

## 1.1 Introduction

Dans ce chapitre, on introduit les systèmes multi sources. On commence par un aperçu sur la production et la consommation de l'énergie, plus particulièrement l'énergie électrique, suivi par les sources de sa production. On termine par quelques notions sur les systèmes multi-sources.

## 1.2 Systèmes à sources conventionnelles et non conventionnelles (à énergies renouvelables)

### 1.2.1 Les différentes formes d'énergies

#### 1.2.1.1 L'énergie primaire

C'est la source utilisée pour l'obtention d'une énergie exploitable par l'utilisateur. Elle désigne une source d'énergie extraite d'un stock de ressources naturelles ou capturée à partir d'un flux de ressources et qui n'a subi aucune transformation ou conversion autre que la séparation et le nettoyage. Elle peut être épuisables (énergies fossiles comme le charbon, le pétrole, le gaz naturel, mais aussi l'uranium), ou renouvelables (énergies hydraulique, éolienne, géothermique et solaire, y compris la biomasse qui est une concentration d'énergie solaire en carbone dans un végétal).

#### 1.2.1.2 L'énergie secondaire

Ces énergies primaires sont transformées en énergies secondaires : produits pétroliers raffinés dont les carburants automobiles, électricité... Cette transformation d'une énergie en une autre se fait toujours -c'est une loi fondamentale de la physique- avec une perte d'énergie, si bien que la transformation d'une énergie primaire en énergie secondaire « consomme de l'énergie primaire ». Le ratio entre l'énergie secondaire produite et l'énergie primaire utilisée s'appelle le « rendement » de l'unité de transformation d'énergie. Par exemple, le rendement d'une centrale électrique qui fabrique de l'électricité en brûlant du gaz et du charbon est de 30 à 50%.

#### 1.2.1.3 L'énergie finale

Ce sont des énergies qu'on peut exploiter directement comme l'électricité. Ce sont celles qui sont utilisées à la satisfaction des besoins de l'homme. La satisfaction des besoins peut être directe, si l'énergie est consommée par un être humain au cours d'un usage domestique (se chauffer, travailler sur son ordinateur, se déplacer en voiture), ou indirecte si elle est utilisée dans la production de biens ou de services destinés à la consommation humaine. La consommation d'énergie finale est soit une consommation directe d'énergie primaire non transformée, comme le charbon brûlé sous les chaudières industrielles dans la chimie ou injecté dans les fours des cimenteries, soit une consommation d'énergie secondaire comme l'essence ou l'électricité.

### 1.2.2 Définitions de quelques unités

#### 1.2.2.1 Tonne équivalent pétrole

La tonne d'équivalent pétrole (symbole tep) est une unité de mesure de l'énergie. Elle est notamment utilisée dans l'industrie et l'économie. Elle vaut, selon les conventions, 41,868 GJ (parfois arrondi à 42 GJ).

#### 1.2.2.2 British Thermal Unit

Le British Thermal Unit (abrégé en Btu ou BTU) est une unité anglo-saxonne d'énergie définie par la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'une livre anglaise d'eau ( unité de masse, elle vaut 453,59237g) d'un degré °F à la pression constante d'une atmosphère.

1BTU = 1055,06 Joules.

#### 1.2.2.3 Tonne équivalent charbon

La tonne équivalent charbon est une unité de mesure de l'énergie (symbole tec), elle est utilisée dans l'industrie du charbon . Un tec vaut conventionnellement 7 Gcal, soit 29,30760GJ.

### 1.2.3 Consommation et Production de l'énergie

#### 1.2.3.1 Consommation

Les facteurs qui pèsent sur l'évolution de la demande d'énergie dans le monde sont :

- l'accroissement de la population mondiale (9 à 10 milliards d'habitants à l'horizon 2050) ;
- le développement de la civilisation industrielle.

A titre d'exemple, depuis la révolution industrielle, la consommation d'énergie n'a cessé d'augmenter. Elle a progressé de 109 % en 44 ans, de 1973 à 2018 (consommation finale).

La zone Asie-Pacifique absorbe aujourd'hui plus de 30% de la consommation mondiale contre moins de 20% au début des années soixante-dix. Corrélativement, le poids relatif des régions développées diminue (USA de 28 à 20%, Union Européenne de 19 à 15%).

## 1.2.4 Sources d'énergies primaires

### 1.2.4.1 Energies fossiles

La forte dépendance aux combustibles fossiles de l'économie mondiale la rend vulnérable à deux types de crises qui pourraient surgir dans l'avenir :

#### - La rupture et la sécurité d'approvisionnement

Les ressources en combustibles fossiles sont par définition finies et face à une demande constamment croissante. De ce fait l'offre ne pourrait plus suivre la demande. Ce risque est aggravé par des facteurs géopolitiques car les réserves sont concentrées dans certaines régions du monde comme le Moyen-Orient et d'autres pays politiquement instables.

