou l'alimentation d'appareils à faible consommation de courant comme les ordinateurs portables ou les téléphones. Si vous souhaitez alimenter votre habitation avec l'ensemble de vos équipements électriques, il vous suffit de trouver le groupe électrogène qui pourra fournir la puissance

nécessaire. Pour un usage purement domestique, il sera certainement plus grand en taille, mais sera toujours relativement transportable.

- Un groupe électrogène peut aussi servir à faire tourner l'éclairage, le système de refroidissement, le système de chauffage ou les appareils de cuisson d'un petit commerce (boulangerie, restaurant, boutique, etc.).
- Un groupe électrogène peut être emporté pour assurer la fourniture électrique lors d'évènements comme les pique-niques, les mariages, les baptêmes, les anniversaires, les concerts ou les réunions.

VII.8. Pollution des groupes électrogènes

Personne n'est à l'abri des coupures d'électricité. Et le pire c'est qu'elles sont toujours imprévisibles. Bien entendu, un groupe électrogène doit être utilisé de manière intelligente pour réduire la pollution atmosphérique qu'il peut causer.

VII.9. Les groupes électrogènes et l'environnement

Les hydrocarbures pétroliers sont particulièrement dangereux pour la planète, car ils peuvent polluer l'air, l'eau et le sol. Heureusement que les groupes électrogènes permettent de limiter ces émissions. Malgré cela, ces dispositifs peuvent détruire l'environnement et l'atmosphère en cas d'usage intensif. Autrement dit, il faut réserver l'utilisation du groupe électrogène à des situations d'urgence.

Techniquement, environ 40 % des carburants consommés sont transformés en énergie. Les 60 % sont perdus dans la nature. Et comme on le sait déjà, les gaz dégagés par le moteur du groupe polluent l'atmosphère. Afin de régler ce problème de perte thermique, les constructeurs ont développé de nouvelles technologies. Il existe alors désormais des matériels utilisant de l'énergie verte pour produire de l'électricité. Les groupes électrogènes solaires (GES) sont des exemples concrets de machines respectueuses de l'environnement. Elles ne produisent aucune substance polluante et pourtant, elles peuvent alimenter différents types d'appareils électriques. Le marché propose également des groupes électrogènes à hydrogène. Ceux-ci recourent à une énergie propre pouvant remplacer l'essence pour alimenter un moteur, raison pour laquelle l'hydrogène est considéré comme un carburant vert. Le plus difficile sera de trouver un modèle adapté à ses besoins.

VII.10. Les groupes électrogènes et la santé

- Les groupes électrogènes produisent du dioxyde de carbone, un gaz asphyxiant, ainsi que du monoxyde de carbone, extrêmement toxique et de plus quasi indétectable. Même en bon état et placés dans une pièce aérée comme un garage, mais attenante à une partie de logement occupée, ils peuvent être la cause d'intoxications mortelles.
- Les groupes électrogènes fonctionnant avec un moteur Dièsel produisent aussi des particules qui sont nocives pour les voies respiratoires.

Chapitre VIII : La pile à combustible

VIII.1. Introduction

La pile à combustible est un générateur d'énergie permettant de transformer directement l'énergie d'un combustible (hydrogène, hydrocarbure) en énergie électrique sans passer par l'énergie thermique.

En effet l'énergie est produite grâce à une réaction électrochimique. Cependant la pile à combustible nécessite l'apport d'un combustible pour fonctionner, l'hydrogène. Elle réalise donc une oxydation entre son carburant l'hydrogène et son comburant l'oxygène. Ce système n'émet aucun gaz à effet de serre et produit de l'eau ainsi que de l'électricité.

Grâce à cet avantage environnemental, l'utilisation de ce système est envisagée pour diverses applications d'alimentation de véhicules électriques propres, ainsi que la cogénération de chaleur et d'électricité.

