

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement  
Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed BOUDIAF-M'sila



جامعة محمد بوضياف - المسيلة  
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

## **Polycopie de Cours**

Spécialité : Master

Energie renouvelable

Intitulé :

**Systemes multi sources à énergies renouvelables**

Par le Docteur : Riyadh ROUABHI

M'sila 2021

## *Auteur*

Dr: ROUABHI Riyadh

riyadh.rouabhi@univ-msila.dz

riyadhrouabhi@gmail.com

riyadhrouabhi@yahoo.fr

Faculté/Institut : Faculté de Technologie

Département : Génie Electrique

Etablissement : Université Mohamed BOUDIAF de M'sila – Algérie

Intitulé de la matière : **Systèmes multi sources à énergies renouvelables**

Semestre : 5

Unité d'Enseignement Fondamentale Code: **UEf2.1.2**

Nombre d'heures d'enseignement Cours : **1,5** H TD : **1,5** H TP : ----

Nombre d'heures de travail personnel pour l'étudiant : **3,00**

Nombre de crédits : **4** Coefficient de la Matière : **2**

## *Description du cours*

La consommation et le besoin d'énergie électrique sont en nette croissance dans le monde, l'épuisement progressif des ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon...) caractérisées par des émissions du gaz carbonique produit lors de leurs combustions d'une part, et le risque des centrales nucléaires (les radiations d'uranium) avec une production de déchets radioactifs difficiles à traiter d'autre part, sont des problèmes bien réels qui ont poussés les chercheurs à développer d'autres sources d'énergies durables et plus respectueuses de l'environnement. Ces moyens de substitutions dont on parle, sont bien sûr les « énergies renouvelables(ER) ».

Plusieurs pays se tournent de plus en plus vers l'utilisation de sources d'énergies propres et renouvelables, non pour le remplacement des ressources conventionnelles, mais comme énergie complémentaire aux énergies traditionnelles.

Les énergies renouvelables, en pleine expansion, sont l'un des éléments clés du développement soutenable d'aujourd'hui. Ils offrent la possibilité de produire de l'électricité propre. Parmi les énergies renouvelables, on compte principalement les énergies : hydraulique, solaire thermique, photovoltaïque, éolienne, ainsi que la biomasse et la géothermie.

Afin de résoudre le problème des sources d'énergie renouvelables (la puissance obtenue à partir de ces sources est variable, elle est tributaire aux conditions climatiques), un couplage entre les différentes sources d'approvisionnement pour former un système dit système d'énergie hybride.

Un Système d'Energie Hybride (SEH) est une installation qui associe différentes technologies de la génération d'énergies électriques : sources renouvelables, sources conventionnelles, dans le but de réunir les avantages de chaque système et offrir un rendement énergétique global plus élevé. Par exemple, les sources d'ER, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante à cause de leurs natures aléatoires. Cependant l'association de ces dernières avec d'autres sources permet d'obtenir une production électrique continue.

Le but de l'enseignement de **Systèmes multi sources à énergies renouvelables** est l'étude d'une manière générale de différentes configurations et architectures de ces systèmes électriques et leurs sources d'énergie composites de ses systèmes. Ensuite, nous présentons d'une façon plus détaillée les principaux composants de notre système hybride constitué par les éléments : photovoltaïque-éolien-pile à combustible-électrolyseur avec le système de stockage.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les sources d'énergie conventionnelles (non renouvelables) et non conventionnelles (renouvelables) et les méthodes correctes pour l'exploitation de ces sources d'énergies. En suite un état de l'art sur les systèmes d'énergie hybride autonome (systèmes multi sources) où nous présentons les définitions, des différentes architectures des systèmes électriques multi-sources autonomes.

Dans le deuxième chapitre nous donnons une étude descriptive des sources d'énergie qui composent les systèmes d'énergie hybride autonome. En suite connaître la méthode correcte pour le dimensionnement de ces sources et leurs convertisseurs pour reliés à un bus continu, et en fin présenter ses avantages et ses inconvénients.

Le troisième et le quatrième chapitre seront consacré à la modélisation qui décrit le comportement des différentes parties de notre système d'énergie hybride autonome, en suite présenter le système de supervision pour une gestion de l'énergie du système global. Nous terminons ce chapitre par les résultats de simulation du comportement de SEH, face aux variations climatiques et de la charge électrique. Les séries des travaux pratiques (TD ; TP) se trouvent à la fin de chaque chapitre.

**Mot clés:** énergie, Systèmes multi sources, systèmes d'énergie hybride, renouvelable, non renouvelable, modélisation, système de supervision.

### *Public Cible*

Ce cours est destiné aux étudiants de la **2eme année master (Energie renouvelable)** de l'université Mohamed Boudiaf de M'sila– Algérie.

### *Objectifs de l'enseignement*

Ce cours vise à doter les étudiants des connaissances et compétences requises pour les rendre capable de :

- Comprendre une idée générale sur les sources conventionnelles (non renouvelables) et non conventionnelles (renouvelables) et les méthodes correctes pour l'exploitation de ces sources d'énergies ;
- Connaître les principes de base de fonctionnement des centrales de production d'énergie électrique conventionnelles et non conventionnelles ;
- Présenter un rappel théorique sur les systèmes d'énergie hybride, leurs avantages et leurs inconvénients seront exposés et discutés ;
- Présenter l'architecture complète du système hybride à énergie renouvelable. En suite nous présentons d'une façon plus détaillée les principaux composants de notre système hybride constitué par les éléments : photovoltaïques(PV) ; éolien ; Pile à Combustible (PàC) ; batterie ; électrolyseur ;
- Présenter la modélisation individuelle de chaque élément de l'architecture complète du système hybride à énergie renouvelable (système multi-sources autonomes)
- Présenter le système de supervision du système hybride à énergie renouvelable constitué par les algorithmes MPPT appliquée sur le générateur photovoltaïque et éolien et les différentes stratégies de gestion proposée de gestion d'énergie.
- Apprendre l'utilisation des logiciels de simulation à savoir : Homer ; Matlab ;

**Mode d'évaluation :** L'évaluation de l'étudiant se fait par :

1 / Examen de fin de semestre (60%): 2 heures et celui du rattrapage : 2 heures.

Travaux dirigés			Exposés	
Assiduité	Interro	Participation	Ecrit	oral
/04 pts	/04 pts	/12 pts	/10 pts	/10 pts

2 / Contrôles continus (40%).

# CHAPITRE I

**Préambule sur les systèmes multi  
sources.**

## CHAPITRE I : PREAMBULE SUR LES SYSTEMES MULTI SOURCES.

I.1	LES SOURCES CONVENTIONNELLES ET NON CONVENTIONNELLES .....	03
I.1.1	LES SOURCES CONVENTIONNELLES (NON RENOUVELABLES).....	03
I.1.1.1	LE PETROLE.....	04
I.1.1.2	LE CHARBON.....	04
I.1.1.3	LE GAZ NATUREL .....	05
I.1.1.4	LE NUCLEAIRE .....	06
I.1.2	LES SOURCES NON CONVENTIONNELLES (RENOUVELABLES).....	07
I.1.2.1	L'ENERGIE SOLAIRE .....	07
I.1.2.2	L'ENERGIE HYDRAULIQUE .....	08
I.1.2.3	L'ENERGIE EOLIENNE .....	09
I.1.2.4	LA GEOTHERMIE .....	09
I.1.2.5	LA BIOMASSE .....	10
I.1.2.6	L'ENERGIE DE L'HYDROGENE .....	11
I.2	ETAT DE L'ART DES SYSTEMES HYBRIDES .....	11
I.2.1	LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS.....	12
I.2.2	CLASSIFICATIONS DES SYSTEMES D'ENERGIES HYBRIDES .....	13
I.2.2.1	REGIME DU FONCTIONNEMENT.....	13
I.2.2.2	GAMME DE LA PUISSANCE.....	14
I.3	LES DIFFERENTES CONFIGURATIONS ET ARCHITECTURES DE SYSTEMES HYBRIDES A ENERGIE RENOUVELABLES .....	14
I.3.1	SYSTEME HYBRIDE A CONFIGURATION CONTINU DC .....	14
I.3.2	SYSTEME HYBRIDE A CONFIGURATION ALTERNATIF (AC).....	15
I.3.3	SYSTEME HYBRIDE A CONFIGURATION DC-AC .....	16
I.2	SERIE N° 01 .....	17

