



Université 8 Mai 1945-Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique
et Automatique

Notes de Cours

Production d'Energie Electrique

Spécialités:

Licence académique "Electromécanique"

Licence académique "Electrotechnique"

Licence professionnalisante "Protection des réseaux électriques"

Préparé par:

Dr. REMADNIA Mokdad

SOMMAIRE

Introduction	03
Chapitre I. Généralités, concepts et fondements	
I.1. Energie pour un développement durable	05
I.2. Production d'énergie et aspect économique	06
I.3. Les énergies épuisables	06
I.3.1. Les énergies fossiles	07
I.3.1.1. Le pétrole	07
I.3.1.2. Le charbon	07
I.3.1.3. Le gaz	07
I.3.2. L'énergie fissile	07
I.4. Les énergies renouvelables	07
I.5. Les chaînes de production de l'électricité	08
Chapitre II. Les centrales thermiques	
II.1. Introduction	10
II.2. Principe de fonctionnement d'une centrale thermique	10
II.2.1. La combustion	11
II.2.2. La production de vapeur	11
II.2.3. La production d'électricité	12
II.2.4. Le recyclage	12
II.3. La turbine à combustion	12
II.4. Le cycle combiné au gaz naturel	13
II.5. La cogénération	14
II.6. Impact sur la qualité de l'air	14
Chapitre III. Les groupes électrogènes	
III.1. Introduction	15
III.2. Principe de fonctionnement d'un groupe électrogène	15
III.3. Les modes de production d'énergie électrique moyennant le groupe électrogène	16
III.3.1. La production d'énergie électrique de secours	16
III.3.2. La production d'énergie électrique de pointe	16
III.3.3. La production d'énergie électrique	16
III.4. Pollution, santé et sécurité	17
Chapitre IV. Les centrales nucléaires	
IV.1. Introduction	18
IV.2. Energie libérée par la fission atomique	18
IV.3. Source de l'uranium	18
IV.4. La réaction de fission nucléaire	19
IV.5. Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire	19

IV.6. Types de réacteurs	21
Chapitre IV. Les centrales hydrauliques	
V.1. Introduction	22
V.2. Puissance disponible	22
V.3. Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique	23
V.4. Types de centrales hydrauliques	24
V.5. Parties principales d'une centrale hydraulique	24
Chapitre VI. L'énergie éolienne	
VI.1. Introduction	26
VI.2. Origine du vent	26
VI.3. Composition d'une éolienne	26
IV.4. Principe de fonctionnement d'une éolienne	28
IV.5. Parc éolien	28
VI.6. Turbines éoliennes	29
VI.6.1. Eoliennes à axe horizontal	29
VI.6.2. Eoliennes à axe vertical	29
Chapitre VII. L'énergie solaire	
VII.1. Introduction	31
VII.2. L'énergie solaire photovoltaïque	31
VII.3. La cellule photovoltaïque	31
VII.3.1. Principaux types de cellules solaires	32
VII.3.2. L'effet photovoltaïque	32
VII.3.3. Principe de fonctionnement	34
VII.3.4. Caractéristique courant-tension $I(V)$	35
VII.3.5. Groupement en série	36
VII.3.6. Groupement en parallèle	37
VII.4. La centrale solaire	37
VII.4.1. La centrale autonome	37
VII.4.2. La centrale raccordée au réseau	38
Chapitre VIII. Les piles à combustible	
VIII.1. Introduction	39
VIII.2. Fonctionnement des piles à combustible	39
VIII.3. Les types de piles à combustible	41
VIII.4. Les domaines d'applications de la pile à combustible	41
VIII.5. Avantages et inconvénients des piles à combustible	42
Bibliographie	44

Introduction

L'électricité est l'une des formes d'énergie les plus nobles à laquelle convergent actuellement quasiment toutes les autres formes. En effet, l'électricité est énergétiquement efficace, non polluante, silencieuse... etc. Ainsi, et pour toutes ces raisons, l'électricité, qui symbolise la civilisation et la modernité, occupent une place importante aussi bien dans la société que dans le domaine technologique. Ceci se justifie, par exemple, par la conversion croissante des véhicules fonctionnant sur le pétrole vers l'électricité, par l'électrification des zones rurales et celles les plus éloignées et par, notamment, l'usage de plus en plus large des appareils et équipements électriques.

Dès leur invention au cours du 19^{ème} siècle, les machines électriques ont permis la production massive de l'électricité, qui grâce aux transformateurs, a pu être transportée et distribuée à des distances de plus en plus grandes. Les machines électriques permettant la génération de l'électricité, appelé génératrices pour le courant continu et alternateurs pour le courant alternatif, sont basées sur le principe de l'induction magnétique. Selon ce principe, les conducteurs traversant un champ magnétique (ou placés dans un champ magnétique variable) sont le siège d'une force électromotrice. De manière générale, un mouvement est souvent nécessaire pour générer une tension, une condition nécessaire au fonctionnement des machines génératrices. La machine reçoit l'énergie mécanique fournie sur la partie tournante et la transforme en électricité à travers le phénomène d'induction magnétique. La question qui s'est toujours posée: d'où provient l'énergie mécanique qu'il faut fournir à la machine ? La réponse se trouve dans tout ce qui peut donner un mouvement tel que: le cours d'eau, la vapeur sous pression, le vent, moteur à combustion interne, effort humain ou animal, ou autre. Suivant l'énergie primaire utilisée pour fournir ce mouvement mécanique, la production est dite: hydraulique, thermique à vapeur, éolienne, groupe électrogène, manuel ou autre. Avec le progrès technologique, d'autres moyens de production de l'énergie électrique ont été développés et continuent à attirer l'attention. Ces moyens, qui occuperont dans un futur proche une place non négligeable dans la production de l'électricité, utilisent les matériaux pour la conversion de l'énergie, tel que l'effet photovoltaïque dans les cellules solaires, l'effet thermoélectrique ou l'effet

piézoélectrique. D'autres techniques utilisent plutôt des réactions chimiques, comme c'est le cas des piles à combustible ou moteur à hydrogène.

Ce cours de production de l'énergie électrique, destiné aux étudiants de Licence, vise à présenter les différentes techniques utilisées pour la génération de l'électricité allant des moyens conventionnels jusqu'aux techniques les plus modernes. Ce cours, réparti sur huit chapitres, est présenté dans une manière assez simple afin de permettre à l'étudiant d'assimiler le principe de fonctionnement des différentes centrales et techniques de production.

CHAPITRE 1:

Généralités, concepts et fondements

I.1. Energie pour un développement durable

En quelques dizaines d'années, l'homme a brûlé une grande partie des stocks d'énergie que la planète a mis des centaines de millions d'années à constituer. Nous épuisons la terre de ses ressources, l'atmosphère s'enrichit en CO₂, l'effet de serre augmente, les écosystèmes* se dégradent, le changement climatique annoncé est devenu une réalité.

L'énergie est devenue tellement omniprésente et banale dans notre société que nous perdons de vue que le fait de se chauffer, de se déplacer, de se nourrir, de produire des biens ... consomme de l'énergie et produit des gaz à effet de serre.

C'est en 1986 qu'a été défini le concept du développement durable comme suit : « *satisfaire les besoins du présent sans hypothéquer la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins* » [1].

Ce concept incite à exploiter des ressources énergétiques renouvelables, seuls gages de durabilité, et permet de minimiser les impacts polluants associés à leur conversion et la fabrication de leurs convertisseurs. Les combustibles fossiles et fissiles apparaissent comme une source finie et économiquement limitée, induisant des émissions affectant l'environnement et/ou des chaînes de conversion exploitant des combustibles renouvelables à faible émissions, accessibles à des coûts acceptables.

Le développement durable nécessite de gérer l'équilibre entre le développement économique, l'équité sociale et la protection de l'environnement dans toutes les régions de la planète. Ce concept ne peut donc se concrétiser sans une réelle volonté politique d'un nombre croissant de pays.

* Un écosystème regroupe des communautés de plantes et d'animaux, appelés biodiversité, qui s'influencent les unes et les autres: elles s'entraident, se protègent ou se mangent.

I.2. Production d'énergie et aspect économique

Les sources d'énergie nécessaire aux activités économiques ont évolué à travers le temps. Cette évolution fait apparaître deux grandes catégories de ressources énergétiques, les énergies renouvelables et celles qui sont non renouvelables: fossiles et fissiles. Le charbon, le gaz naturel et le pétrole sont les principales sources d'énergie fossiles non renouvelables. Le bois, l'éolien et le solaire fournissent l'essentiel des énergies renouvelables [2].

Au terme de cette longue évolution, les énergies fossiles continuent à fournir l'essentiel des besoins de l'humanité, 82% de la consommation mondiale d'énergie proviennent, en 2007, du pétrole et du gaz naturel [2]. La consommation d'énergie, toutes sources confondues, génère près de 83% des émissions de gaz à effet de serre dégagées par les activités économiques. Les seules énergies fossiles sont à l'origine de près de 57% de l'ensemble des émissions des gaz en 2004 [2]. Les économistes ont accompagné ce mouvement en cherchant à développer leurs théories, l'économie de l'environnement et des ressources naturelles et plus récemment l'économie écologique. L'économie des ressources naturelles et de l'environnement a visé d'une part, la recherche de l'allocation efficace des ressources naturelles et environnementales parmi celles qui sont possibles et d'autre part, l'étude des interactions de l'économie et du milieu naturel [2].

I.3. Les énergies épuisables

Les énergies sont dites épuisables dans la mesure où elles sont incapables de se renouveler rapidement. Certaines des énergies non renouvelables sont appelées des énergies fossiles. L'énergie épuisable la plus connue est sans doute le pétrole. Ce dernier provient de la décomposition d'organismes ayant vécu il y a des millions d'années. On imagine bien qu'il faudra attendre beaucoup de temps pour que les stocks de pétrole puissent se renouveler. Il existe aussi des gisements de gaz qui sont très exploités par l'homme. Ces réserves diminuent également très vite et on peut facilement imaginer qu'un jour il n'y en aura plus. L'uranium est également épuisable. Ce dernier est à la base des réactions nucléaires dans les centrales nucléaires.