#### - Une catastrophe environnementale

Les énergies fossiles créent du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) lors de leur combustion. Ces émissions ont un effet néfaste sur l'environnement et contribuant au réchauffement planétaire et du changement climatique à cause d'un effet de serre excessif. A titre d'exemple le taux d'émission introduit par une centrale à gaz est de 386g de CO<sub>2</sub>/kWh.

### B) Energies fissiles (nucléaire)

Le fonctionnement d'une centrale nucléaire repose sur quatre étapes principales :

1. La source de chaleur
2. L'extraction de la chaleur
3. L'entraînement de la turbine
4. La transformation en électricité.

Pour l'énergie nucléaire, le taux d'émission, de CO<sub>2</sub>/kWh, introduit par une centrale nucléaire est faible comparé à celui de la centrale d'origine fossile. Cependant les déchets radioactifs, les émissions de rayons ionisants et la décontamination finale des réacteurs radioactifs sont très néfastes à l'environnement et peuvent causés des conséquences très dangereuses à l'être vivant. En plus de ces problèmes de pollution (déchets) on doit ajouter les problèmes de sûreté. Cas de : - La catastrophe nucléaire de Tchernobyl : c'est un accident nucléaire majeur qui a commencé le 26 avril 1986 dans la centrale Lénine, située à l'époque en République socialiste soviétique d'Ukraine en URSS. - Catastrophe de Fukushima : C'est un accident industriel majeur qui a débuté le 11 mars 2011 au Japon, à la suite du séisme et du tsunami de 2011.

### C) Energies renouvelables

Pour écarter ces différentes menaces, il est donc nécessaire d'engager une véritable transition énergétique avec comme objectif de continuer à assurer le développement économique. D'une part par la consommation optimale de l'énergie (utiliser plus d'appareils à basse consommation d'énergie, améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments ou encore réduire l'énergie utilisée par les transports, et ce sans changer notre façon d'utiliser l'énergie au quotidien) et d'autre part par l'utilisation des énergies renouvelables qui peuvent être substituées aux combustibles fossiles, mais leur inconvénient majeur est qu'elles sont intermittentes. On revient à ce point par la suite.

## 1.2.5 Historique

Dans son évolution, l'énergie a connu les étapes suivantes:

- étape d'exploitation du charbon à la fin du XVIII (18ème) siècle
- étape du pétrole au milieu du XXe siècle
- étape de la recherche d'autre sources, (nucléaire, sources renouvelables) après le premier choc pétrolier de 1973.
- étape d'implantation de grands projets de sources renouvelables durant ces dernières décennies pour la réduction de l'effet de serre et le danger du nucléaire.

## 1.2.6 Production de l'électricité

On montre dans la figure 1.2 les moyens qui peuvent être utilisés pour convertir les divers types d'énergies en électricité. On remarque que la plupart des chemins de conversion transite à travers l'énergie mécanique. Le chemin le plus utilisé est le chemin qui part de la combustion d'un carburant chimique pour obtenir de l'énergie thermique, puis mécanique et enfin de l'énergie électrique. Le point faible dans ce processus est le rendement thermodynamique déterminé par le cycle de Carnot (rendement moins de 60%). Une bonne partie est perdue dans l'environnement sous forme de chaleur. Elle peut être récupérée en utilisant les centrales de cogénération (énergie thermique de la centrale non convertie en énergie mécanique est récupérée et distribuée localement dans les circuits de vapeur ou d'eau chaude pour l'industrie ou pour le chauffage urbain). La figure montre que

le solaire peut être utilisé directement pour produire de l'électricité à travers la technologie photovoltaïque et aussi les piles à combustibles.