### Objectifs de ce chapitre

Ce cours vise à doter les étudiants des connaissances et compétences requises pour les rendre capable de :

- ✓ Comprendre une idée générale sur les sources conventionnelles (non renouvelables) et non conventionnelles (renouvelables).
- ✓ Connaître les méthodes correctes pour l'exploitation de ces sources d'énergies.
- ✓ Connaître les principes de base de fonctionnement des centrales conventionnelles et non conventionnelles.
- ✓ Présenter un état de l'art sur les systèmes d'énergie hybride, leurs avantages et leurs inconvénients seront exposés et discutés.
- ✓ Présenter les manières de classification des systèmes d'énergies hybrides soit par le régime du fonctionnement ou la gamme de la puissance.
- ✓ Apprendre les différentes configurations et architectures de ce système électrique multi-sources.

## I.1. Les sources conventionnelles (non renouvelables) et non conventionnelles (renouvelables)

L'énergie est désignée selon sa source ou le moyen par lequel elle est acheminée. L'énergie consommée par l'activité humaine, peut être produite par des sources d'énergies renouvelables ou non renouvelables [Ben14], [Pog11].

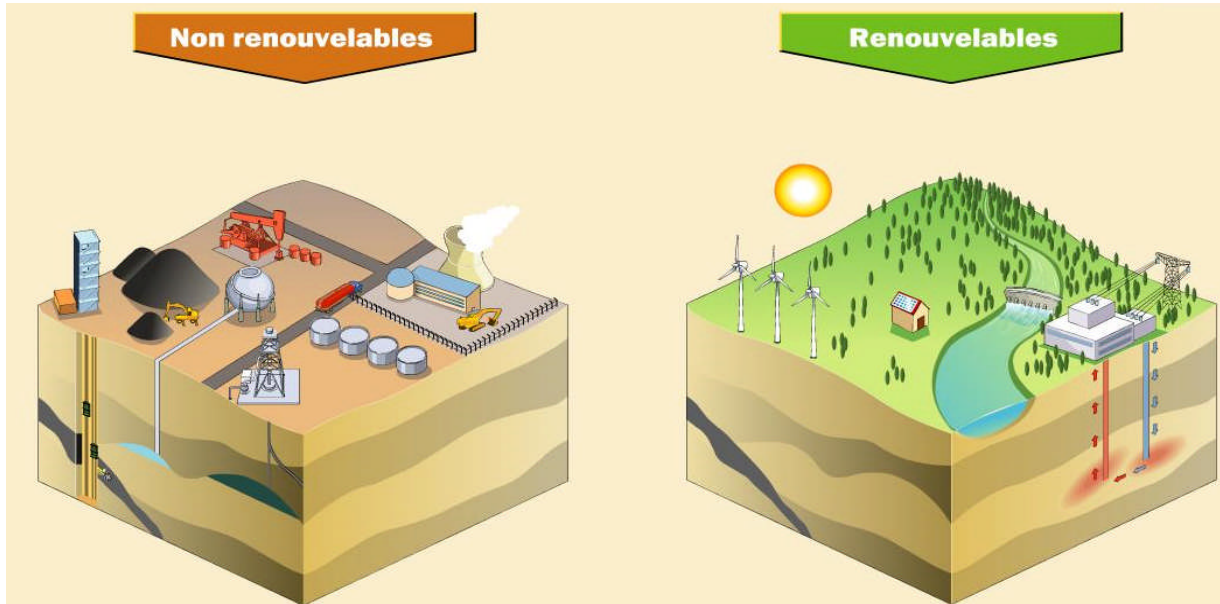


Figure I-1 : Les diverses sources d'énergie.

### I.1.1 Les sources conventionnelles (non renouvelables)

Les sources d'énergie non renouvelable sont des sources d'énergie limitées dans la planète, elles ne se renouvellent pas assez rapidement exemple : Le charbon, le gaz, le pétrole ainsi que le nucléaire, ces derniers sont appelées aussi sources d'énergies fossiles [Ben14], [Pog11].

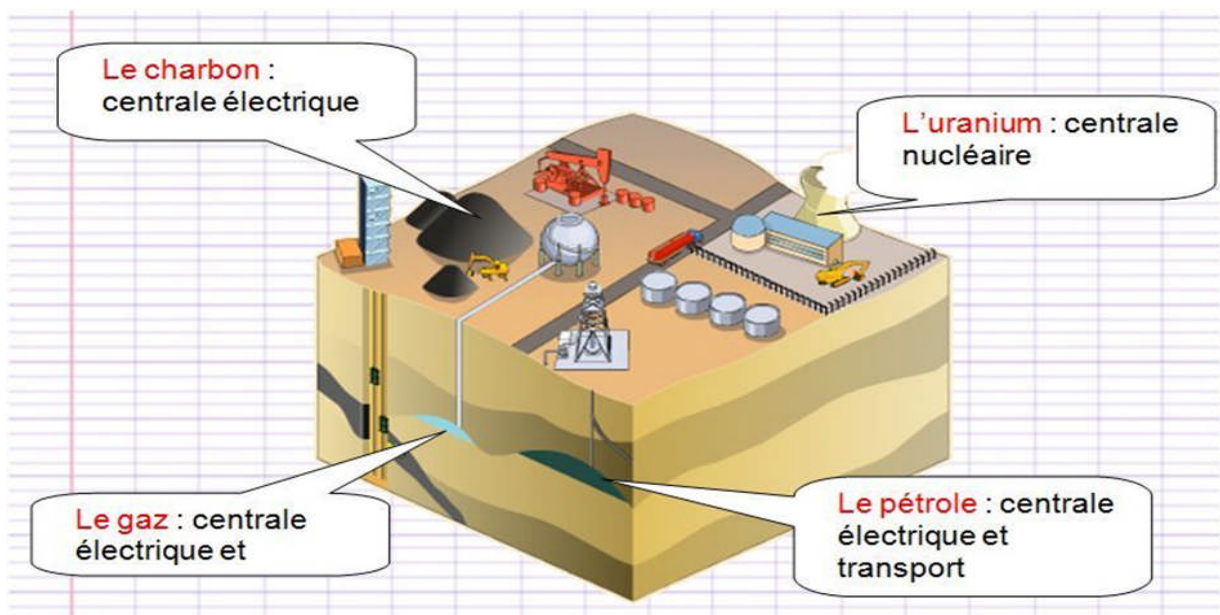


Figure I-2 : Les sources d'énergie non renouvelable.

### I.1.1.1 Le pétrole

Le pétrole est un produit formé de molécules composées de carbone et d'hydrogène (c'est pourquoi on parle souvent du pétrole en termes d'hydrocarbures). Depuis les années 1850, il constitue la source d'énergie la plus importante au monde. Il peut être utilisé et transformé pour produire des carburants, des combustibles, des lubrifiants, des gaz, etc. Les États-Unis, le Canada et les Pays-Bas sont les trois pays qui consomment le plus de barils de pétrole par habitant annuellement, mais la Chine reste le pays qui a une consommation plus élevée de pétrole au cours des 20 dernières années. Cette énergie fossile est employée dans la fabrication de carburants et de plastique.