I.3.1. Les énergies fossiles

Le charbon, le pétrole et le gaz naturel proviennent de la décomposition de végétaux et d'organismes vivants qui ont été enfouis sous la terre. Les ressources diminuent quand on les utilise car il leur faut des millions d'années pour se former. Ces sources d'énergie ne sont pas renouvelables et les gisements qui les contiennent s'épuisent avec le temps.

I.3.1.1. Le pétrole

Le pétrole brut provient de la décomposition d'animaux et d'algues microscopiques. Il se présente sous forme d'une huile minérale plus ou moins fluide, visqueuse, combustible formé principalement d'hydrocarbures de couleur claire à foncée. Le pétrole est donc une source d'énergie fossile non renouvelable.

I.3.1.2. Le charbon

Le charbon est une matière combustible qui provient de résidus fossilisés de forêts. Il y a des millions d'années ces forêts qui recouvraient notre planète ont été enfouies sous la terre. Lentement elles se sont transformées en charbon.

I.3.1.3. Le gaz

Il y a des millions d'années des organismes vivants microscopiques ont été enfouis dans le sol et se sont transformés en gaz naturel sous l'action d'une température élevée, d'une forte pression et de l'absence de contact avec l'air.

I.3.2. L'énergie fissile

L'énergie fissile désigne l'énergie produite lors de la réaction de fission du noyau atomique de matériaux radioactifs tels que l'uranium ou le plutonium. Cette réaction n'émet pas directement de gaz à effet de serre mais produit des déchets radioactifs.

I.4. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont, à notre échelle de temps, celles qui sont dispensées continûment par la nature. Elles sont issues du rayonnement solaire, du noyau terrestre et des interactions gravitationnelles de la lune et du soleil avec les océans. On distingue les énergies renouvelables d'origine éolienne, solaire, hydraulique, géothermique et issues de la biomasse [3].

I.5. Les chaînes de production de l'électricité

Le cycle de production de l'électricité le plus répandu nécessite de disposer d'une source de chaleur permettant de chauffer de l'eau afin d'obtenir de la vapeur sous pression. Cette vapeur, en se détendant dans une turbine, entraîne un alternateur qui génère de l'électricité. Après turbinage, cette vapeur est condensée au moyen d'une source froide (cours d'eau, mer). La figure I.1 représente le cycle de production classique de l'électricité [1].

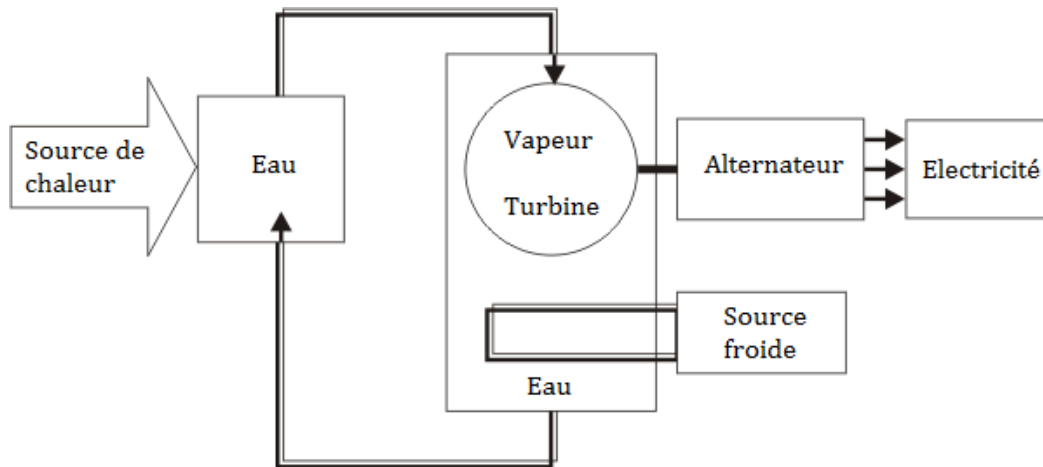


Figure I.1: Cycle classique de production de l'électricité.

Lorsque la chaleur dégagée par la condensation de la vapeur est récupérée pour des besoins de chauffage, on parle de cogénération.

La source de chaleur est obtenue par la combustion de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou par une réaction de fission nucléaire dans des réacteurs.

Les combustibles fossiles, utilisés dans ces cycles classiques peuvent être remplacés par certaines sources d'énergie renouvelable (biomasse, géothermie, solaire)

Avec certaines énergies renouvelables, la chaîne de production de l'électricité ne nécessite pas de source de chaleur. C'est le cas des énergies éolienne, hydraulique et solaire photovoltaïque.

Dans le cas des énergies éolienne et hydraulique, c'est la pression du vent ou de l'eau qui entraîne la rotation d'une turbine entraînant à son tour un alternateur produisant de l'électricité. La figure I.2 représente cette chaîne de conversion énergétique.

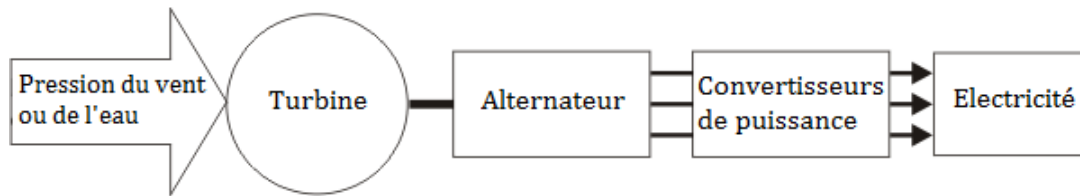


Figure I.2: Chaîne éolienne ou hydraulique de production d'électricité.

Dans le cas de l'énergie solaire photovoltaïque, l'électricité est produite directement par effet photoélectrique, au moyen de cellules au silicium, à partir de la lumière provenant du rayonnement solaire. Des convertisseurs de puissance sont généralement utilisés pour assurer l'optimisation de la conversion énergétique. La figure I.3 représente cette chaîne de conversion énergétique.

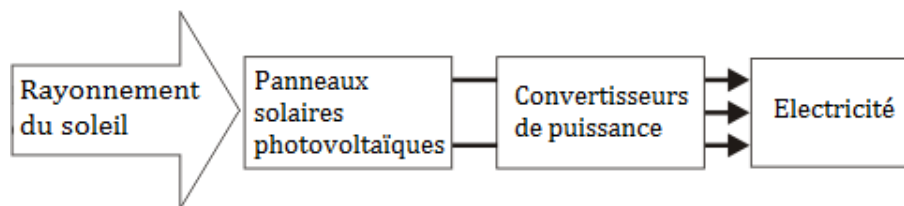


Figure I.3: Chaîne solaire photovoltaïque de production de l'électricité.

L'électricité peut également être produite au moyen d'un moteur diesel ou d'une turbine à gaz entraînant un alternateur. La source d'énergie primaire est généralement constituée de combustibles fossiles, mais il est envisageable de les remplacer par un biocarburant ou un biogaz [1].

- **Les biocarburants** sont des carburants de substitution obtenus à partir de la biomasse, c'est-à-dire de matière première d'origine végétale, animale ou issue de déchets. Ils sont généralement incorporés dans les carburants d'origine fossile.
- **Le biogaz** est le gaz produit par la fermentation de matières organiques animales ou végétales en l'absence d'oxygène. Ce processus, aussi appelé méthanisation, a lieu spontanément dans les décharges stockant des déchets organiques par exemple, ou artificiellement dans des digesteurs.

CHAPITRE 2:

Les centrales thermiques

II.1. Introduction

La production d'électricité à partir des centrales thermiques est la plus répandue et la plus ancienne dans le monde. En effet, le gaz, le charbon et le fioul, utilisés comme combustibles, sont des ressources naturelles abondantes. Les centrales thermiques, grâce à leur flexibilité et réactivité, constituent l'un des moyens les plus efficaces pour faire face aux variations de la demande d'électricité, et notamment aux pics de consommation. Elles sont capables de produire de l'électricité très rapidement et peuvent donc être sollicitées à tout moment.

II.2. Principe de fonctionnement d'une centrale thermique

Les centrales thermiques fonctionnent à partir de ressources naturelles: charbon, fioul ou gaz. Le combustible, une fois brûlé, chauffe l'eau située dans des tubes qui tapissent les parois de la chaudière. La chaleur transforme ainsi l'eau en vapeur pressurisée, qui actionne la turbine, qui elle-même entraîne l'alternateur (Figure II.1).

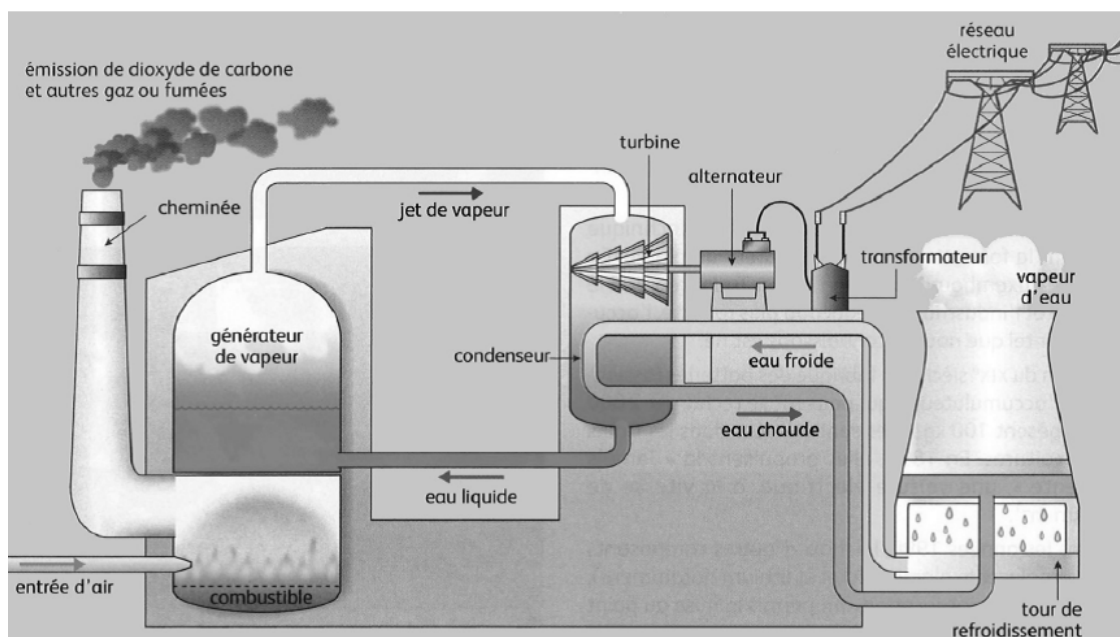


Figure II.1: Centrale thermique [4].