VIII.2. Le combustible et son stockage

Le combustible le plus simple à utiliser est l'hydrogène. C'est également lui qui permet d'obtenir les densités de courant les plus élevées. Sa combustion ne produit que de l'eau (sous forme liquide ou de vapeur). C'est un carburant réactif et il est abondant. Cependant il est inflammable dans l'air ou en présence d'oxygène. De plus, incolore et inodore, C'est un gaz à manipuler avec précaution. Autre inconvénient, il occupe beaucoup de place, ce qui s'avère problématique dans le cas de piles équipant des véhicules. Les recherches sur la pile portent donc également sur les réservoirs de stockage d'hydrogène que l'on veut plus sûrs, plus légers et plus compacts.

VIII.3. Différents types des piles à combustible

On compte actuellement six types de piles à combustible qui se différencient selon la nature de leur électrolyte et le niveau de leur température de fonctionnement, leur architecture et les domaines d'application dans lesquels chaque type peut être utilisé. Les différents types de piles sont rappelés dans le tableau VIII-1.

Tableau VIII-1- : Différents types de la pile à combustible.

	Electrolyte	Température De fonctionnement	Domaine D'application
AFC			
Alkaline Fuel Cell Pile à combustible alcaline	Hydroxyde De potassium	60°C à 90°C	Transport
DMFC			
Direct méthanol Fuel Cell Pile à combustible au méthanol direct	Membrane polymère	60°C à 120°C	Portable
PEMFC			
Proton Exchange Membrane Fuel Cell Pile à combustible à membrane	Membrane polymère	60°C à 100° C	Portable Stationnaire Transport
PAFC			
Phosphoric Acide Fuel Cell Pile à combustible à acide phosphorique	Acide phosphorique	150°C à 220°C	Stationnaire
MCFC			
Molten Carbonate Fuel Cell	Carbonate de Métaux alcalins	650°C	Stationnaire

Pile à combustible à
carbonate fondu

SOFC

Solid Oxide Fuel Cell
Pile à combustible à
oxyde solide

Céramique

600°C à 1000° C

Stationnaire
Transport

VIII.3.1. La pile Alcaline AFC

Les piles AFC ont l'avantage d'avoir le meilleur rendement de toutes les piles à combustible, mais elles travaillent correctement seulement en utilisant des gaz très purs ce qui est considéré comme un inconvénient majeur pour de nombreuses applications.

Utilisée depuis le début des années 1940, cette pile se trouve également à bord des vaisseaux spatiaux habités de la NASA depuis les trente dernières années. Fonctionnant à des températures variant de 60° à 90°C, les réactions mises en jeu sont les suivantes :

A l'anode, avec un catalyseur au nickel ou au platine-palladium, on a la réaction :



Et à la cathode, avec un catalyseur à l'oxyde de nickel, à argent ou au platine-or, on a la réaction :



Dans ce cas, l'électrolyte utilisé est une solution de KOH (généralement en concentration de 30 à 40%), qui est un électrolyte conducteur d'hydroxyde OH⁻. Comparé aux piles à électrolyte acide, cet électrolyte a l'avantage, d'accélérer la réduction de l'oxygène, ce qui en fait un système intéressant pour certaines applications spécifiques.

L'électrolyte peut réagir avec le dioxyde de carbone pour former un composé de carbonate, ce qui réduit énormément le rendement de la pile à combustible. En effet, le CO₂ contenu dans l'air réagit avec l'électrolyte dans la réaction suivante :



Les catalyseurs sont habituellement une combinaison de nickel et d'un métal inactif, comme l'aluminium, permettant ainsi de réduire le coût global du système. Le magnésium métallique

ou des composés de graphite sont utilisés pour les plaques bipolaires qui sont les connecteurs permettant de construire un assemblage en reliant plusieurs piles en série.