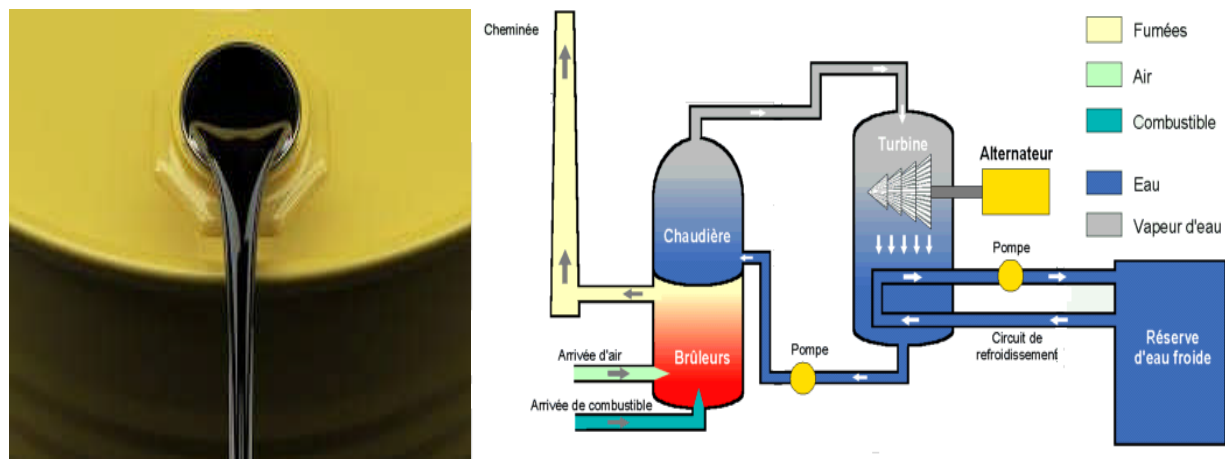


Figure I-3 : Schéma de principe de fonctionnement d'un central à pétrole.

La consommation mondiale de pétrole représente 82,4 milliards de barils aussi, les réserves devraient s'épuiser d'ici 40 ans. Émissions de grandes quantités de gaz à effet de serre par le biais de sa combustion, ce qui contribue à accentuer le réchauffement de la planète et pollue grandement l'environnement. Une centrale thermique à fioul produit de l'électricité à partir de la vapeur d'eau produite grâce à la chaleur dégagée par la combustion de fioul, qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur.

### I.1.1.2 Le charbon

Le charbon est un combustible fossile d'origine organique. Il est le résultat de la transformation de résidus de forêts enfouis dans le sol depuis près de 300 millions d'années (ère carbonifère). Par enfouissement, sous l'effet de pressions et de températures élevées dues à la profondeur, les végétaux ensevelis se sont décomposés puis transformés en une matière solide et combustible à haute teneur en carbone. Il existe quatre types de charbon qui peuvent être utilisés pour produire de l'énergie : l'antracite (qui a la plus grande valeur énergétique), la houille bitumineuse (pour la production d'acier et l'alimentation des centrales électriques thermiques), le charbon sous-bitumineux et le lignite (pour la production d'énergie électrique). Il peut être extrait par le biais de puits verticaux en profondeur dans le sol ou par l'exploitation de mines à



ciel ouvert. La Chine, les États-Unis – les deux plus grands producteurs mondiaux de charbon – et l’Inde sont les trois États dont les besoins en houille sont les plus importants.

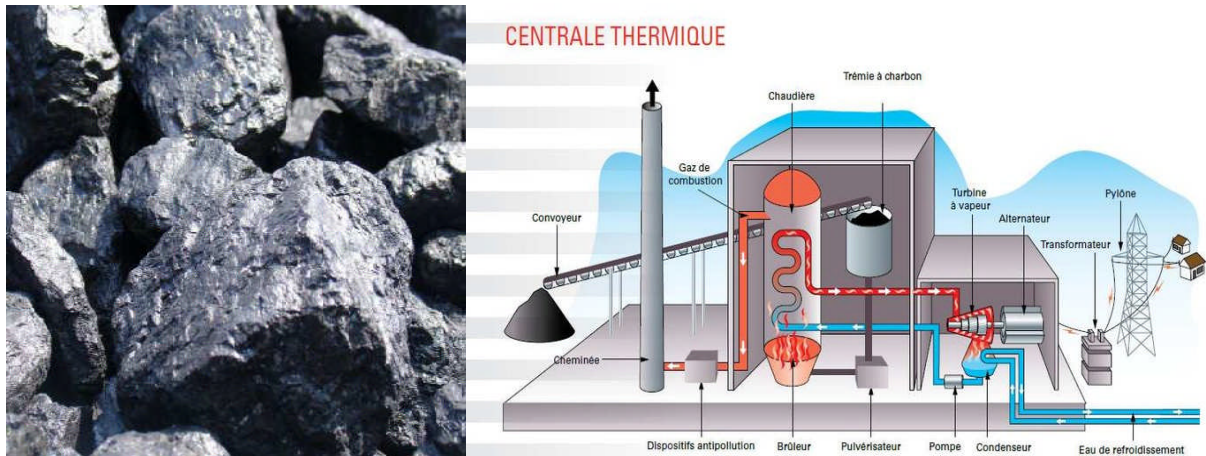


Figure I-4 : Schéma de principe de fonctionnement d’une centrale à charbon.

Les centrales à charbon utilisent cette source d’énergie pour produire de l’électricité. Après avoir été trié et lavé, le charbon est brûlé dans une chaudière. La chaleur générée par cette combustion chauffe l’eau jusqu’à ce qu’elle se transforme en vapeur. Cette vapeur entraîne une turbine qui, associée à un alternateur, génère de l’électricité.

**I.1.1.3 Le gaz naturel**

Le gaz naturel est constitué de plusieurs gaz – méthane, éthane, propane, butane, entane et autres hydrocarburents – retrouvés dans les roches poreuses. Une fois extrait du sol, il est traité et comprimé pour ensuite être stocké et transporté par gazoduc (un type de canalisation destiné à transporter le gaz). Il peut être utilisé autant pour chauffer les maisons et produire de l’électricité que pour alimenter les voitures ou pour les besoins industriels. Les États-Unis et la Russie, suivis de très loin par l’Iran, sont les trois plus grands pays consommateurs de gaz naturel au monde.

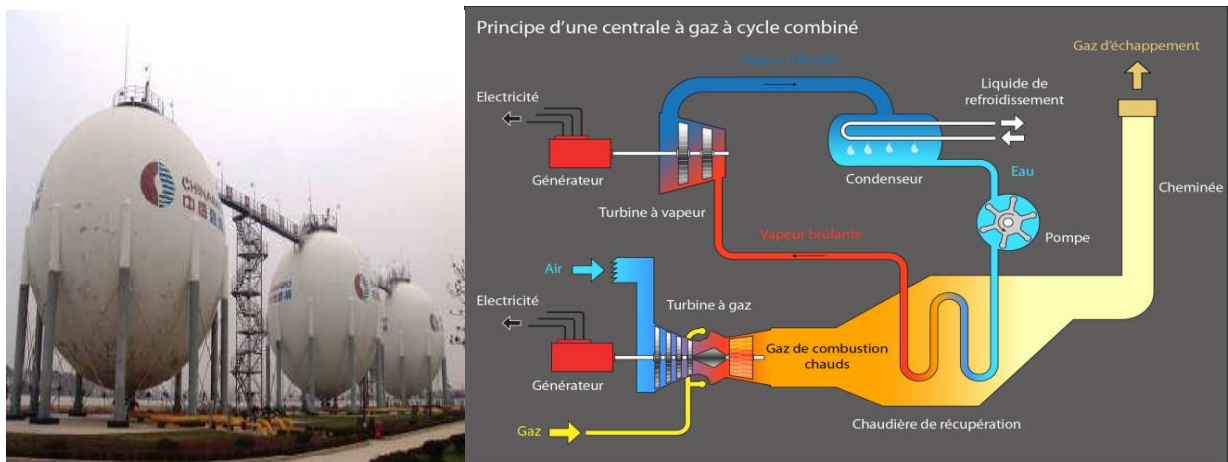


Figure I-5 : Schéma de principe de fonctionnement d’une centrale thermique à Cycle Combiné Gaz.