La centrale produit alors de l'électricité à partir de la dilatation de la vapeur. Ensuite la vapeur est refroidie en eau par un condenseur, puis renvoyée vers la chaudière pour un nouveau cycle.

II.2.1. La combustion

Un combustible (gaz, charbon, fioul) est brûlé dans les brûleurs (Figure II.2.a) d'une chaudière pouvant atteindre jusqu'à 90 mètres de hauteur et un poids de 9000 tonnes. Dans les centrales à charbon, le combustible est broyé sous forme de poudre, puis brûlé dans la chaudière pour dégager de la chaleur. Dans les centrales au fioul, le combustible est chauffé pour le rendre liquide puis vaporisé en fines gouttelettes puis injecté par les brûleurs dans la chaudière. Quant au gaz, il est utilisé sous deux formes: naturel pour les cycles combinés au gaz naturel ou sidérurgique pour les centrales traditionnelles.

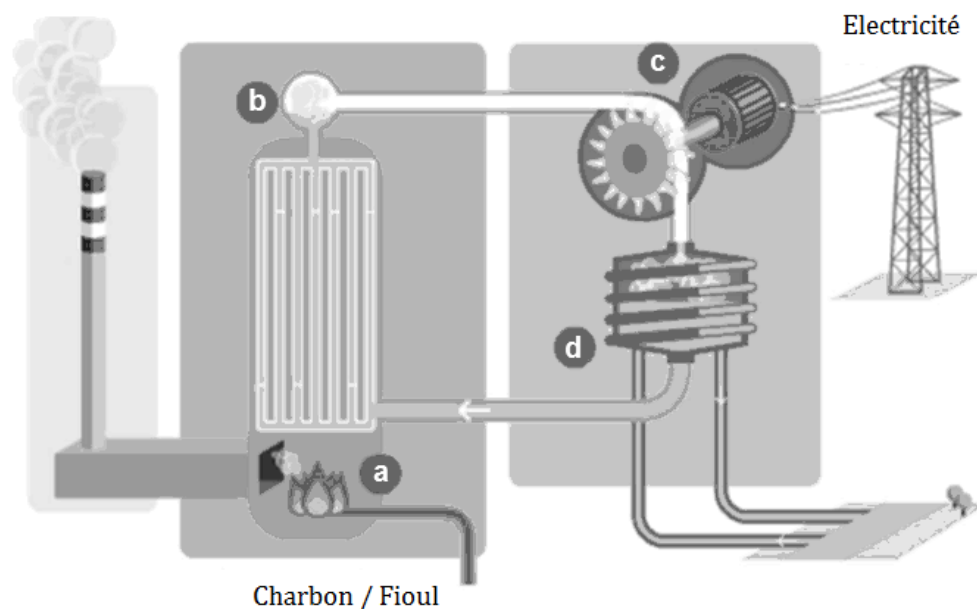


Figure II.2: Fonctionnement d'une centrale thermique.

II.2.2. La production de la vapeur

La chaudière est tapissée de tubes à l'intérieur desquels circule l'eau froide. Sous l'effet de la chaleur, l'eau se transforme en vapeur de pression élevée qui est alors envoyée vers les turbines, où sa dilatation entraîne la rotation de cette dernière (Figure II.2.b).

II.2.3. 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 de puissance augmente la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à très haute et haute tension (Figure II.2.c).

II.2.4. Le recyclage

La vapeur qui a été utilisée est envoyée vers un condenseur, dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve. Au contact de celle-ci, la vapeur se transforme en eau, qui est récupérée et envoyée à nouveau dans la chaudière pour recommencer un autre cycle. L'eau utilisée pour le refroidissement est restituée au milieu naturel ou renvoyée dans le condenseur (Figure II.2.d).

II.3. La turbine à combustion

Dans une turbine à combustion (TAC), l'électricité est générée grâce à la circulation de gaz d'échappement issus d'une chambre de combustion et traversant directement la turbine. La chambre de combustion est le plus souvent interne à la turbine, elle génère de la chaleur à partir d'un mélange d'air initialement comprimé et de fioul ou de gaz (Figure II.3.). Alors que le fioul apporte une sécurité de fourniture, le développement des TAC gaz est aujourd'hui privilégié, notamment pour des raisons environnementales (émissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants moindres). Ce type de centrale démarre en seulement quelques minutes. L'intérêt de la cogénération sur les TAC réside dans la haute température des fumées de combustion, dont la chaleur peut être récupérée et valorisée sans affecter la production électrique.

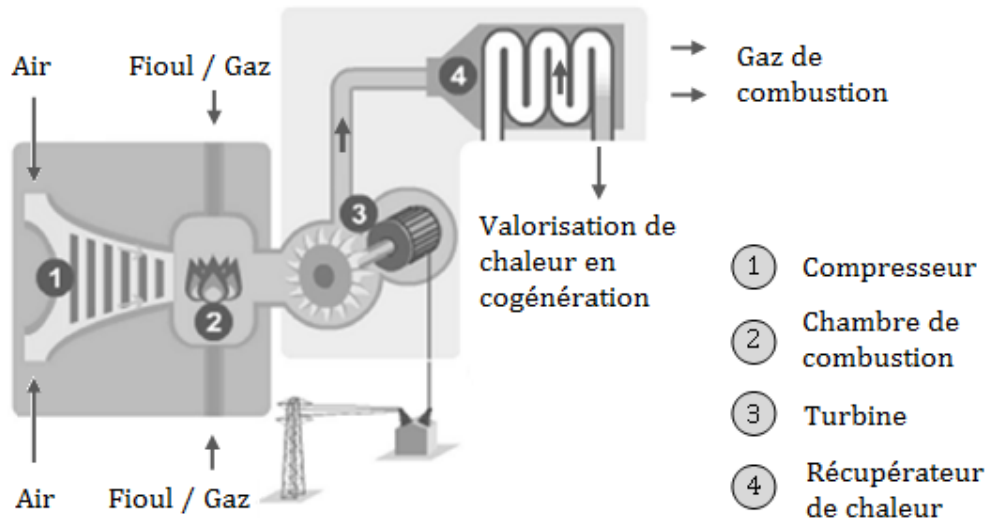


Figure II.3: Turbine à combustion.

II.4. Le cycle combiné au gaz naturel

Un cycle combiné consiste à produire de l'électricité sur deux cycles successifs. Le premier cycle est semblable à celui d'une TAC: le gaz brûlé en présence d'air comprimé actionne la rotation de la turbine reliée à l'alternateur. Dans le second cycle, la chaleur récupérée en sortie de la TAC alimente un circuit vapeur qui produit également de l'électricité avec une turbine à vapeur (TAV) (Figure II.4).

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

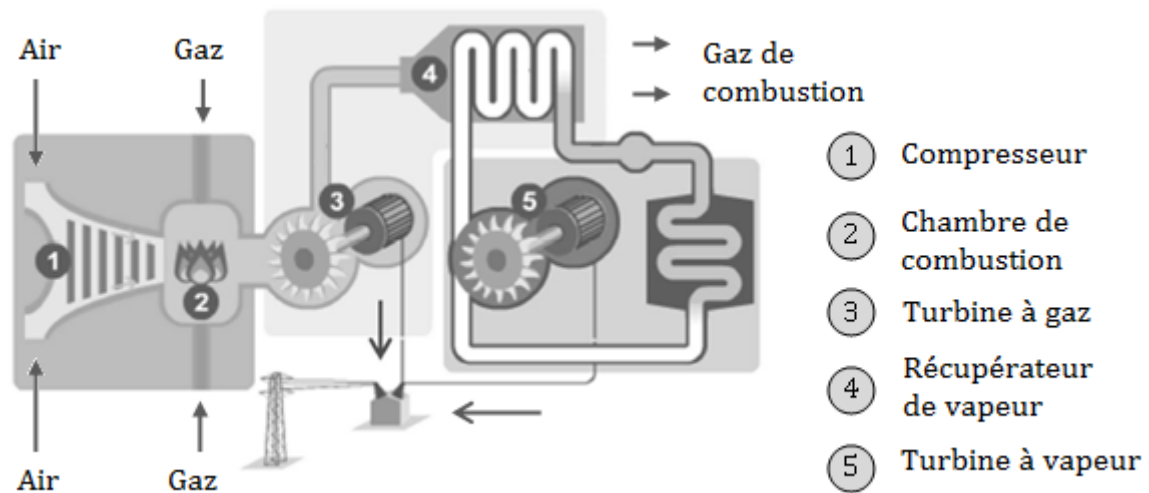


Figure II.4: Cycle combiné au gaz naturel.

II.5. La cogénération

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

Cette production combinée permet d'économiser 15 à 20% d'énergie primaire par rapport à la production séparée des mêmes quantités de chaleur et d'électricité. En outre, elle réduit de façon significative les émissions de CO₂ par kWh produit. La cogénération est donc une manière de valoriser les pertes d'énergie et d'optimiser l'efficacité énergétique d'un système.

II.6. Impact sur la qualité de l'air

Selon le combustible utilisé et le mode de combustion, les centrales thermiques émettent des oxydes d'azotes (NO_x), du dioxyde de carbone (CO₂), du dioxyde de soufre (SO₂) et des poussières. Plusieurs techniques ont été développées pour réduire ses émissions atmosphériques [5], on peut citer:

- la désulfuration des fumées de charbon, ou lavage des fumées, permet de réduire les émissions de dioxyde de soufre;
- la dénitrification réduit des émissions d'oxyde d'azote;
- les dépoussiéreurs éliminent une quantité importante des poussières;
- l'utilisation de combustibles de meilleure qualité, des charbons moins cendreaux des fiouls à basse teneur en soufre.