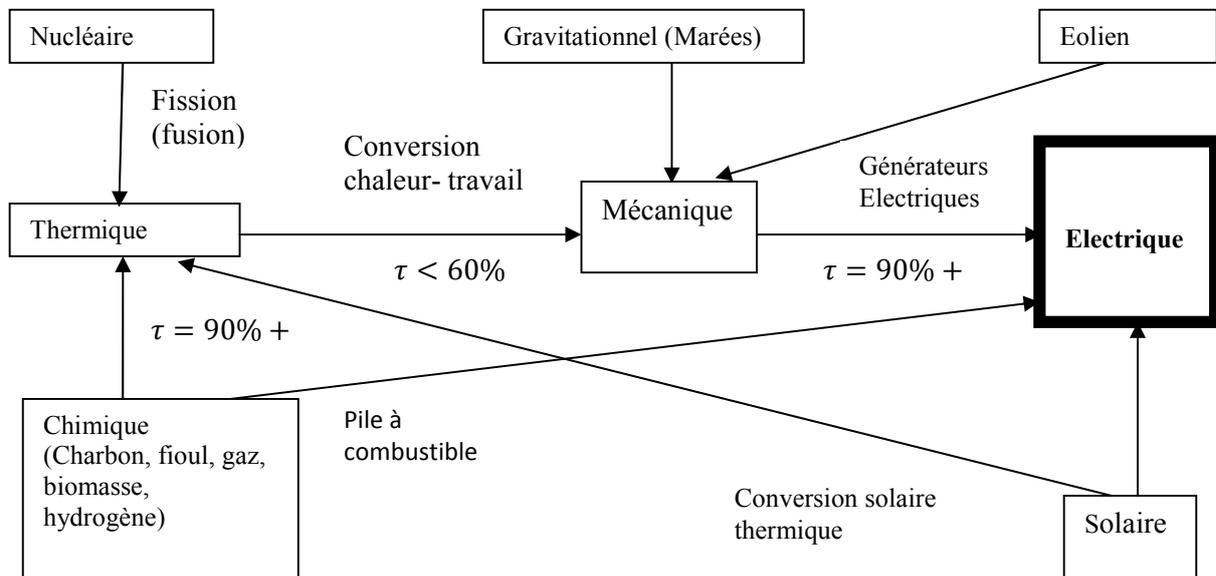


Fig. 1.2 Conversion en électricité selon les diverses formes d'énergie primaire

### 1.3 Etat de l'art des systèmes hybrides, les avantages et les inconvénients

#### 1.3.1 Définition d'un système hybride

Les sources d'énergies renouvelables comme le solaire, l'éolien, ne délivrent pas une puissance constante et continue. Cependant une association de plusieurs sources renouvelables peut former un complément de mix énergétique. Mais cela reste toujours insuffisant pour satisfaire la charge pour une période longue ; chose qui nécessite leur association avec des sources d'appoint, comme les groupes électrogènes, dans les sites isolés ou avec les sources conventionnelles pour les systèmes connectés aux réseaux afin d'obtenir une production électrique continue.

Dans ce contexte, on définit un système hybride (SEH) à sources d'énergie renouvelables (SHSER) comme un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

Le but d'un système SEH est d'assurer l'énergie demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergies renouvelables. Il peut être présenté sous l'une des formes suivantes :

- ✚ D'une seule source d'énergie renouvelable avec ou sans un groupe électrogène. Dans ce cas, la présence d'un dispositif de stockage est indispensable afin de pouvoir satisfaire, à tout instant, la demande du consommateur;
- ✚ De deux sources à énergie renouvelables avec ou sans groupe électrogène fonctionnant avec un groupe de stockage;
- ✚ De plus de deux sources d'origines renouvelables avec ou sans groupe électrogène accompagné d'une possibilité de stockage.

Généralement, ces variantes peuvent être connectées aux réseaux de distribution.

#### 1.3.2 Les avantages d'un système hybride

Les principaux avantages d'un système hybride :

- ✓ la possibilité de combiner deux ou plusieurs sources d'énergie renouvelables, basée sur les ressources naturelles ;
- ✓ protection de l'environnement, notamment en termes de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> ;
- ✓ la diversité et la sécurité d'approvisionnement ;
- ✓ déploiement rapide - modulaire et rapide à installer ;

- ✓ les ressources solaire et éolien sont gratuites et inépuisables ;
- ✓ lissage de la production ;
- ✓ augmentation de la fiabilité ;
- ✓ diminution du stockage;
- ✓ réduction des coûts de production.

### 1.3.3 Les inconvénients

Les principaux inconvénients peuvent se résumer en :

- ✓ augmentation de la complexité du système ;
- ✓ difficulté d'optimisation des divers organes du système ;
- ✓ augmentation du coût de maintenance.

## 1.4 Les différentes configurations et architectures de systèmes hybrides à énergies renouvelables (DC, AC, mixte)

### 1.4.1 Eléments constituant des systèmes hybrides

Les différentes architectures d'un système hybride se divisent en deux grandes familles : l'architecture série et l'architecture parallèle.