Une centrale thermique à Cycle Combiné Gaz (CCG) produit de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de gaz naturel. Ce type de centrale combine deux types de turbine : une turbine à combustion et une turbine à vapeur reliées à un alternateur. Avec le même volume de combustible, ces deux turbines permettent de produire une quantité plus importante d'électricité. Grâce à l'utilisation du gaz naturel comme combustible, les émissions de CO<sub>2</sub> sont divisées par 2 par rapport à une centrale au charbon. Flexible et réactive, une centrale à cycle combiné a un rendement supérieur à celui des centrales thermiques classiques. Capable de monter à pleine puissance en moins d'une heure, elle répond aux fortes variations de consommation, notamment pendant les jours de grand froid.

#### I.1.1.4 Le nucléaire

L'énergie nucléaire, aussi appelée énergie atomique, est produite à partir de la fission d'atomes (des éléments minuscules composés d'un noyau autour duquel gravitent des électrons). Dans les centrales nucléaires, on pratique la fission d'atomes d'uranium. Ceci entraîne un dégagement de chaleur permettant de chauffer de l'eau et de générer de la vapeur. Celle-ci fera tourner de la turbine, la turbine entraîne à son tour l'arbre de la génératrice électrique. Cette dernière transforme l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique.

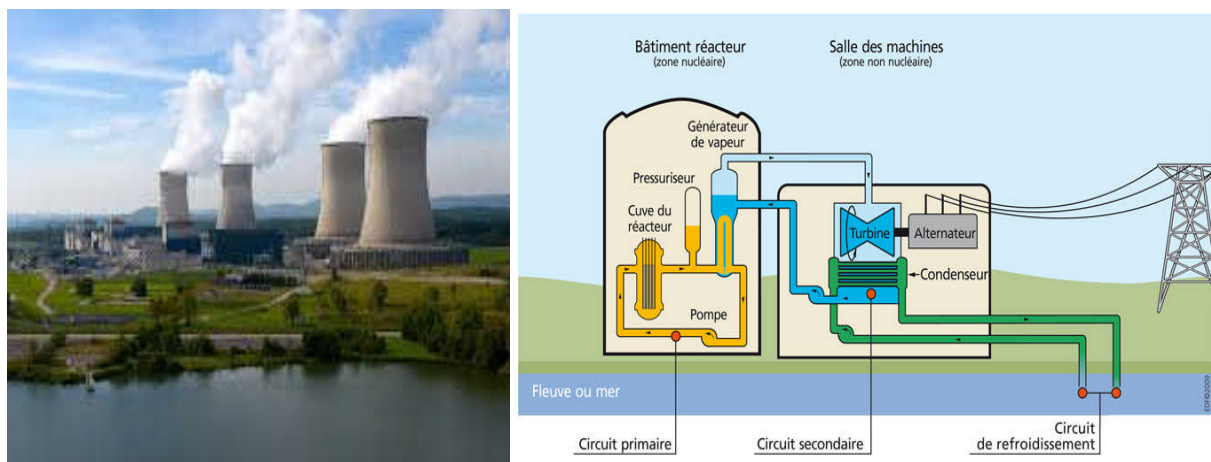


Figure I-6 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire.

Parmi les inconvénients de l'énergie nucléaire sont : les rejets radioactifs produits par le nucléaire sont très nocifs pour la santé des humains (malformations, maladies, décès...) et l'environnement (contamination). Les coûts sociaux d'accidents nucléaires peuvent donc être très coûteux, on n'a qu'à penser à la catastrophe de la centrale nucléaire de Tchernobyl en 1986, Près du 2/3 de l'énergie électrique produite en centrale nucléaire est perdue sous forme de chaleur, et Coûts de production assez élevés ;

### I.1.2 Les sources non conventionnelles (renouvelables)

Les sources d'énergie renouvelables sont des sources qui sont pratiquement inépuisables grâce à leur capacité à se régénérer naturellement et rapide. On compte parmi les énergies renouvelables : l'énergie solaire, hydraulique, éolienne, la géothermie ainsi que la biomasse.

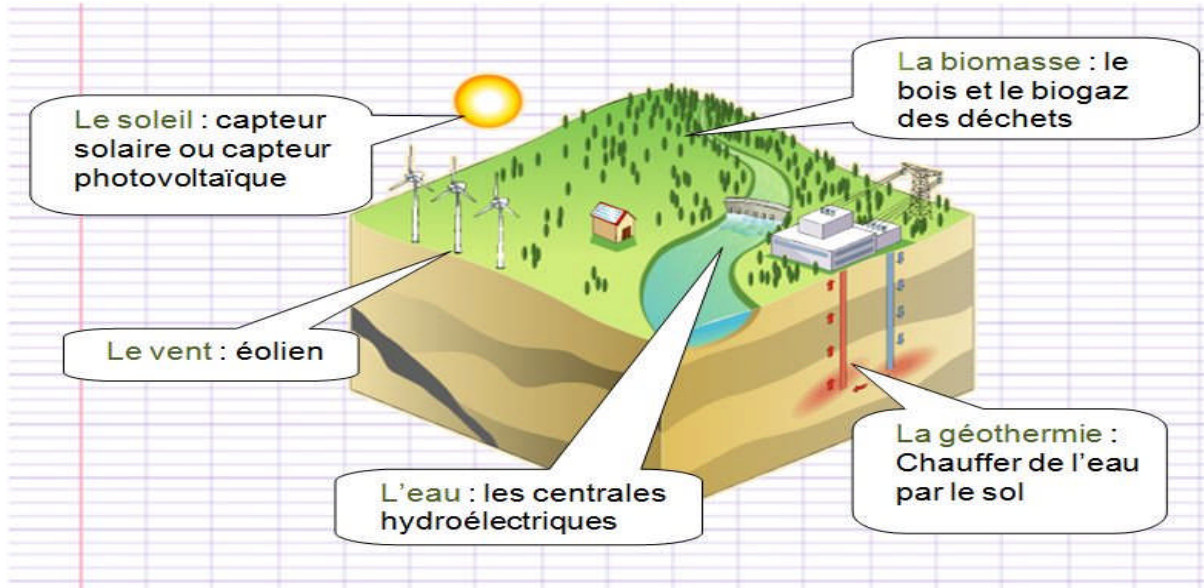


Figure I-7 : Les sources d'énergie renouvelables [Ben14] , [Pog11].

#### I.1.2.1 L'énergie solaire

Le rayonnement du soleil peut être utilisé dans le but de produire de l'électricité ou du chauffage. Plusieurs catégories d'énergie solaire peuvent être définies :

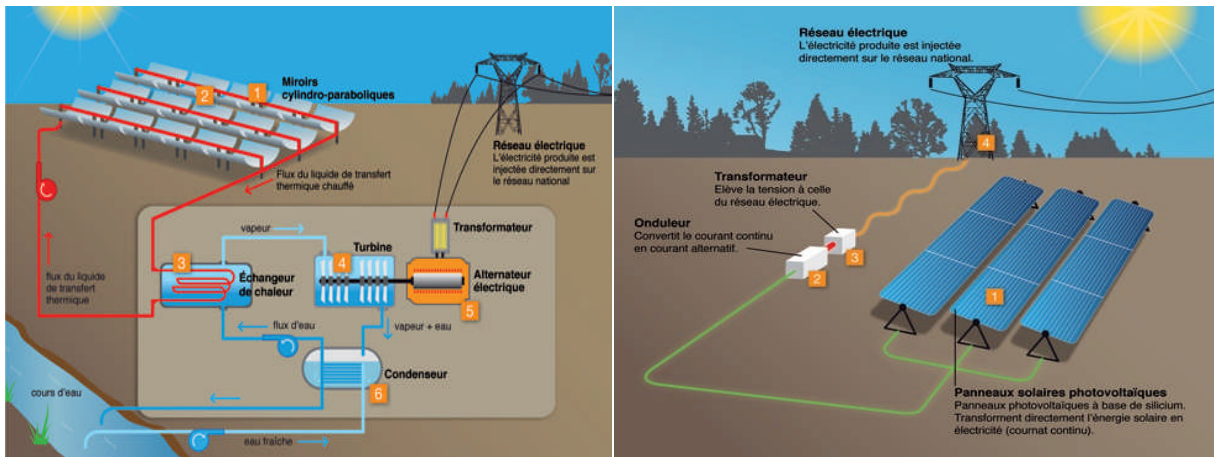


Figure I-8 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale thermique et photovoltaïque.