CHAPITRE 3:

Les groupes électrogènes

III.1. Introduction

Les groupes électrogènes figurent parmi les différents moyens de production d'électricité. La plupart des groupes sont constitués d'un moteur à gaz ou moteur diesel (moteur thermique) qui entraîne 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 (méga-voltampère) selon la puissance. Les unités de production d'électricité les plus puissantes sont mues par des turbines à gaz ou de gros moteurs diesel.

III.2. Principe de fonctionnement d'un groupe électrogène

La production d'électricité par un groupe électrogène doit être autonome et ne nécessite qu'un approvisionnement en carburant loin de toute source d'énergie. L'électricité est toujours produite par une génératrice dynamo qui produit un courant continu ou alternateur qui produit du courant alternatif. Pour produire le courant, cette génératrice doit recevoir un mouvement rotatif de son arbre d'entraînement, ce mouvement est produit par un moteur thermique essence, GPL ou diesel équipé d'une régulation mécanique modulant sa vitesse de rotation en fonction de la charge. L'accouplement entre le moteur et l'alternateur est direct sur l'axe moteur par opposition à l'alternateur d'une automobile qui est entraîné par une courroie. Le rôle des composants auxiliaires du groupe électrogène est de moduler la puissance du moteur thermique en fonction de la demande en courant électrique [6].

III.3. Les modes de production d'énergie électrique moyennant le groupe électrogène

III.3.1. La production d'énergie électrique de secours

Les groupes électrogènes de secours sont destinés à approvisionner un établissement en courant électrique en cas de panne du réseau public. Ces installations se mettent automatiquement en route dès qu'une interruption de l'alimentation électrique apparaît. En cas normal, ils se trouvent dans un mode «stand-by». Les groupes électrogènes ne sont pas destinés à couvrir les pointes du courant électrique du réseau public et ne fonctionnent donc que quelques heures par année. L'application de ces groupes électrogènes a lieu dans les établissements où une interruption du courant électrique peut provoquer des nuisances pour les êtres humains. Ils sont mis en place dans des lieux où les pannes de courant induisent une mise en danger de vies humaines (hôpitaux, les maisons de soins, les maisons de retraite, etc.) ou des pertes de productivité (banques ou data-centers).

III.3.2. La production d'énergie électrique de pointe

Le groupe électrogène de pointe est appliqué pour couvrir les pointes du réseau électrique. Dans sa fonction normale, il se trouve en mode «stand-by», et n'entre en activité que pour compenser les pointes de consommation électrique. Une première application du groupe électrogène de pointe est la production du courant électrique pour couvrir les besoins propres en énergie électrique d'un établissement dans le cas d'une pointe de consommation à fournir par le réseau de distribution public.

Une deuxième application du groupe électrogène de pointe se trouve dans l'injection d'énergie électrique dans le réseau de distribution public. Dans ce cas le distributeur demande au client d'injecter du courant dans son réseau. L'énergie ainsi produite est vendue à prix élevé.

III.3.3. La production d'énergie électrique

Le groupe électrogène servant à la production d'énergie peut alimenter un réseau de distribution privé ou publique. Ce type d'installation trouve son application sur des sites où le réseau de distribution publique est inexistant et/ou techniquement ou

économiquement impossible à mettre en place, tel qu'en montagne, ou encore dans une mine. En principe, la durée de fonctionnement annuelle de ces groupes électrogènes est souvent assez élevée.

III.4. Pollution, santé et sécurité

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 diesel produisent aussi des particules qui sont nocives pour les voies respiratoires. Le fonctionnement d'un groupe électrogène peut poser des problèmes sur la qualité de l'eau et de l'air, ainsi que des nuisances sonores, ce qui dégrade les conditions de vie à son alentour [7].

CHAPITRE 4:

Les centrales nucléaires

IV.1. Introduction

Une centrale nucléaire est un site industriel destiné à la production d'électricité. Elle utilise pour cela la chaleur libérée par l'uranium qui constitue le combustible nucléaire. L'objectif est de faire chauffer de l'eau afin d'obtenir de la vapeur. La pression de la vapeur d'eau entraîne ensuite en rotation une turbine accouplée à un alternateur qui produit à son tour de l'électricité.

IV.2. Energie libérée par la fission atomique

Lorsque le noyau d'un atome subit la fission, il se sépare en deux. La masse totale des deux atomes ainsi formés est habituellement différente de celle de l'atome original. S'il y a une diminution de la masse, une quantité d'énergie est libérée. Sa valeur est donnée par la formule d'Einstein:

$$E = mc^2$$

où

E = énergie libérée en joules [J]

m = diminution de masse, en kilogrammes [kg]

c = vitesse de la lumière [3×10^8 m/s]

La quantité de l'énergie libérée est énorme, car une diminution de 1mg seulement donne une énergie de 9×10^{10} joules, soit l'équivalent énergétique de trois tonnes de charbon. Lors de la fission de l'atome d'uranium ^{235}U , il se produit précisément une légère diminution de masse. Par ailleurs, comme l'uranium 235 est fissile alors que l'uranium 238 ne l'est pas, on a construit des grandes usines pour augmenter la proportion d'uranium 235 dans le combustible (fuel enrichi) utilisé dans certains réacteurs [8].

IV.3. Source de l'uranium

L'uranium utilisé dans les réacteurs nucléaires trouve son origine dans les mines d'uranium. Le minerai brut contient la substance U_3O_8 (3 atomes d'uranium, 8 atomes

d'oxygène) contenant à son tour des atomes ^{238}U et ^{235}U dans le rapport de 1398 à 10. Pour usage dans un réacteur nucléaire, on doit transformer cette substance en dioxyde d'uranium (UO_2). Celui-ci est composé de molécules $^{238}\text{UO}_2$ et $^{235}\text{UO}_2$, encore dans le rapport de 1398 à 10. On l'appelle dioxyde d'uranium naturel parce que le rapport des molécules fissiles est le même que celui du minerai original. Certains réacteurs sont conçus pour utiliser un mélange enrichi où le rapport de $^{238}\text{UO}_2$ sur $^{235}\text{UO}_2$ est plutôt de 1398 à 50 au lieu du rapport naturel de 1398 à 10. Au cours de processus d'enrichissement, de grandes quantités de $^{238}\text{UO}_2$ sont dérivées comme produit secondaire que l'on doit entreposer [8].

IV.4. La réaction de fission nucléaire

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

IV.5. Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire

Dans les centrales nucléaires, relevant de la filière à eau sous pression, la production d'électricité, ainsi que le refroidissement et l'évacuation de la chaleur, s'effectuent selon le processus suivant:

Circuit primaire: pour extraire la chaleur

L'uranium, légèrement "enrichi" dans sa variété, est conditionné sous forme de petites pastilles. Celles-ci sont empilées dans des gaines métalliques étanches réunies en assemblages. Placés dans une cuve en acier remplie d'eau, ces assemblages forment le cœur du réacteur. Ils sont le siège de la réaction en chaîne, qui les porte à haute température. L'eau de la cuve s'échauffe à leur contact (plus de 300°C). Elle est maintenue sous pression (155 bars), ce qui l'empêche de bouillir, et circule dans un circuit fermé appelé circuit primaire (Figure IV.1.a).

Circuit secondaire: pour produire la vapeur

L'eau du circuit primaire transmet sa chaleur à l'eau circulant dans un autre circuit fermé: le circuit secondaire (Figure IV.1.b). Cet échange de chaleur s'effectue par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. Au contact des tubes parcourus par l'eau du circuit primaire, l'eau du circuit secondaire s'échauffe à son tour et se transforme en vapeur. Cette vapeur fait tourner la turbine entraînant l'alternateur qui produit l'électricité. Après son passage dans la turbine, la vapeur est refroidie, retransformée en eau et renvoyée vers le générateur de vapeur pour un nouveau cycle.

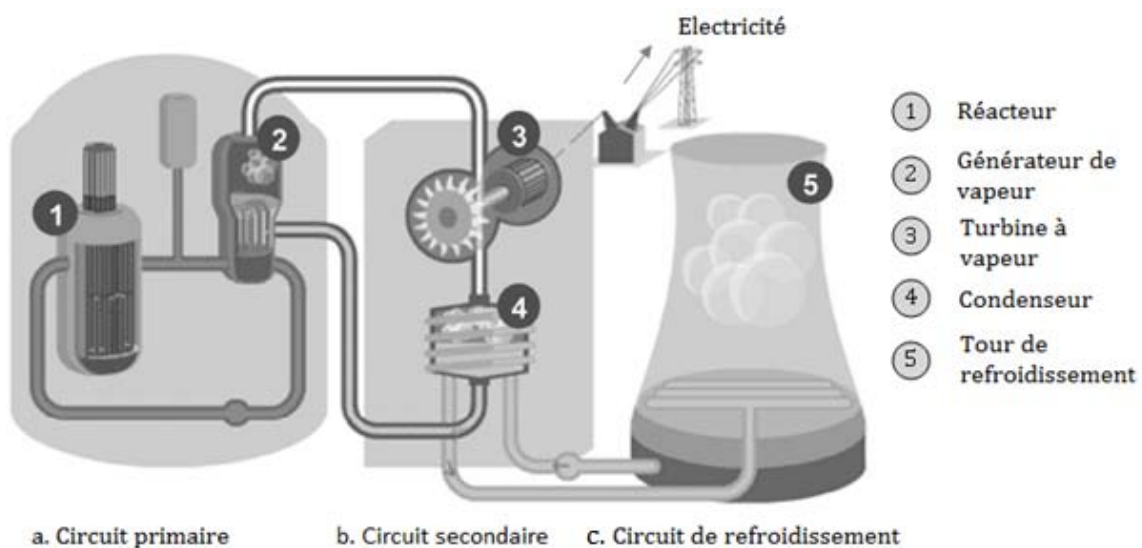


Figure IV.1: Fonctionnement d'une centrale nucléaire.