VIII.3.2. La pile à combustible à méthanol direct (DMFC)

La DMFC est une PEMFC utilisant du méthanol comme carburant, le méthanol est alors directement en contact avec l'anode, à laquelle les réactions suivantes se produisent à des températures de fonctionnement ne dépassant jamais 80°C :

A l'anode:



Et à la cathode on a :



Dans une DMFC, ce sont les protons qui se déplacent de l'anode à la cathode et non les molécules de méthanol. Tout comme le cas chez la PEMFC, cette pile à combustible utilise un électrolyte polymérique échangeur d'ions, cependant ces membranes ne sont pas avantageuses pour bloquer le passage du méthanol. Le mouvement des protons dans la membrane est associé à la teneur en eau de la membrane. Le méthanol et l'eau ayant des propriétés comparables. A la cathode, le méthanol cause un mélange de potentiels du à l'interférence entre les réactions d'oxydation du méthanol et de réduction de l'oxygène. Cela a pour effet une baisse des performances de la pile.

VIII.3.3. La pile à combustible à membrane électrolyte polymérique (PEMFC)

Ce type de pile a été mis au point pour les missions spatiales Gemini de la NASA dans les années 1960, mais fut ensuite vite remplacé par des AFCs, faute de rendement suffisant. Cette technologie a connu des progrès énormes dans les années 1980, notamment avec l'arrivée de nouvelles membranes de type Nafion (fabriquées par la société Dupont de Nemours), permettant d'envisager le recours à la technologie des piles à combustible pour la généralisation des applications. La PEMFC fonctionne à une température d'environ 80°C, de façon à maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane. Les réactions suivantes se produisent :

A l'anode, on a :



Et à la cathode, on a :



L'électrolyte est une membrane polymérique mince qui permet le passage des protons (H^+). Un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes. Le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur s'il n'est pas éliminé pendant le procédé de purification, d'où une diminution de l'efficacité de la pile à combustible. De nombreux centres de recherche sont à la recherche de catalyseurs plus robustes et moins chers, et d'électrolytes polymériques échangeurs d'ions plus efficaces et également moins coûteux. Les plaques bipolaires peuvent être faites à partir de feuilles de graphite, de composites de métaux à base de carbone.

VIII.3.4. La pile à acide phosphorique (PAFC)

La pile à combustible à acide phosphorique est le système le plus avancé dans le développement et la commercialisation. Elle est principalement utilisée pour des applications stationnaires, en tant que générateur électrique. Des centrales électriques de type PAFC, avec une puissance fournie comprise entre 5 et 20 MW, ont été installées dans le monde pour fournir de l'électricité, du chauffage et de l'eau chaude à certains villages, usines ou hôpitaux. Les avantages des PAFCs sont sa facilité de fabrication, sa stabilité thermique et chimique et la faible volatilité de l'électrolyte aux températures de fonctionnement (entre 150 et 220°C). Ces facteurs ont facilité le développement commercial de ce type de système.

Les réactions qui se produisent dans une PAFC sont les mêmes que dans des températures variant de 150 à 220°C.

A l'anode:



Et à la cathode :



Comme dans le cas des PEMFCS, cette pile utilise des électrodes de carbone, avec un catalyseur à base de platine, qui permettent la diffusion des gaz. Les plaques bipolaires sont deux plaques poreuses séparées par une mince feuille de graphite pour former un substrat côtelé dans lequel l'électrolyte peut être stocké.

VIII.3.5. La pile à carbonate fondu (MCFC)

Le développement des piles à combustible à carbonate fondu a débuté dans le milieu du vingtième siècle. Les systèmes à base de piles MCFC peuvent atteindre des rendements

supérieurs à 50%, voire supérieurs à 70% lorsqu'ils sont combinés à d'autres générateurs. De plus les MCFC peuvent utiliser une large gamme de carburant, et ne sont pas sensibles à la contamination par CO ou CO₂ comme c'est le cas des piles à basses températures.