#### 1.4.1.1 Architecture série

##### A) Configuration à bus à courant continu

Dans le cas d'une architecture série, toutes les sources sont connectées une à une à un bus à courant continu (CC) comme l'indique la figure 1.3a. Pour cette architecture, les puissances délivrées par les modules à courant alternatif (générateur éolien et groupe Diesel) sont redressées en tension grâce à des convertisseurs AC/DC. La charge est alors alimentée par un onduleur (convertisseur DC/AC).

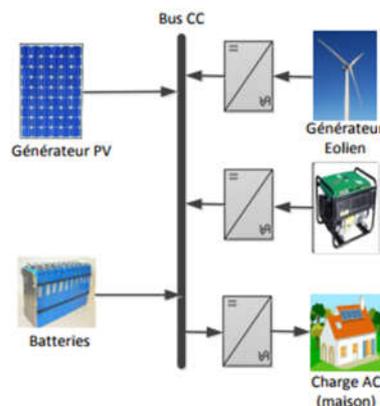


Fig. 1.3a Configuration d'un système hybride à bus CC

##### Les avantages de cette structure résultent :

- ✓ d'un système de commande plus simple à mettre en œuvre ;
- ✓ d'un dimensionnement du générateur Diesel ;
- ✓ Grâce à l'onduleur, la charge peut être alimentée avec une tension et une fréquence adéquates.

##### Les inconvénients sont :

- ✓ le rendement de l'ensemble du système est relativement faible à cause des pertes au niveau des convertisseurs notamment ;
- ✓ l'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur Diesel. C'est pourquoi il doit être dimensionné de manière à ce qu'il puisse couvrir les pics de demande de la charge ;
- ✓ un problème dans l'onduleur peut provoquer une coupure totale de l'alimentation électrique.

##### B) Configuration à bus à courant alternatif

L'architecture à bus à courant alternatif (CA) est plus récente, elle s'est développée grâce à l'émergence de l'électronique de puissance et de l'apparition des onduleurs plus performants et bon marché. Cette architecture dispose d'un seul bus CA sur lequel sont connectés tous les modules du système hybride (figure 1.3b).

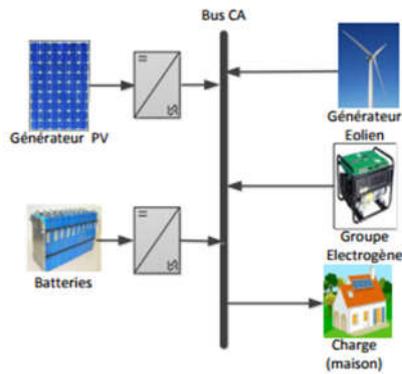


Fig. 1.3b Configuration d'un système hybride à bus AC

Le choix de cette structure est judicieux car celle-ci fournit directement une tension alternative et assure continuellement l'alimentation de la charge. Le groupe électrogène démarre automatiquement dès qu'un manque de puissance apparaît au niveau du bus. Néanmoins, l'inconvénient réside dans la difficulté d'imposer la fréquence et l'amplitude de la tension du bus et de les adapter à la charge ainsi que de synchroniser tous les modules du réseau. En outre, un travail de mise en forme de la puissance du bus doit être réalisé. Par conséquent, cette architecture est plutôt adaptée aux grands réseaux avec des moyens logistiques nécessaires.

#### 1.4.1.2 Architecture parallèle

La configuration parallèle utilise deux bus (fig. 1.4): un bus CC où sont connectées les sources à courant continu (batterie et panneaux PV), et un bus CA sur lequel sont connectés l'éolienne, le groupe Diesel et la charge (maison). L'interconnexion entre les deux bus réalisée par l'intermédiaire de l'électronique de puissance : onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels.

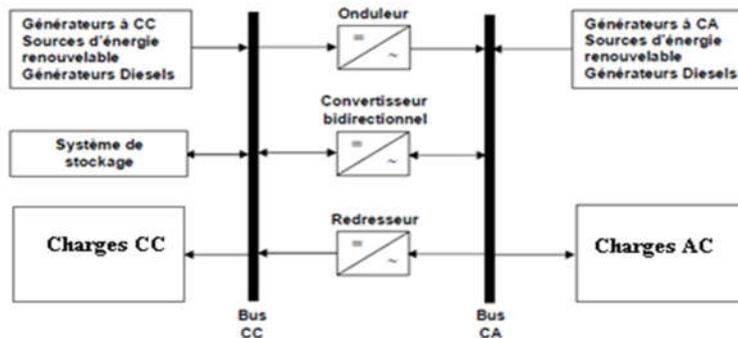


Fig.1.4 Configuration du système hybride

**Les avantages de cette architecture sont :**

- Un bon rendement du fait que l'énergie du générateur Diesel n'est pas convertie et que les sources fonctionnent avec des puissances proches de leurs puissances maximales.
- La diminution du nombre de convertisseurs.
- Un problème intervenant sur un convertisseur ne conduit pas à l'interruption de l'alimentation de la charge.