#### ❖ L'énergie photovoltaïque

Des semi-conducteurs, comme le silicium, ont une capacité de transformer la lumière (photons) en électricité (électrons). Cela est nommé l'effet photovoltaïque. Le principe de cet effet est que la collision entre un photon et un semi-conducteur (silicium) produit des charges positives et négatives qui engendrent un courant. Le silicium est utilisé pour la fabrication des



cellules photovoltaïques qui produisent un courant continu. Pour être injecté dans le réseau, il doit être transformé en courant alternatif à travers un onduleur.

#### ❖ L'énergie solaire thermodynamique

Le procédé utilisé dans les centrales thermodynamiques consiste à la concentration des rayonnements solaires par des miroirs pour le chauffage d'un fluide dit caloporteur à une température très élevée. La chaleur du fluide est utilisée pour la génération de vapeur suffisante pour alimenter les turbines à vapeurs qui actionnent un générateur pour produire de l'électricité.

#### ❖ L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique consiste à récupérer et utiliser la chaleur des rayons du soleil. Les chauffe-eaux, le chauffage solaire et la climatisation solaire sont des applications de l'énergie solaire thermique. Elle peut même être utilisée dans les cuisinières et les sècheurs solaires; ses applications ont été observées dans le séchage des produits agricoles comme le cacao, le café, les patates,... etc.

### I.1.2.2 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique utilise à force cinétique de l'eau pour faire tourner des turbines, permettant ainsi de créer de l'électricité. La puissance disponible des centrales hydroélectriques dépend de deux facteurs: la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau.

Une centrale hydraulique (voir la figure ci-dessous) est composée de 3 parties : Un barrage, pour créer un réservoir de stockage de l'eau, ce qui permet à la centrale de fonctionner même si il n'y a plus d'eau à arriver dans la cuve, un canal de dérivation, qui prélève l'eau nécessaire au fonctionnement de la centrale, la centrale elle-même, c'est là que les chutes d'eau font tourner la turbine, qui entraîne le générateur.

C'est la forme la plus répandue des énergies renouvelables. L'hydroélectricité est après la biomasse la deuxième énergie renouvelable : selon l'Agence internationale de l'énergie, elle fournit 2,3 % de l'énergie primaire produite dans le monde en 2011, sur un total de 13,3 %.

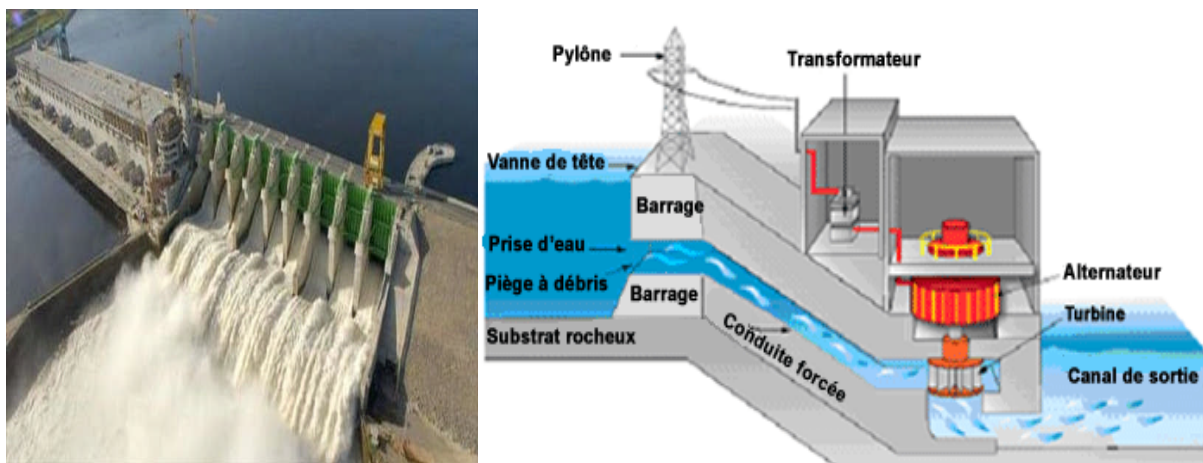


Figure I-9 : Installation pour la transformation d'énergie hydraulique en énergie électrique.

### I.1.2.3 L'énergie éolienne

L'éolienne fonctionne comme son nom l'indique au vent, puisqu' Éole est le dieu des vents dans la mythologie grecque. L'énergie éolienne est dispersée, incontrôlable et aléatoire, elle est propre, inépuisable et gratuite.

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple: La turbine assure une transformation d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est composée des pales identiques fixées à un arbre d'entraînement relié à un multiplicateur de vitesse ayant un rapport de transformation. Ce multiplicateur entraîne à son tour l'arbre de la génératrice électrique .cette dernier transforme l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique.

L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne.

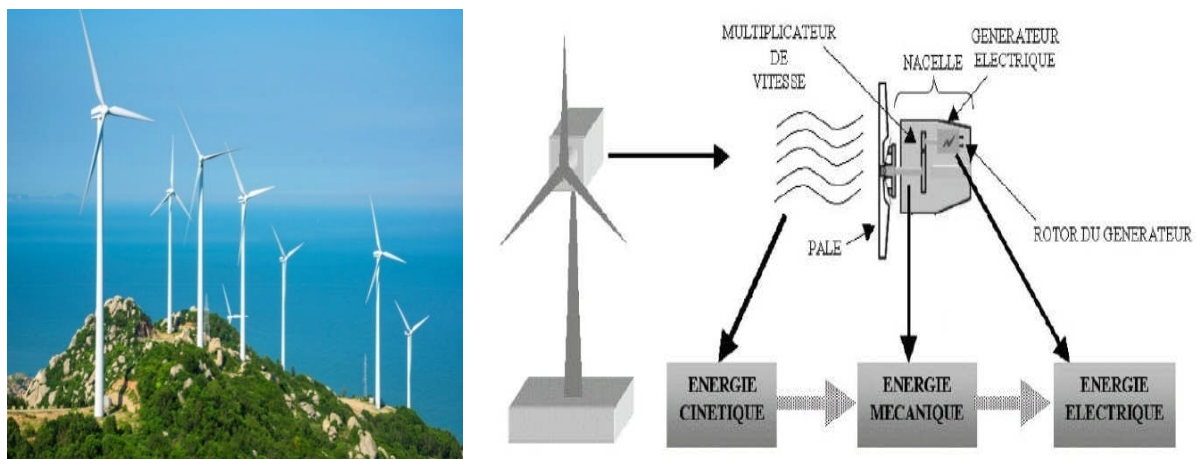


Figure I-10 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale éolien.

### I.1.2.4 La géothermie

À géothermie peut se définir simplement comme l'exploitation de la chaleur contenue naturellement dans le sous-sol. 80 % de la chaleur terrestre est issue de la désintégration des éléments radioactifs contenus dans les roches constituant la croûte terrestre, comme le thorium, le potassium ou l'uranium.