A l'anode, on a la réaction suivante :



Au niveau de la cathode :



L'électrolyte est fait d'un mélange de carbonates de métaux alcalins retenus par une matrice céramique d'oxyde d'aluminium et de lithium (LiAlO₂). Les plaques bipolaires sont faites d'acier inoxydable recouvert de nickel de la côte de l'anode. Le choix des matériaux est extrêmement important, en raison de la nature hautement corrosive de l'électrolyte et de la température de fonctionnement très élevée.

VIII.3.6. La pile à oxyde solide(SOFC)

Le principe de fonctionnement des SOFCS est basé sur le mécanisme suivant : l'oxygène est dissocié à la cathode en O²⁻, puis l'anion migre à travers l'électrolyte conducteur ionique à haute température et va se combiner à l'anode avec l'hydrogène, ou le monoxyde de carbone, pour former de l'eau et libérer des électrons.

Les réactions mises en jeu sont les suivantes :

A l'anode:



A la cathode:



La caractéristique principale des SOFCS réside donc dans leur température de fonctionnement (600 à 1 000°C) nécessaire à l'obtention d'une conductivité ionique suffisante de l'électrolyte céramique. Cette température présente un double avantage. Elle permet d'abord l'utilisation directe d'hydrocarbures, qui pourront être facilement reformés se passant de catalyseur à base de métaux nobles. Elle produit d'autre part une chaleur élevée facilement exploitable en cogénération, le rendement pouvant atteindre ainsi 80%. Mais elle présente également un inconvénient, la mise en température est longue et complique tout utilisation à cycles courts et répétitifs (comme dans le cas de transport).

Pour ces raisons, la technologie se prête particulièrement bien à la production d'électricité décentralisée et à la cogénération (domaines couvrant des puissances allant de 1KW à quelques dizaines de MW). Grâce à son fort rendement et sa capacité potentielle à fonctionner directement avec des hydrocarbures liquides, elle trouvera également un débouché dans la propulsion navale.

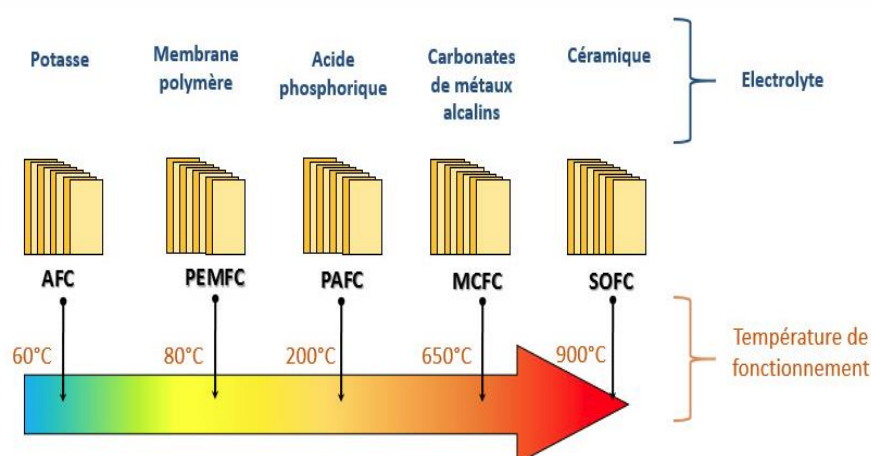


Figure VIII-1 Température de fonctionnement pour les différents Types de la pile à combustible

VIII.4. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible est décrit comme l'inverse de l'électrolyse de l'eau. En effet, il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale :



Dans les piles dites « acide », l'hydrogène est oxydé à l'anode, c.-à-d. décomposé en protons et électrons. Les protons traversent ensuite l'électrolyte et se retrouvent à la cathode. Le déséquilibre en électrons crée un pôle positif et un pôle négatif entre lesquels circulent les électrons produisant ainsi de l'électricité. Simultanément à la cathode, les protons réagissent avec les électrons et l'oxygène et donnent de l'eau, seul sous-produit de cette réaction chimique.