**Les inconvénients de cette architecture sont :**

- Les impulsions qui émanent du convertisseur de puissance peuvent avoir une influence sur le vieillissement des batteries.
- Le convertisseur bidirectionnel doit fournir une tension sinusoïdale synchronisée avec la tension du générateur Diesel.
- La tension du bus continu est difficile à contrôler.

#### 1.4.2. Classification des systèmes hybrides

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. On présente deux cas:

### 1.4.2.1 Le régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc.

### 1.4.2.2 La structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

A) Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz.

B) Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc ...

C) La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle etc.

La figure 1.4 montre une généralisation de la classification.

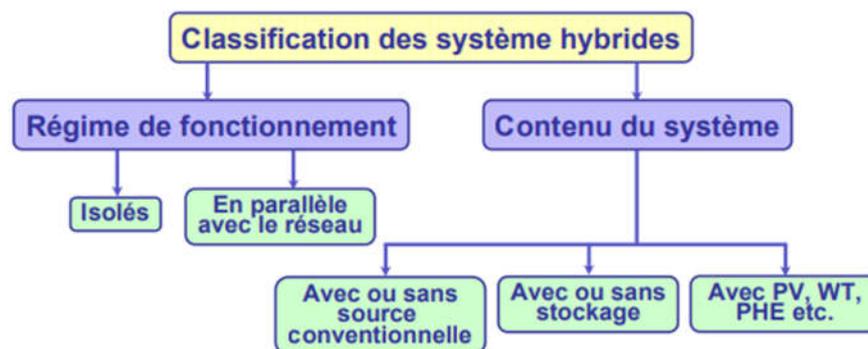


Fig.1.4 Classification des systèmes hybrides

## 1.5 Gammes de puissance

La puissance délivrée par les systèmes hybrides peut varier de quelques centaines ou kilos de watts pour les applications domestiques jusqu'à quelques mégawatts pour les systèmes utilisés dans l'électrification de petites îles. Le champ d'application des systèmes hybrides est très large. Dans le tableau 1.1 on donne un exemple de classification par gamme de puissance.

Tableau 1.1 Classification des systèmes par gamme de puissance

Puissance du SEH (kW)	Application
Faible : < 5	Systèmes autonomes : stations de télécommunications, pompage de l'eau, autres applications isolées
Moyenne : 10-250	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales
Grande : >500	Grands réseaux isolés (ex: réseaux insulaires)

### **Bibliographie**

- [1] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Ressources\\_et\\_consommation\\_%C3%A9nerg%C3%A9tiques\\_mondiales](http://fr.wikipedia.org/wiki/Ressources_et_consommation_%C3%A9nerg%C3%A9tiques_mondiales), consulté le 14/02/2015.
- [2] <http://www.planetoscope.com/Source-d-energie/229-consommation-mondiale-d-energie-en-tep-.html>, consulté le 14/02/2015.
- [3] [http://www.2020energy.eu/sites/default/files/pdf/consommation\\_et\\_economies\\_d\\_energie.pdf](http://www.2020energy.eu/sites/default/files/pdf/consommation_et_economies_d_energie.pdf), consulté le 14/02/2015.
- [4] Leon Freris, David Infield, Les énergies renouvelables pour la production d'électricité, édition Dunod, 2009.
- [5] Pierre Odru, Le stockage de l'énergie, édition DUNOD, 2010.
- [6] Scénarios Mondiaux de l'Énergie à l'horizon 2050, <http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/10/Les-sc%C3%A9narios-mondiaux-de-lenergie-a-lhorizon-2050.pdf>, consulté le 14/02/2015.
- [7] G. N. Tiwari and Swapnil Dubey, Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications, RSC Publishing, New Delhi, India, 2010.
- [8] <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=energies-nouvelles-et-renouvelables>, consulté le 06/02/2016.
- [9] Leon Freris, David Infield, Les énergies renouvelables pour la production d'électricité, édition DUNOD, Paris, 2009.
- [10] Menad DAHMANE, Gestion, Optimisation et Conversion des Énergies pour Habitat Autonome, Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale en Sciences Technologie et Santé (ED 585) de l'Université de Picardie Jules Verne, 2015, France, .
- [11] Ludmil Stoyanov, Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables, \_Energie électrique. Université Pascal Paoli, 2011. France.
- [12] <http://fr.m.wikipedia.org>, énergie en Algérie, consulté le 27/11/2019.