Circuit de refroidissement: pour condenser la vapeur et évacuer la chaleur

Pour que le système fonctionne en continu, il faut assurer son refroidissement. C'est le but d'un troisième circuit indépendant des deux autres, le circuit de refroidissement (Figure IV.1.c). Sa fonction est de condenser la vapeur sortant de la turbine. A cet effet est placé un condenseur, appareil formé de milliers de tubes dans lesquels circule de l'eau froide prélevée à une source extérieure: rivière ou mer. Au contact de ces tubes, la vapeur se condense pour se transformer en eau. Quant à l'eau du condenseur, elle est rejetée, légèrement échauffée, à la source d'où elle provient. Si le débit de la rivière est trop faible, ou si l'on veut limiter son échauffement, on utilise des tours de refroidissement, ou aéroréfrigérants. L'eau échauffée provenant du condenseur, répartie à la base de la tour, est refroidie par le courant d'air qui monte dans la tour.

L'essentiel de cette eau retourne vers le condenseur, une petite partie s'évapore dans l'atmosphère, ce qui provoque des panaches blancs caractéristiques des centrales nucléaires.

IV.6. Types de réacteurs

Il existe plusieurs types de réacteurs; en voici les principaux [8]:

a. Réacteur à eau pressurisée

Dans ces réacteurs, le caloporteur est de l'eau gardée à haute pression afin de l'empêcher de bouillir. On peut utiliser soit de l'eau ordinaire, soit de l'eau lourde.

b. Réacteur à eau bouillante

Dans ces réacteurs, le caloporteur est de l'eau ordinaire en ébullition. On élimine ainsi l'échangeur de chaleur: la vapeur créée fait tourner directement les turbines. Cependant, comme dans tout réacteur à eau légère, on doit utiliser de l'oxyde d'uranium enrichi ayant une concentration d'environ 3% en ^{235}U .

c. Réacteur à gaz à haute température

Dans ces réacteurs, on utilise un gaz inerte, tel que l'hélium, comme caloporteur. Comme la température est très élevée (750°C), on utilise le graphite comme modérateur. La vapeur créée dans l'échangeur de chaleur est aussi chaude que celle provenant d'une centrale thermique conventionnelle de sorte qu'on atteint, avec ces réacteurs, des rendements globaux de l'ordre de 40%.

d. Réacteur surrégénérateur

Dans ces réacteurs, on élimine le modérateur, ce qui permet aux neutrons de bombarder à haute vitesse un combustible tel que le dioxyde d'uranium $^{238}\text{UO}_2$. Il se produit alors un dégagement de chaleur et, de plus, une transformation de l'uranium. L'uranium transformé peut à son tour agir comme combustible. Ce genre de réacteur est donc très intéressant, car les réacteurs traditionnels ne récupèrent que 2% de l'énergie disponible dans le dioxyde d'uranium.

CHAPITRE 5:

Les centrales hydrauliques

V.1. Introduction

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

V.2. Puissance disponible

La puissance que l'on peut tirer d'une chute dépend non seulement de la hauteur de la chute, mais aussi du débit du cours d'eau. Le choix de l'emplacement d'une centrale hydroélectrique dépend donc de ces deux facteurs.

La puissance disponible tirée de la chute de la masse d'eau est donnée par:

$$P = 9,8qh$$

où

P = puissance hydraulique disponible, en kilowatts [kW];

q = débit moyen, en mètres cubes par seconde [m^3/s];

h = hauteur de la chute, en mètres [m].

À cause des pertes, la puissance mécanique que l'on peut recueillir sur l'arbre de la turbine est inférieure à la puissance fournie par l'eau. Cependant, le rendement des turbines hydrauliques est élevé: de l'ordre de 80 à 94% pour les grosses unités. Dans les alternateurs, la transformation de la puissance se fait avec un rendement de 95 à 98% [8].

V.3. Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

Une centrale hydraulique produit de l'électricité grâce à une chute d'eau entre deux niveaux de hauteurs différentes, qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur (Figure V.1).

La retenue de l'eau: le barrage retient l'écoulement naturel de l'eau. De grandes quantités d'eau s'accumulent et forment un lac de retenue.

La conduite forcée de l'eau: une fois l'eau stockée, des vannes sont ouvertes pour que l'eau s'engouffre dans de longs tuyaux métalliques appelés conduites forcées. Ces tuyaux conduisent l'eau vers la centrale hydraulique, située en contrebas.

La production d'électricité: à la sortie de la conduite, dans la centrale, la force de l'eau fait tourner une turbine qui fait à son tour, fonctionner un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. 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.

L'adaptation de la tension: un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à très haute et haute tension. L'eau turbinée qui a perdu de sa puissance rejoint la rivière par un canal spécial appelé canal de fuite.

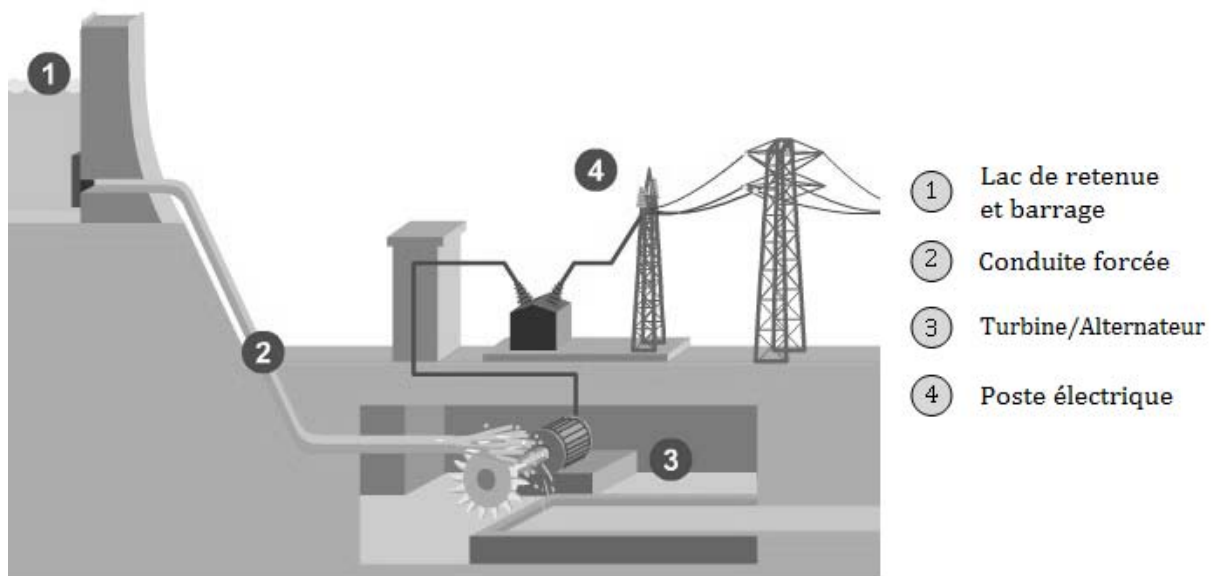


Figure V.1: Fonctionnement d'une centrale hydraulique.

V.4. Types de centrales hydrauliques

Il existe 3 grandes catégories d'aménagements hydrauliques:

1. Les centrales de haute chute: Elles se trouvent dans les sites de haute montagne. Elles sont caractérisées par un débit faible et un dénivelé très fort avec une chute supérieure à 300 m. Le barrage s'oppose à l'écoulement naturel de l'eau pour former un lac de retenue. Ce lac est alimenté par l'eau des torrents, la fonte des neiges et des glaciers. Les centrales de lac utilisent des turbines de type Pelton.

2. Les centrales de moyenne chute: Elles sont surtout installées en moyenne montagne et dans les régions de bas relief. Ces centrales sont alimentées par l'eau retenue derrière un barrage construit dans le lit d'une rivière de région montagneuse. Elles sont caractérisées par un réservoir de grande capacité avec une chute comprise entre 30 et 300 m. Les centrales d'écluse utilisent des turbines de type Francis.

3. Les centrales de basse chute: Elles sont implantées sur le cours de grands fleuves ou de grandes rivières. Elles sont caractérisées par un débit très fort et un dénivelé faible 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. Les centrales au fil de l'eau utilisent des turbines de type Kaplan.

V.4. Parties principales d'une centrale hydraulique

Une centrale hydroélectrique comporte essentiellement [8]:

1. le barrage de retenue et le déversoir:

Les barrages de retenue sont établis en travers du lit des rivières; ils servent à concentrer les chutes près des usines et à former des réservoirs d'eau pour compenser l'insuffisance de débit pendant les périodes de sécheresses et assurer à l'usine une alimentation en eau plus uniforme. Les déversoirs (ou évacuateurs de crue), installés près des barrages sont destinés à laisser passer l'eau lorsque son niveau dépasse une certaine hauteur.

2. La conduite d'amenée:

La conduite d'amenée conduit l'eau du barrage jusqu'aux turbines. A l'extérieur de l'usine, elle est constituée soit par un canal, un tunnel ou un tuyau. La partie intérieure, appelée conduite forcée, est en béton, en acier ou en fonte. On dispose, à l'entrée de la

conduite forcée, des vannes qui permettent de contrôler l'admission de l'eau. A la sortie de la conduite forcée des aménagements à moyenne et basse chute, l'eau arrive dans la chambre de mise en charge d'où elle est distribuée aux différentes turbines.

3. La conduite d'échappement:

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

4. La salle de commande:

Les appareils de commande et de contrôle sont groupés ensemble dans une salle à partir de laquelle le personnel peut surveiller la marche des groupes générateurs.

VI.1. Introduction

L'énergie éolienne est l'énergie produite par le vent. Une éolienne est une machine permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de type éolienne. Cette énergie mécanique éolienne a été utilisée au cours des siècles pour pomper l'eau ou moudre le grain. Les machines actuelles sont utilisées pour produire de l'électricité de type éolienne qui est consommée localement (sites isolés), ou injectée sur le réseau électrique (éoliennes connectées au réseau).

VI.2. Origine du vent

Le rayonnement du soleil et la rotation de la terre (hémisphère irradié, hémisphère dans l'obscurité) sont à l'origine d'écarts de pression atmosphérique qui s'établissent à proximité de la surface ou en basse altitude. Les masses d'air s'écoulent alors, avec une vitesse plus ou moins élevée, des régions ou zones de forte pression vers les zones de plus faible pression. Ces masses d'air emportent avec elles une énergie cinétique qui peut être considérable, proportionnelle à la masse volumique de l'air, aux volumes échangés et au carré de la vitesse du vent. Les caractéristiques du vent, telles que la vitesse, la direction et les fluctuations, sur une période (par exemple, un jour, un mois, une année) sont des informations essentielles qui caractérisent le gisement éolien. Le gisement éolien est globalement bien réparti à la surface des différents continents et des océans. En mer, le vent est plus fort [9].