Une centrale géothermique produit de l'électricité grâce à la chaleur de la Terre qui transforme l'eau contenue dans les nappes souterraines en vapeur. Ce dernier est dirigé vers une turbine à condensation qui produit de l'énergie mécanique. La turbine entraîne un générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

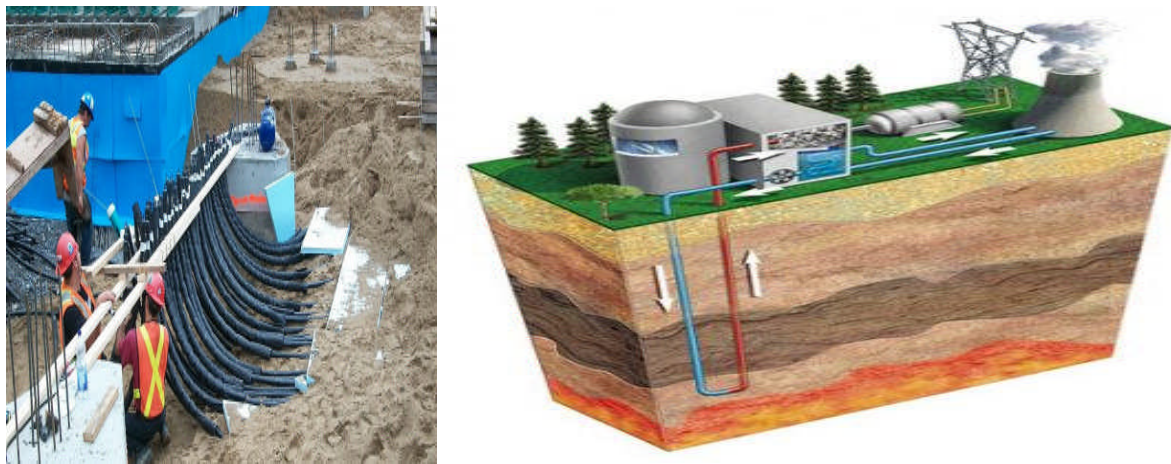


Figure I-11 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale géothermique.

### I.1.2.5 La biomasse

La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale. Les principales formes de l'énergie de biomasse sont: les biocarburants pour le transport (produits essentiellement à partir de céréales, de sucre, d'oléagineux et d'huiles usagées) ; le chauffage domestique (alimenté au bois) ; et la combustion de bois et de déchets dans des centrales produisant de l'électricité, de la chaleur ou les deux.

Cette énergie est considérée comme renouvelable si on admet que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites. On peut citer notamment le bois et les biocarburants.

Une centrale biomasse produit de l'électricité grâce à la vapeur d'eau dégagée par la combustion de matières végétales ou animales, qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur.

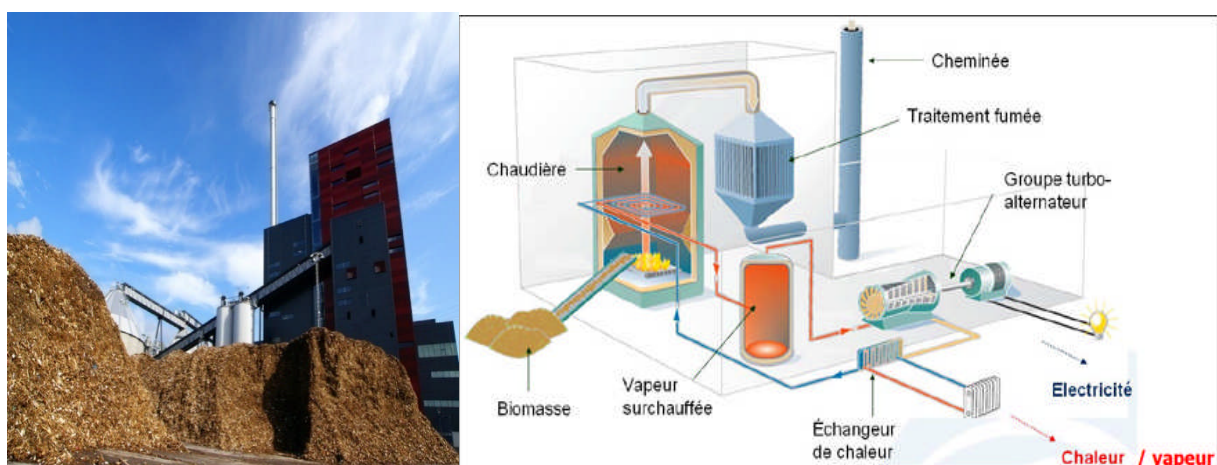


Figure I-12 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale biomasse.

### I.1.2.6 L'énergie de l'hydrogène

L'hydrogène peut être produit par électrolyse, à partir d'électricité « propre ». L'hydrogène peut remplacer les combustibles fossiles pour fournir de l'électricité de manière différente. Il peut être utilisé comme carburant pour alimenter le moteur à combustion pour la production d'électricité en faisant tourner la machine. Il peut également être directement utilisé par un électro-réacteur chimique dans les piles à combustible pour produire de l'électricité. Pour les puissances élevées la conversion la plus efficace de l'hydrogène à l'électricité peut être atteinte en production combinée en chaleur.

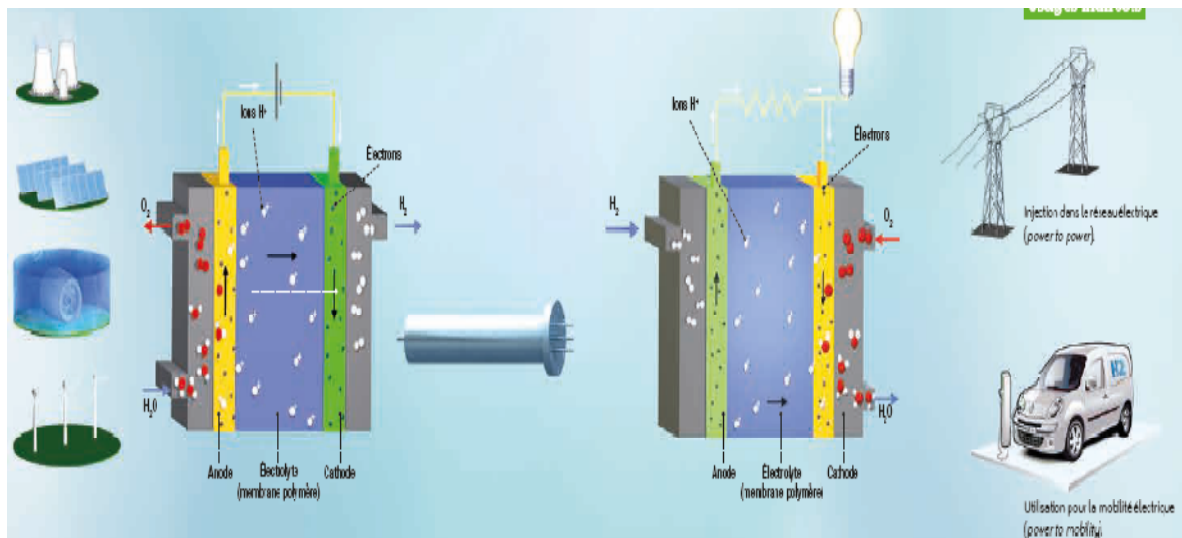


Figure I-13 : Produire et Transférer l'hydrogène en énergie électrique.

## I.2. Etat de l'art des systèmes hybrides

Les systèmes de production hybride occupent, de plus en plus, une place très importante dans la production de l'énergie électrique. Notons que la nature aléatoire des sources d'ER est la difficulté principale dans l'analyse et l'exploitation des SEH. Cependant, comment satisfaire la demande de la charge quel que soit les conditions climatiques ?

Un Système d'Energie Hybride (SEH) est une installation qui associe différentes technologies de la génération d'énergies électriques : sources renouvelables, sources conventionnelles, dans le but de réunir les avantages de chaque système et offrir un rendement énergétique global plus élevé. Par exemple, les sources d'ER, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante à cause de leurs natures aléatoires. Cependant l'association de ces dernières avec d'autres sources permet d'obtenir une production électrique continue [MAD18].