Oxidation (anode):



Réduction (cathode) :

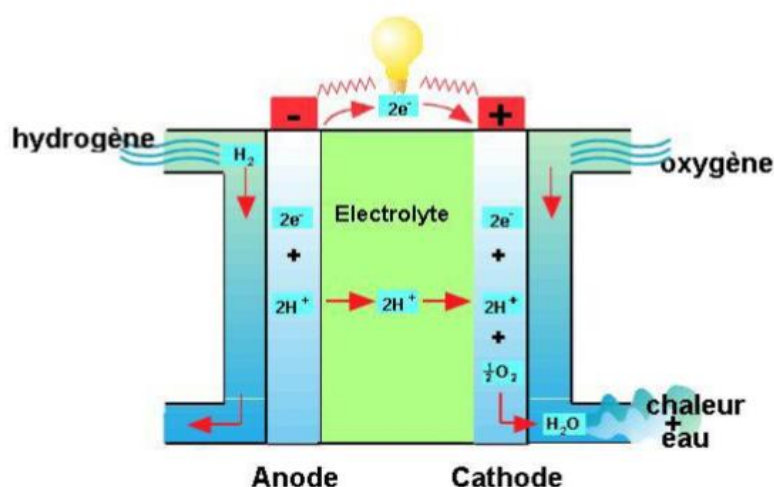
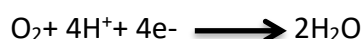


Figure VIII-2 Principe de fonctionnement de la pile à combustible.

VIII.5. Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible

VIII.5.1. Les avantages

Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique, de l'automobile. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages :

- De hauts rendements énergétiques même à charge partielle
- De faibles émissions sonores
- Peu d'émissions (elles dépendent cependant du combustible utilisé)
- Elles sont de construction modulaire,
- Diverses températures de fonctionnement (PEMFC) Pas de parties rotatives.

VIII.5.2. Les inconvénients

Si les piles sont si intéressantes, pourquoi ne les trouve-t-on pas sur le marché ?

En fait, il reste de nombreux points faibles qui sont à régler :

- Le coût.
- Le poids et le volume.
- La durée de vie.
- La gestion thermique du module.
- Le carburant et la mise en place des normes de sécurité liées à son emploi.

Bibliographie et Webographie

- [1]** Sabonnadière Jean Claude, *Nouvelles technologies de l'énergie 1: Les énergies renouvelables*, Ed. Hermès.
- [2]** Gide Paul, *Le grand livre de l'éolien*, Ed. Moniteur.
- [3]** A. Labouret, *Énergie Solaire photovoltaïque*, Ed. Dunod.
- [4]** Viollet Pierre Louis, *Histoire de l'énergie hydraulique*, Ed. Press ENP Chaussée.
- [5]** Peser Felix A, *Installations solaires thermiques: conception et mise en œuvre*, Ed. Moniteur, Dunod/L'Usine nouvelle, 2013..
- [6]** G. Almouzni, *cours : Electronique analogique. Edition : EISTI, (2011-2012).*
- [7]** G. Laval, *La fusion nucléaire : de la recherche fondamentale à la production d'énergie ?*, EDP Sciences, 2007.
- [8]** V. Crastan, *Centrales électriques et production alternative d'électricité*, Hermès-Lavoisier, 2009.
- [9]** https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_%C3%A9lectrique
- [10]** https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_thermique
- [11]** <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/les-differents-types-de-centrales-thermiques>
- [12]** <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/comment-fonctionne-une-centrale-thermique-a-flamme>
- [13]** <https://www.connaissancedesenergies.org/une-centrale-thermique-utilise-toujours-du-combustible-fossile-130620>
- [14]** <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/centrale-a-charbon>
- [15]** <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-centrale-nucleaire>
- [16]** <http://www.sfen.org/fr/lenergie-nucleaire/le-fonctionnement-dune-centrale-nucleaire>
- [17]** https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_nucl%C3%A9aire
- [18]** <https://energie-nucleaire.net/definitions/centrale-nucleaire.html>