VI.3. Composition d'une éolienne

La force du vent fait tourner deux ou trois pales montées sur un rotor. Ce rotor est solidaire d'un axe qui fait tourner une génératrice et produit de l'électricité. La plupart des éoliennes sont montées sur un mât afin de capter une plus grande quantité d'énergie provenant du vent. Une éolienne comprend essentiellement trois éléments, les pales, l'axe et la génératrice (Figure VI.1).

1. Les ailes ou pales d'une éolienne: Les pales constituent des obstacles pour le vent. Lorsque le vent force les pales à tourner, une partie de l'énergie du vent est transférée au rotor. Les pales de l'hélice d'une éolienne peuvent être en bois lamellé-collé, en plastique renforcé de fibre de verre, ou en métal. Le diamètre qu'elles balaient varie de 40 m à 120 m.

2. La tour ou le mât d'une éolienne: L'hélice de l'éolienne est située en haut d'une tour de 50 m à 110 m. le mât peut être des assemblages de traverses métalliques, en béton ou en métal.

3. La partie électrique d'une éolienne

Dans les éoliennes destinées à produire de l'électricité, l'hélice fait tourner un générateur électrique situé en haut de la tour, dans le prolongement de l'axe de l'hélice de l'éolienne. Entre l'hélice et le générateur électrique de l'éolienne se trouve en général un multiplicateur de vitesse, car l'hélice de l'éolienne tourne à des vitesses d'environ 100 à 650 tours min alors qu'un générateur électrique doit être entraîné à environ 1500 à 3000 tours min.

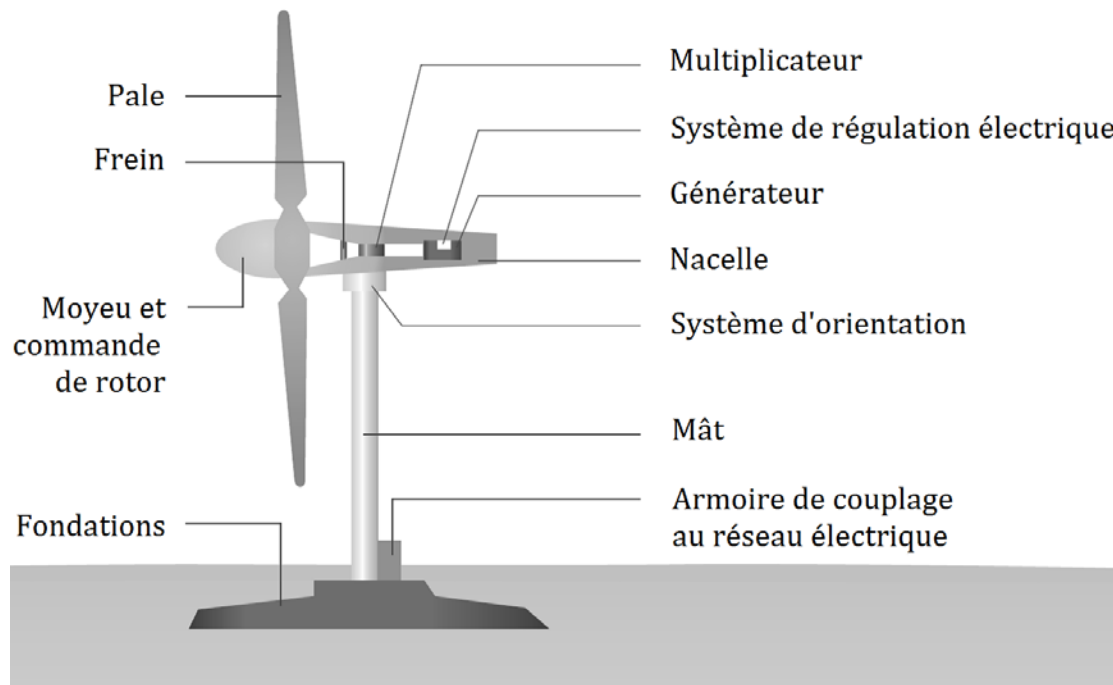


Figure VI.1: Schéma d'une éolienne.

IV.4. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Le principe de fonctionnement d'une éolienne est relativement simple: La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique se fait en deux étapes: au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique [10]. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne.

IV.5. Parc éolien

Un parc éolien, ou une ferme éolienne, est un site regroupant plusieurs éoliennes produisant de l'électricité. Il se trouve en général dans un lieu où le vent est fort et/ou régulier. Une ferme éolienne sur terre est constituée de plusieurs éoliennes distantes entre elles d'au moins 200 m. Bien que chaque machine ait une faible empreinte au sol, il faut disposer d'une superficie de l'ordre de 10 hectares pour un parc éolien significatif. On distingue deux types de parc éolien, on shore (sur terre) figure VI.2a ou offshore (sur la mer) figure VI.2b. Ces dernières présentent des avantages au niveau des nuisances sonores puisqu'elles sont éloignées des habitations et au niveau des vents car les vents marins sont plus nombreux et plus forts que les vents continentaux. En revanche, elles sont beaucoup plus difficiles à installer et donc beaucoup plus coûteuses.



(a)



(b)

Figure VI.2: Parc éolien: On shore (a), Off shore (b).

VI.6. Turbines éoliennes

VI.6.1. Eoliennes à axe horizontal

La plupart des éoliennes actuellement installées sont des éoliennes à axe horizontal (Figure VI.3). L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique au moyen de pales. L'assemblage de plusieurs pales sur un axe de rotation constitue la turbine. Les éoliennes à axe horizontal comprennent une à trois pales profilées aérodynamiquement [1].



Figure VI.3: Eoliennes à axe horizontal.



Figure VI.4: Eoliennes à axe vertical.

VI.6.2. Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical captent la vitesse du vent quelle que soit sa direction (Figure VI.4). Il n'est donc pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor

comme pour les éoliennes à axe horizontal. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol et présentent de fortes turbulences compte tenu du fort impact du relief, ce qui affaiblit la puissance générée par rapport à une captation centralisée à plus grande hauteur [1].

VII.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, entraînant une abondance de charges libres origine d'un courant électrique.

VII.2. L'énergie solaire photovoltaïque

Parmi les sources d'énergie ne faisant pas appel aux gisements fossiles, l'électricité photovoltaïque est la plus récente de toutes. Les cellules solaires (ou photopiles) convertissent directement l'énergie solaire en électricité sous forme de courant continu [11]. On distingue trois grands types d'applications susceptibles d'être alimentées par l'énergie photovoltaïque, à savoir :

- les systèmes de production autonomes pour l'alimentation de sites ou d'équipements isolés et non raccordés au réseau électrique;
- les systèmes de pompage pour l'adduction d'eau;
- les systèmes de production raccordés au réseau de distribution de l'électricité.

VII.3. La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque (ou photopile) est un dispositif qui transforme l'énergie lumineuse en courant électrique. La première photopile a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés," une technique appelée le "dopage" qui est utilisée dans tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles

représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.

VII.3.1. Principaux types de cellules solaires

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût.

Silicium monocristallin

Ce sont les premières cellules élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules [1]. Ces cellules ont un aspect uniforme, de couleur gris bleuté, ou noir. Leur rendement normalisé est de 12 à 20 %. Elles ont une durée de vie élevée de plus ou moins 30 ans, mais leur prix est nettement élevé.

Silicium polycristallin

Les cellules sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en plusieurs cristaux dont les orientations sont différentes. Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est souvent bleu avec des motifs montrant de gros cristaux enchevêtrés. Leur durée de vie est également de plus ou moins 30 ans. Leur rendement est de l'ordre de 11 à 15 % mais elles engendrent un coût de production moins élevé que les cellules monocristallines.

Silicium amorphe

Ces cellules sont composées d'un support, en verre ou en matière synthétique, sur lequel est disposée une fine couche de silicium amorphe (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal). Le rendement de cette technologie est de l'ordre de 5 à 10%, plus bas que celui des cellules cristallines mais leur prix est bas et permet, à condition d'occuper plus de superficie, de produire une électricité relativement bon marché.

VII.3.2. L'effet photovoltaïque

Lorsqu'une cellule photovoltaïque est soumise au flux lumineux incident, elle va interagir de telle façon qu'une partie du flux soit:

- réfléchit;

- diffusé;
- absorbé;
- transmis.

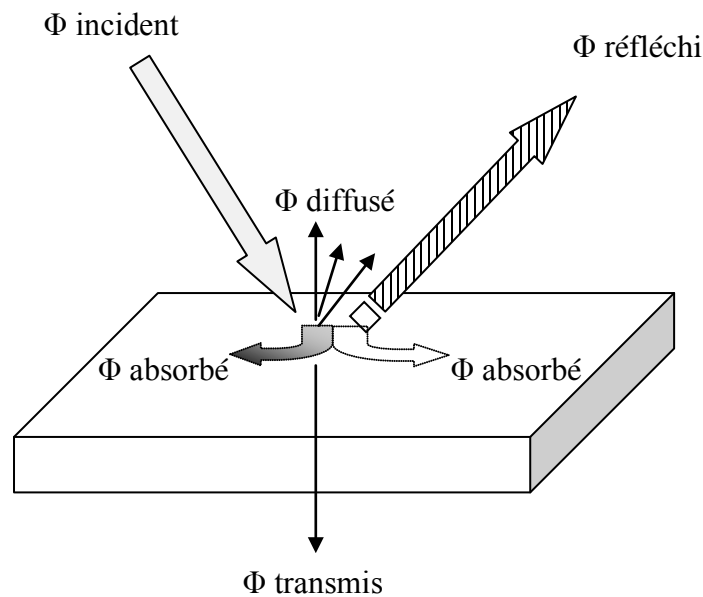


Figure VII.1: interaction d'une cellule photovoltaïque avec le flux lumineux.

Les cellules PV doivent absorber au maximum le flux incident. Cela se fait en diminuant les facteurs de réflexion et de transmission. Cependant, la cellule ne va pas absorber tout le rayonnement solaire.

Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur, ces deux couches sont dopées différemment:

- une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N);
- une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P).

Ces deux couches présentent une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel séparant les couches N et P, d'être attirés par la couche chargée positivement P et donc d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposés par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux (Figure VII.2). Une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée.

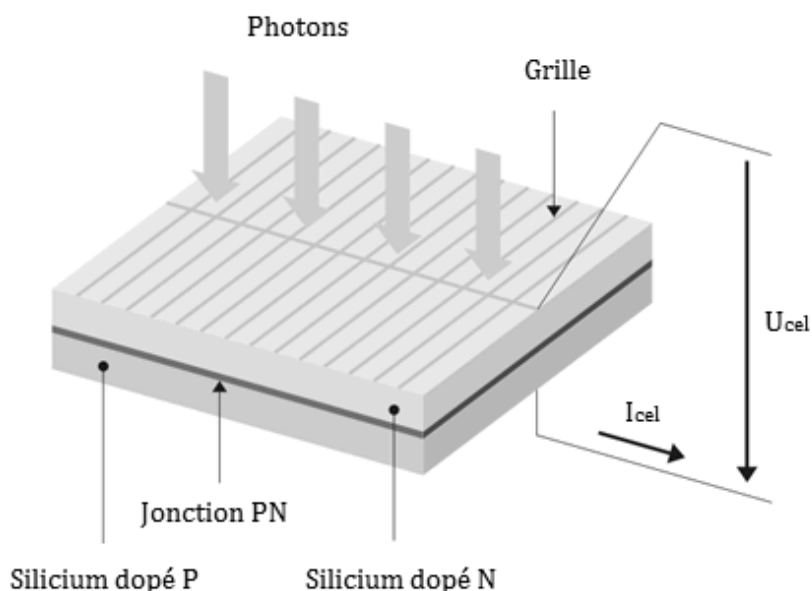


Figure VII.2: Cellule photovoltaïque.

VII.3.3. Principe de fonctionnement

La cellule constituée de deux couches minces, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction PN a été formée. Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière. Sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés/décrochés ". Si l'électron revient à son état initial, le mouvement d'agitation de l'électron provoque un échauffement du matériau. Ainsi, l'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique: c'est l'effet photovoltaïque.

VII.3.4. Caractéristique courant-tension I(V)

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

- Sa tension à vide: V_{co} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée;
- Son courant de court-circuit: I_{cc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même;
- Son point de puissance maximal: P_c (point de fonctionnement à puissance crête) obtenu pour une tension et un courant optimaux: V_c, I_c .

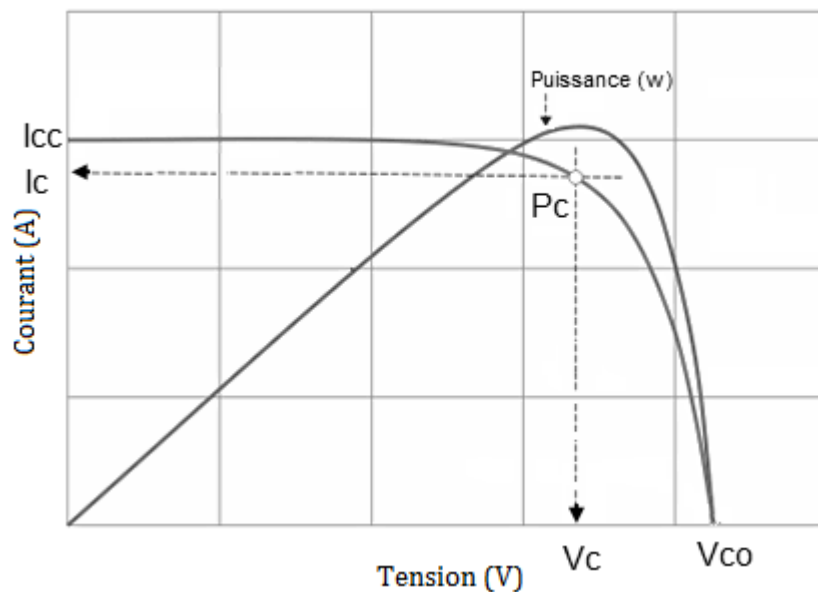


Figure VII.3: Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

En traçant la caractéristique en puissance $P=f(U)$ pour des conditions d'éclairage et de température données on peut mettre en évidence un point de puissance maximal (ou crête) nommée P_c , et qui correspond à un optimum d'utilisation: $P_c = V_c \cdot I_c$

On peut introduire la notion de facteur de forme (ff) qui correspond au ratio de la puissance P_c sur la puissance $P_m = V_{co} \cdot I_{cc}$:

$$ff = \frac{P_c}{P_m} = \frac{V_c \cdot I_c}{V_{co} \cdot I_{cc}}$$

Rendement de conversion η :

Le rendement « η » des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_c}{P_{in}} = \frac{ff \times V_{oc} \times I_{cc}}{P_{in}}$$

P_{in} : Puissance incidente = $P_{solaire} = 100 \text{ W/cm}^2$.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

Le rendement varie généralement entre 8 à 13% pour le silicium mono-cristallin, entre 7 à 11% pour le poly-cristallin et entre 4 et 9% pour la cellule au silicium amorphe.

VII.3.5. Groupement en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné. La figure VII.4 montre la caractéristique résultante (I_s, V_s) obtenue en associant en série (indice s) n_s cellules identiques (I_{cc}, V_{co}).

Avec :

$I_{scc} = I_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{sco} = n_s V_{co}$: la tension de circuit ouvert.

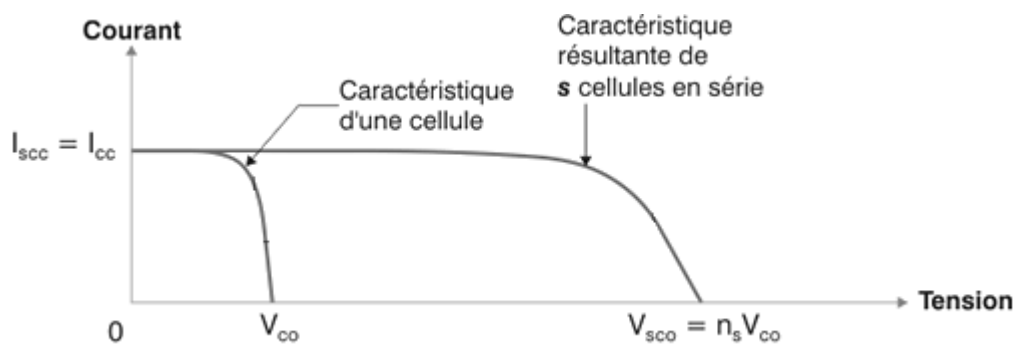


Figure VII.4: Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques.

VII.3.6. Groupement en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent: la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. La figure VII.5 montre la caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco}) obtenue en associant en parallèle (indice p) n_p cellules identiques (I_{cc} , V_{co}).

$I_{pcc} = n_p I_{cc}$: le courant de court-circuit

$V_{pco} = V_{co}$: la tension de circuit ouvert

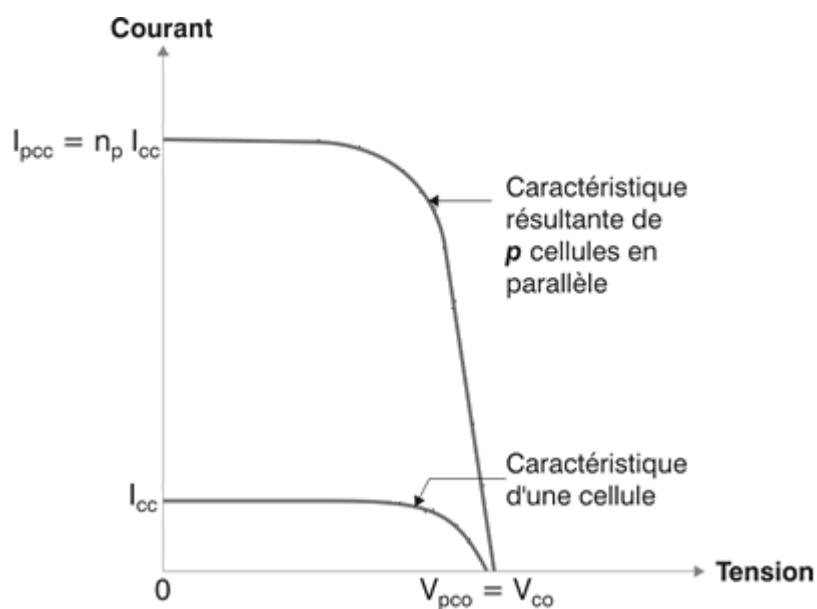


Figure VII.5: Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_s cellules identiques.

VII.4. La centrale solaire

Les centrales solaires peuvent être classées selon deux types par rapport au réseau électrique:

- Les centrales autonomes (non raccordées au réseau);
- Les centrales raccordées au réseau.

VII.4.1. La centrale autonome

Elle est utilisée dans les zones où il n'y a pas de possibilité d'approvisionnement en énergie électrique par un réseau de distribution. Elle alimente généralement des

chalets de montage, des systèmes d'irrigation, des systèmes de signalisation routière, des balises, antennes GSM... ou des systèmes mobiles: bateaux, satellites..... [1].

VII.4.2. La centrale raccordée au réseau

C'est une installation photovoltaïque raccordée au réseau électrique sans ou avec système de stockage. Elle fonctionne « au fil du soleil », c'est-à-dire qu'elle injecte dans le réseau toute la puissance qui peut être captée par les panneaux. La présence d'un système de stockage peut permettre d'assurer une continuité de l'alimentation électrique comme une centrale autonome en cas de coupure d'électricité du côté réseau en adaptant la commande du système. Cependant dans la plupart des pays, la centrale n'a pas l'autorisation de fonctionner lorsque l'on perd le réseau électrique. Ici le réseau électrique peut être considéré comme un appoint. On trouve généralement deux possibilités de fonctionnement [1]:

- Soit la totalité de production d'énergie électrique est renvoyée au réseau. Dans ce cas elle est vendue au tarif réglementé;
- Seul l'excédent de production non consommée par les appareils est renvoyé sur le réseau et vendu.