Plusieurs sources peuvent être exploitées dans les SEH. Parmi ces sources on peut distinguer les systèmes: photovoltaïque, éolien, diesel, hydraulique, l'énergie contenue dans l'hydrogène (piles à combustible), les systèmes de stockage d'énergie. Ces systèmes peuvent aussi inclure d'autres composants comme les convertisseurs statiques, la charge principale et des charges auxiliaires. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures. La figure suivante représente le schéma général des systèmes hybrides. Un bus électrique est commun à tous les éléments qui sont connectés. Ces derniers sont regroupés selon leur fonction électrique : les éléments de génération (ou sources), les éléments de charge et les éléments de stockage.

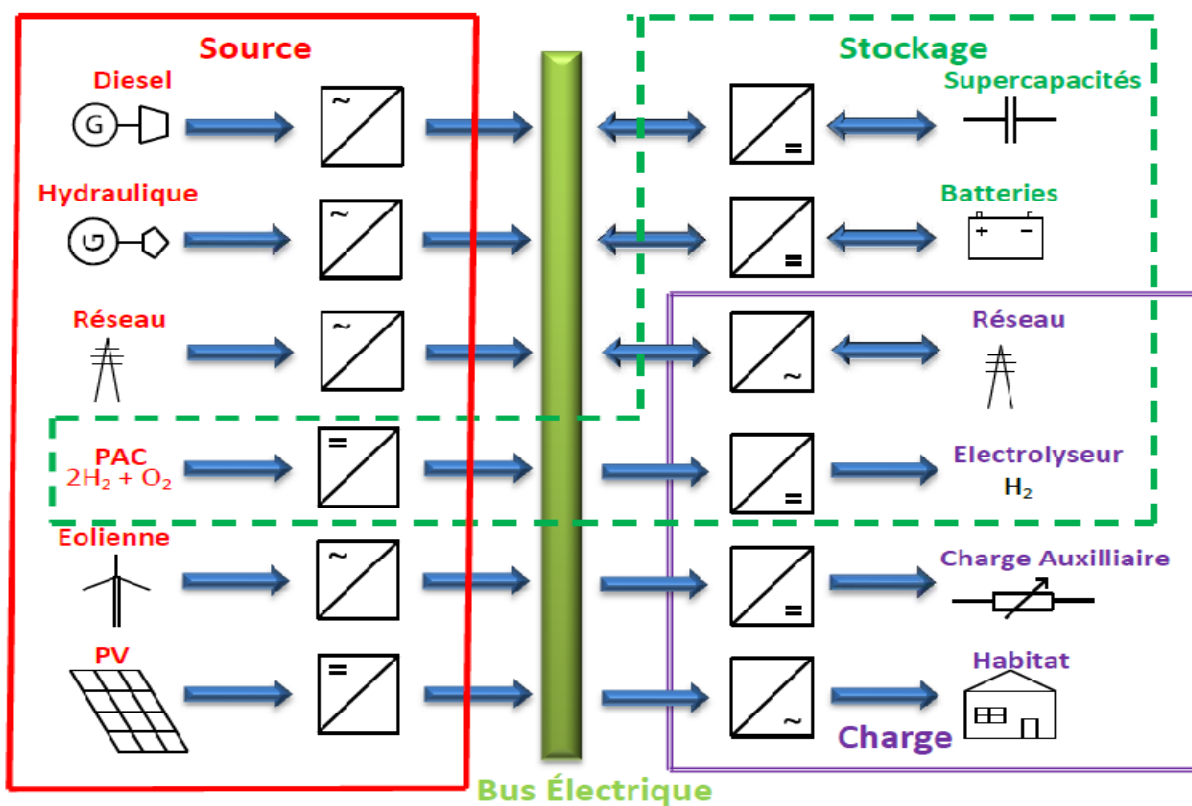


Figure I-14 : Schéma général du système d'énergie hybride [MAD18].

### I.2.1 les avantages et les inconvénients [Abb12] [Vec05]:

Parmi les avantages du système d'énergie hybride, on peut citer:

- ☉ L'intérêt essentiel d'utiliser les technologies d'hybridation est d'assurer l'énergie demandée par la charge sans interruption et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable.
- ☉ Lisser la puissance délivrée par les sources d'énergies: il s'agit d'être capable, de délivrer régulièrement des puissances supérieures à la puissance moyenne du générateur ou de récupérer de l'énergie pour recharger la source de puissance, (de stockage dans notre cas).



Néanmoins, les technologies l'hybridation posent certains problèmes à savoir Le problème de l'interconnexion de plusieurs sources complique le système de contrôle: les technologies d'hybridation sont très complexes comparativement à l'utilisation d'une seule source.

- ⊗ Le problème de la gestion énergétique : il est nécessaire de trouver un algorithme de contrôle efficace afin d'améliorer les performances globales du système.
- ⊗ La dynamique des générateurs d'ER peut causer des problèmes dans le fonctionnement des SEH : par exemple le démarrage d'une éolienne quand la vitesse du vent est élevée, dans ce cas la puissance produite par l'éolienne atteint presque instantanément la puissance nominale du générateur, en effet la production de l'énergie électrique peut connaître des changements rapides, il en résulte des problèmes de qualité d'énergie (variations de tension et de fréquence) qui peuvent détruire des appareils électroniques sensibles et même l'arrêt complet du système.
- ⊗ La durée de vie des composants d'un SEH peut être beaucoup plus courte que la durée de vie des composants individuels

## **1.2.2 Classifications des systèmes d'énergies hybrides**

On peut distinguer plusieurs classifications des SEH. Cependant le choix du type des SEH dépend particulièrement des endroits d'installation et des objectifs d'utilisations. Nous représentons ci-après les classifications les plus répandues [Sto11, Laz05].

### **1.2.2.1 Régime du fonctionnement**

Selon le régime de fonctionnement, les SEH peuvent être divisés en deux grandes familles :

#### **a) Système d'énergie hybride autonome :**

Autonome parce qu'ils génèrent de l'énergie sans connexion ou sans avoir besoin de l'assistance du réseau électrique. Souvent, utilisés pour répondre aux besoins des sites qui sont difficilement accessibles ou n'ont pas d'accès à un réseau électrique (par exemple : refuges de montagne, îles, villages isolés...)

#### **b) Système d'énergie hybride connectés au réseau :**

L'interface entre le SEH et le réseau électrique peut être constituée par le convertisseur statique, l'onduleur pour assurer la conversion de la puissance continue/alternative (DC/AC). L'énergie produite par le SEH est consommée immédiatement. En effet, le surplus d'énergie est injecté vers le réseau, qui agit comme un système de stockage d'énergie. Par conséquent pour ce type de système, il n'est

pas exigé l'utilisation de système de stockage puisqu'en cas d'incapacité du SEH pour assurer la demande de la charge, le réseau intervient pour garantir l'énergie nécessaire.

### 1.2.2.2 Gamme de la puissance

La puissance délivrée par les SEH peut varier de quelques watts jusqu'à quelques mégawatts. Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de faible puissance (<5kW) généralement alimentent des petites maisons. Par contre, les systèmes plus grands (puissance >500kW) sont conçus pour être connectés à de grands réseaux. Le champ d'application des SEH reste très large. Néanmoins, on peut réaliser une classification selon la gamme de puissance présentée au tableau suivant :

Gamme de puissance	Utilisation
<b>Faible</b> : inférieur à 5 kW	Système autonome : petite maison, pompage d'eau
<b>Moyenne</b> : entre 10 à 250 kW	Alimentation d'un village isolé, des zones rurales...
<b>Grande</b> : supérieure à 500 kW	Grands réseaux isolés.