VIII.1. Introduction

Une pile à combustible est un système électrochimique qui convertit l'énergie chimique en énergie électrique. Elle est constituée de deux électrodes: une anode et une cathode alimentées par deux gaz (O_2 et H_2) et d'un électrolyte qui permet d'assurer une étanchéité entre les deux électrodes et d'assurer le passage des ions en bloquant le passage des électrons.

Le principe de la pile à combustible a été découvert en 1839 par William Grove, un juriste anglais et chercheur amateur en chimie, décrit une expérience où de l'eau et de l'électricité sont produites à partir d'oxygène et d'hydrogène. Cette expérience donne naissance à la batterie à gaz, renommée plus tard pile à combustible. Jusqu'à maintenant, le coût élevé des matériaux nécessaires avait freiné les autres applications potentielles. Les progrès réalisés dans ce domaine ces dernières années permettent cependant d'envisager l'émergence d'un marché plus vaste, dans les années à venir.

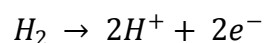
VIII.2. Fonctionnement des piles à combustible

Une pile à combustible fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, puisqu'elle produit de l'électricité, de l'eau et de la chaleur à partir d'hydrogène et d'oxygène. En effet, la réaction d'oxydo-réduction se produit au sein d'un générateur électrochimique élémentaire, appelé cellule, constitué de:

- l'anode: électrode négative repoussant les électrons;
- la cathode: électrode positive attirant les électrons;
- La partie centrale d'une pile à combustible est une membrane électrolytique permettant le passage des ions.

Voici ce qui se passe avec la traversée de l'hydrogène, de l'anode vers la cathode.

1. A l'anode (pôle négatif), l'hydrogène va se transformer en ions H^+ en libérant des électrons selon la réaction:



2. La membrane électrolytique laisse passer les protons, mais s'oppose au passage des électrons, qui sont recueillis séparément sur la première face (anode) afin de fournir le courant électrique.

3. A la cathode (pôle positif), les ions H^+ se combinent aux ions O^- constitués à partir de l'oxygène de l'air pour former de l'eau selon la réaction:

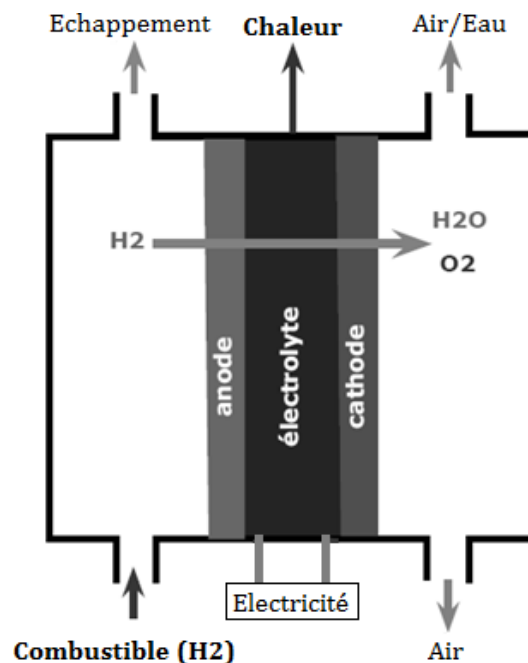
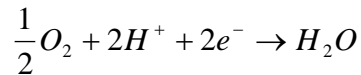
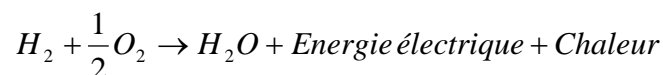


Figure VIII.1: Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

C'est le transfert des ions H^+ et des électrons vers la cathode qui va produire un courant électrique continu et de l'eau à partir de l'hydrogène et de l'oxygène. Comme les électrons ne peuvent pas traverser la membrane ils coulent dans une file en faisant du travail électrique et, comme la réaction est exothermique, elle produit aussi la chaleur selon l'équation suivante:



La production d'électrons à l'anode et leur consommation à la cathode assurent la différence de potentiel qui permet la circulation du courant lorsque la pile est alimentée en air et en hydrogène et qu'elle est placée en générateur dans un circuit électrique. La

réaction est déclenchée à l'aide d'un catalyseur. Il s'agit en général d'une fine couche de platine disposée sur les électrodes.

VIII.3. Les types de piles à combustible

Chaque type de piles à combustible est caractérisé par l'électrolyte adopté et la température de fonctionnement. Les piles à combustible sont regroupées en cinq catégories désignées par leur sigle anglophone (Tableau VIII.1):

- les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell);
- les piles à combustible alcalines (AFC, Alkaline Fuel Cell);
- les piles à combustible à acide phosphorique (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell);
- les piles à combustible à carbonates fondus (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell);
- les piles à combustible à oxyde solide (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell).

Tableau VIII.1: Principaux types de piles à combustible [12].

Type de piles à combustible	Porteur de charge	Température de fonctionnement (°C)	Combustible	Puissance
AFC	OH ⁻	50-200	H ₂	5kW
PEMFC	H ⁺	50-100	H ₂	5-250 kW
PAFC	H ⁺	~220	H ₂	200kW
MCFC	CO ₃ ²⁻	~650	H ₂ -CO-CH ₄ autres hydrocarbures	200kW-MW
SOFC	O ²⁻	500-1000	H ₂ -CO-CH ₄ autres hydrocarbures	2kW-MW

VIII.4. Les domaines d'applications de la pile à combustible

On distingue aujourd'hui trois grands domaines d'applications de la pile à combustible: les applications embarquées, nomades et stationnaire. Chacune de ces applications a des contraintes spécifiques et privilégie donc des types de piles particuliers.

Applications embarquées:

Sous-marin, bateaux, voitures, bus, scooters, fauteuils roulants, véhicules de chantier, chariots élévateurs, drones, avions, navette spatiale, tous les moyens de transport imaginables, ou presque, ont été testés avec une pile à combustible. Il s'agit, dans la plupart des cas, de démonstrateurs et de prototypes mais très peu d'entre eux sont commercialisés. Dans le domaine automobile, deux applications de la pile à combustibles sont distinguées [13]:

- La propulsion qui consiste à remplacer le moteur thermique par un moteur électrique alimenté par une pile à combustible;
- La production auxiliaire de puissance. La pile est utilisée à la place ou en complément d'une batterie pour alimenter les instruments de bord ou les auxiliaires du véhicule. La propulsion est, quant à elle, toujours assurée par un moteur à combustion interne conventionnel.

Applications portables:

La croissance des applications portables est importante. Cependant, ces applications, du fait de leur évolution, sont de plus en plus handicapées par leur autonomie: la batterie lithium-ion (cobalt) qui atteint une énergie spécifique de 150 à 190 Wh/kg [13] ne laisse qu'une autonomie de quelques jours pour un téléphone portable et de 3 à 4 heures seulement pour un ordinateur portable. Les clients demandent 5 à 10 fois mieux.

Applications stationnaires:

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est focalisée sur deux grands domaines d'applications: la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production individuelle (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW).

VIII.5. Avantages et inconvénients des piles à combustible

Les avantages et inconvénients des piles à combustible dépendent bien entendu du type de pile considéré, mais aussi du type d'application visé. Toutefois, des avantages et inconvénients généraux ressortent souvent.

Les avantages sont les suivants [14]:

- Rendement de la conversion énergétique important;

- Propre. Les piles à combustible rejettent moins de gaz nocifs (CO_2 , NO_x);
- Modulable. Les piles à combustible ont la caractéristique importante d'être très modulables dans le sens où elles peuvent être facilement de tailles différentes;
- Très silencieuses. Le fonctionnement des piles se fait sans nuisances sonores. De ce fait, les piles à combustible peuvent très bien être à proximité de quartiers résidentiels.

Cependant le seul obstacle significatif restant celui du coût important lié aux matériaux utilisés.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ROBYNS Benoît, DAVIGNY Arnaud, FRANÇOIS Bruno, HENNETON Antoine, SPROOTEN Jonathan, “Production d’énergie électrique à partir des sources renouvelables” Edition: Lavoisier, 2012.
- [2] BACHTA Abdelkader, “ L’énergie et l’avenir humain” Edition: La maison tunisienne du livre, 2012.
- [3] MULTON Bernard, “Production d’électricité par des sources renouvelables”, Techniques de l’Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D4005/6, 2003.
- [4] CHAURAND Pierre-Marie, “Physique-chimie”, Cours de spécialité pour l’aide personnalisée. http://www.chaurand.fr/site/Nouveau_cours_de_M._Chaurand.html
- [5] “Production d’électricité d’origine thermique”, note d’information, EDF, 2015. <https://www.edf.fr>
- [6] “Groupe électrogène, le guide pratique”, <https://groupe-electrogene.ooreka.fr/>
- [7] “Groupe électrogène”, https://fr.wikipedia.org/wiki/Groupe_électrogène
- [8] WILDI Théodore, “Electrotechnique”, Editions: ESKA - 2^{ème} édition, 1991.
- [9] BESLIN Guy et MULTON Bernard, “ Production d’électricité éolienne: de la caractérisation du gisement éolien aux technologies d’aérogénérateurs”, Encyclopédie de l’énergie, Article N. 088, 2016.
- [10] GAZTAÑAGA ARANTZAMENDI Haizea, “étude de structures d’intégration des systèmes de génération décentralisée: Application aux micro-réseaux”, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2006.
- [11] ROUSSEAUX Patrick, APOSTOL Tiberiu, LE GOFF Pierre, “Valeur environnementale de l’énergie”, Editions Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2000.
- [12] BULLEN R. A., ARNOT T. C., LAKEMAN J. B. and WALSH F. C., “Biofuel cells and their development”, Biosensors and Bioelectronics, vol. 21, N.11, pp. 2015-2045. 2006.
- [13] BLUNIER Benjamin, MIRAOUI Abdellatif, “20 questions sur la pile à combustible : l’hydrogène: vecteur énergétique de demain? ”, Edition: Paris TECHNIP, 2009.
- [14] ROTUREAU David, “ développement de piles a combustible de type SOFC, conventionnelles et mono-chambres, en technologie planaire par sérigraphie”, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2005.