## I.3 Les différentes configurations et architectures de systèmes hybrides à énergie renouvelables

Selon le bus électrique dans les systèmes d'énergie hybrides, nous distinguons trois architectures ou configurations à savoir :

### I.3.1 Système hybride à configuration continu DC

La figure suivant représente la structure à bus DC d'un système d'énergie hybride [Abb12]. Dans cette architecture, l'énergie fournie par chaque source du système alimente un bus continu DC à travers des convertisseurs DC/DC ou AC/DC. Ce type d'assemblage est adapté pour les sites isolés, à charge continue ou alternative, reliée au bus DC via un onduleur. L'avantage de cette topologie est la simplicité de la commande par rapport aux autres configurations [Vec05].

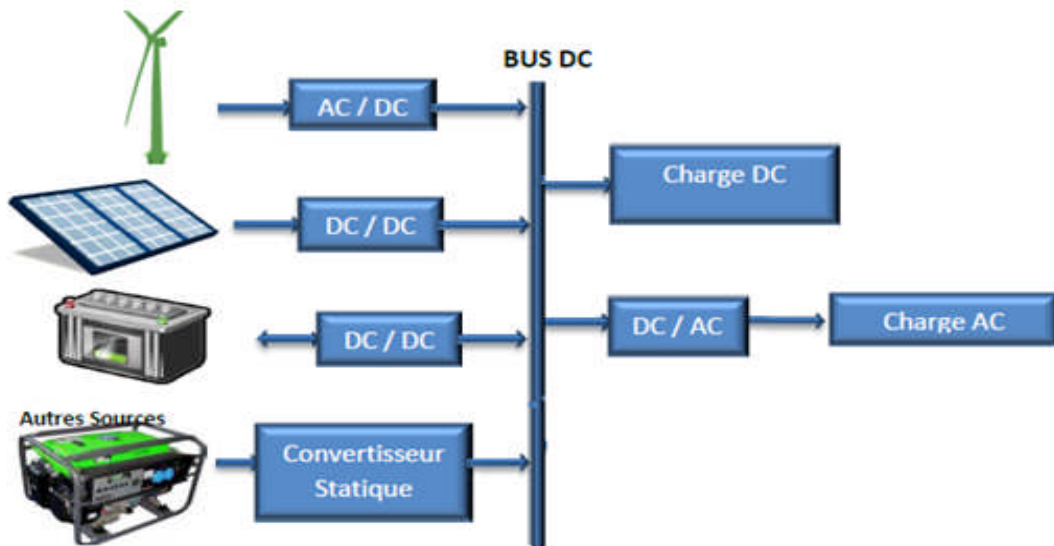


Figure I-15 : Structure à bus DC d'un système hybride.

### I.3.2 Système hybride à configuration alternatif (AC)

Dans la configuration à bus AC, toutes les sources de productions sont reliées au bus AC via des convertisseurs comme montrée dans la figure suivante [Abb12]. Cette configuration offre des performances supérieures par rapport à la configuration précédente, puisque un découplage de différentes sources de production permettrait à celles-ci d'agir de façon assez indépendante les unes des autres.

Cependant, le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause de l'utilisation des convertisseurs statique set ce type d'association complique le système de commande. L'architecture à bus AC est plus adaptée à une génération distribuée (c.-à-d. raccordée au réseau électrique) [Cro13].

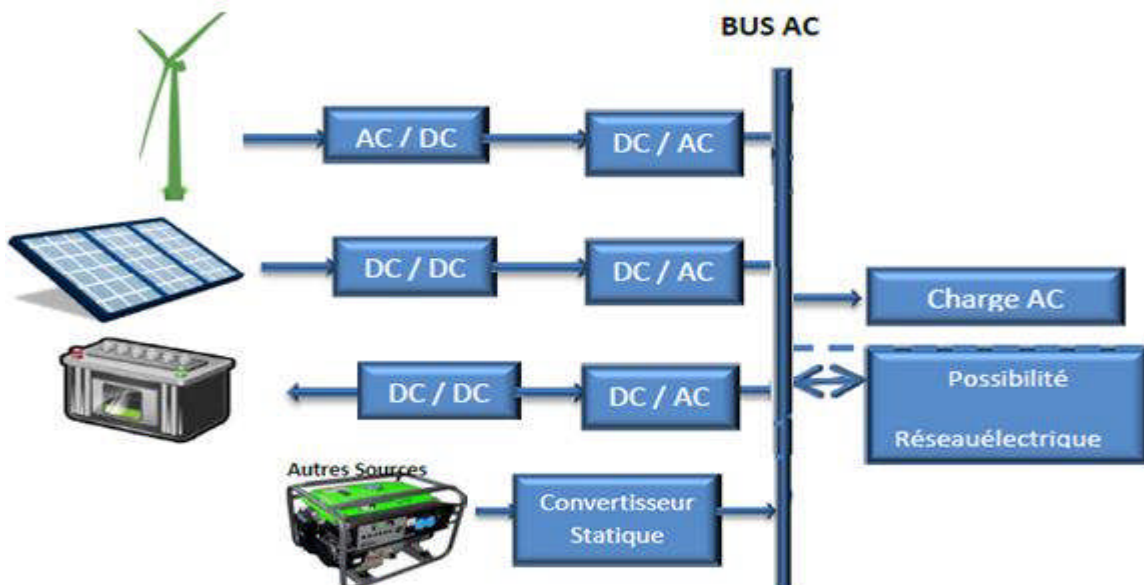


Figure I-16 : Structure à bus AC d'un système hybride.

### I.3.3 Système hybride à configuration DC-AC

La figure suivant représente la structure à bus mixte (DC&AC) d'un système hybride [Abb12]. Dans cette configuration, les sources d'énergie peuvent alimenter une charge alternative AC ou une charge continue DC par un convertisseur bidirectionnel qui réalise la conversion continue-alternative et vice versa.

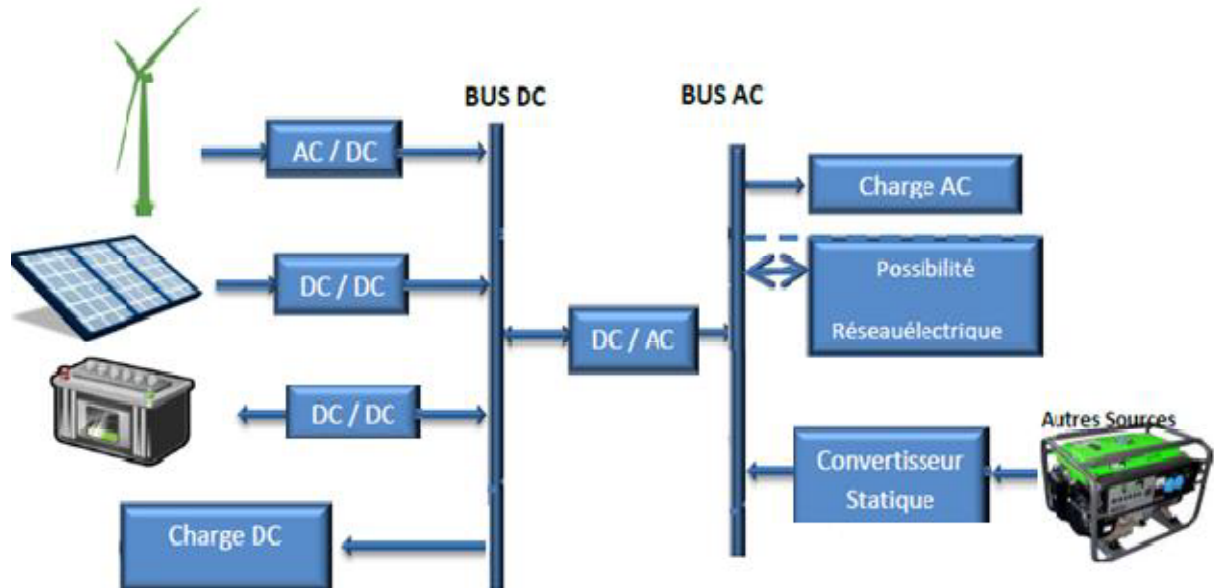


Figure I-17 : Structure à bus mixte (DC& AC) d'un système hybride mondiale.