

**ECOLE NORMALE D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE ET PROFESSIONNEL (ENETP)**  
**DEPARTEMENT GÉNIE MÉCANIQUE – ÉNERGÉTIQUE & MINES (GMEM)**  
**MI ÉNERGÉTIQUE**

**CHAPITRE II :**

**Les sources d'énergies renouvelables**

**Cour préparé et présenté par**

**Dr Bakary dit Dembo SYLLA**

**Email : [dembo.d.d.sylla@gmail.com](mailto:dembo.d.d.sylla@gmail.com) / [bakary.d.d.sylla@aims-senegal.org](mailto:bakary.d.d.sylla@aims-senegal.org)**

## **Chapitre II**

### **Les sources d'énergies renouvelables**

#### **Introduction**

#### **I.1 Contexte actuel**

##### **I.1.1 Energies dans le monde**

##### **I.1.2 Energies fossiles et impacts environnementaux**

##### **I.1.3 Le passage de l'ère du pétrole au post pétrole**

#### **I.2 Définition des Energies renouvelables, exploitation [03], [04]**

#### **I.3 Les différents types d'énergies renouvelables**

##### **I.3.1 L'énergie solaire**

##### **I.3.2 L'énergie éolienne**

##### **I.3.3 L'énergie hydraulique**

##### **I.3.4 La géothermie**

##### **I.3.5 Le biogaz**

##### **I.3.6 La biomasse**

##### **I.3.7 L'énergie marémotrice**

#### **I.4 Les énergies renouvelables au Mali.**

##### **I.4.1 Potentiel d'énergie solaire au Mali.**

##### **I.4.2 Potentiel d'énergie éolienne au Mali.**

##### **I.4.3 Potentiel de l'énergie géothermique.**

##### **I.4.4 Potentiel de l'hydroélectricité.**

##### **I.4.5 Le Potentiel de la Biomasse**

**Avant-Propos****Avant propos**

Un des grands challenges qui menacent la vie future de l'humanité est la pollution, l'eau et l'énergie. Ces deux derniers sont considérés comme l'élément porteur de toute civilisation. Pour cette raison, l'homme de l'âge moderne doit rationaliser leur utilisation et se trouve dans l'obligation de découvrir des solutions alternatives capables de remédier la situation actuelle de pollution d'eau, d'atmosphère qui est généré essentiellement des rejets d'industrialisation, de transport ainsi que d'usage domestique.

Nous avons assisté ces dernières décennies au phénomène de réchauffement climatique qui a engendré de sérieux dangers sur la terre. Ce phénomène a trainé la planète dans l'instabilité climatique accompagnée par des catastrophes naturelles (la température élevée, les éruptions volcaniques, les tremblements de terre, les inondations, les ouragans...etc.). Cette perturbation du climat ou « l'effet de serre » est dû à la quantité importante du CO<sub>2</sub> émis dans l'atmosphère. Ajoutant au problème des gaz nocifs émis, les spécialistes se soucient aussi des réserves des énergies fossiles (gaz et pétrole) qui tendent vers l'épuisement.

Le monde actuel cherche à trouver des solutions pour réduire la quantité de CO<sub>2</sub> dans l'air par l'utilisation de plusieurs méthodes innovantes. Ainsi, beaucoup de techniques ont été inventé pour minimiser ces émissions comme la liquéfaction du CO<sub>2</sub>, et l'enterrement de ce gaz au niveau des usines du forage. Sur le plan politique la délivrance d'impôt pour la quantité du CO<sub>2</sub> émise s'avère une solution qui peut réguler les rejets des gaz à effet de serre.

Les nouvelles stratégies pour réduire ce gaz penche vers la **substitution** de l'énergie fossile utilisé par l'utilisation de **l'énergie renouvelable**. Pour préserver la première (pétrole, gaz...etc.) de l'épuisement et bénéficier des bienfaits de la deuxième qui est considérée comme une énergie propre.

Dans ce support de cours concernant les énergies renouvelables nous allons exposer des généralités sur les différents types des énergies renouvelables avec leurs principes de fonctionnement et les différentes techniques utilisées.

Ce travail a été effectué à base de la collecte de données précises et ciblés afin de faciliter la compréhension aux étudiants.

## **I. Les sources d'énergies renouvelables**

### **Introduction**

Avec l'épuisement progressif des énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, houille, etc.), les énergies renouvelables (éolienne, hydraulique, géothermique, solaire, biomasse...) se développent de plus en plus. Elles ont le double avantage d'utiliser des flux inépuisables d'énergie naturelle (soleil, vent, eau, bois, etc.) et de ne pas, ou peu, nuire à l'environnement.

Ce type d'énergie ne couvre encore que 20% de la consommation mondiale d'électricité.

Nous notons que l'hydroélectricité existe depuis près d'un siècle et constitue environ 16 % de la production mondiale d'électricité et représente 92,5% de l'électricité issue des énergies renouvelables (biomasse 5,5%, géothermie 1,5%, éolien 0,5 % et le solaire 0,05 %). [01]

### **I.1 Contexte actuel**

#### **I.1.1 Énergies dans le monde**

Débutant avec la révolution industrielle, le taux de gaz carbonique dans l'atmosphère a commencé à s'accroître avec l'utilisation à grande échelle du pétrole comme source principale d'énergie. Au cours des dernières décennies, le rythme s'est accéléré avec l'industrialisation de nombreux pays. En effet, l'humanité consomme actuellement trente fois plus d'énergie qu'il y a un siècle [02].

Par ailleurs, l'utilisation de carburants d'origine fossile pose deux problèmes majeurs : celui du rejet de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, qui est un gaz à effet de serre et celui du prélèvement de ressources non renouvelables, passible de l'épuisement. Ces deux problèmes représentent aujourd'hui des enjeux importants pour les gouvernements des pays industrialisés et pour des grands organismes internationaux.

#### **I.1.2 Énergies fossiles et impacts environnementaux**

Le XX<sup>ème</sup> siècle a connu le plus grand réchauffement jamais enregistré depuis au moins un millénaire. Les causes ne sont pas tant à rechercher dans la nature que dans la concentration dans l'atmosphère en CO<sub>2</sub> et des autre gaz dus à l'activité humaine. Même si certaines divergences existent, la communauté scientifique est d'accord sur le fait que l'aggravation de l'effet de serre dû à l'activité humaine joue un rôle de premier rang dans les changements climatiques actuels. De plus, on s'attend à ce que les gaz à effet de serre et la température continuent à augmenter dans les années à venir.

##### **a. Le mécanisme de l'effet de serre**

Même si actuellement l'effet de serre est associé au réchauffement climatique, il est initialement un phénomène naturel indispensable à la vie sur Terre. Cet effet de serre permet à l'atmosphère terrestre de se maintenir à une température moyenne de +15°C. Sans lui, la température moyenne à la surface de la Terre serait de -18°C, toute l'eau serait de glace et il n'y aurait probablement pas de vie sur Terre.

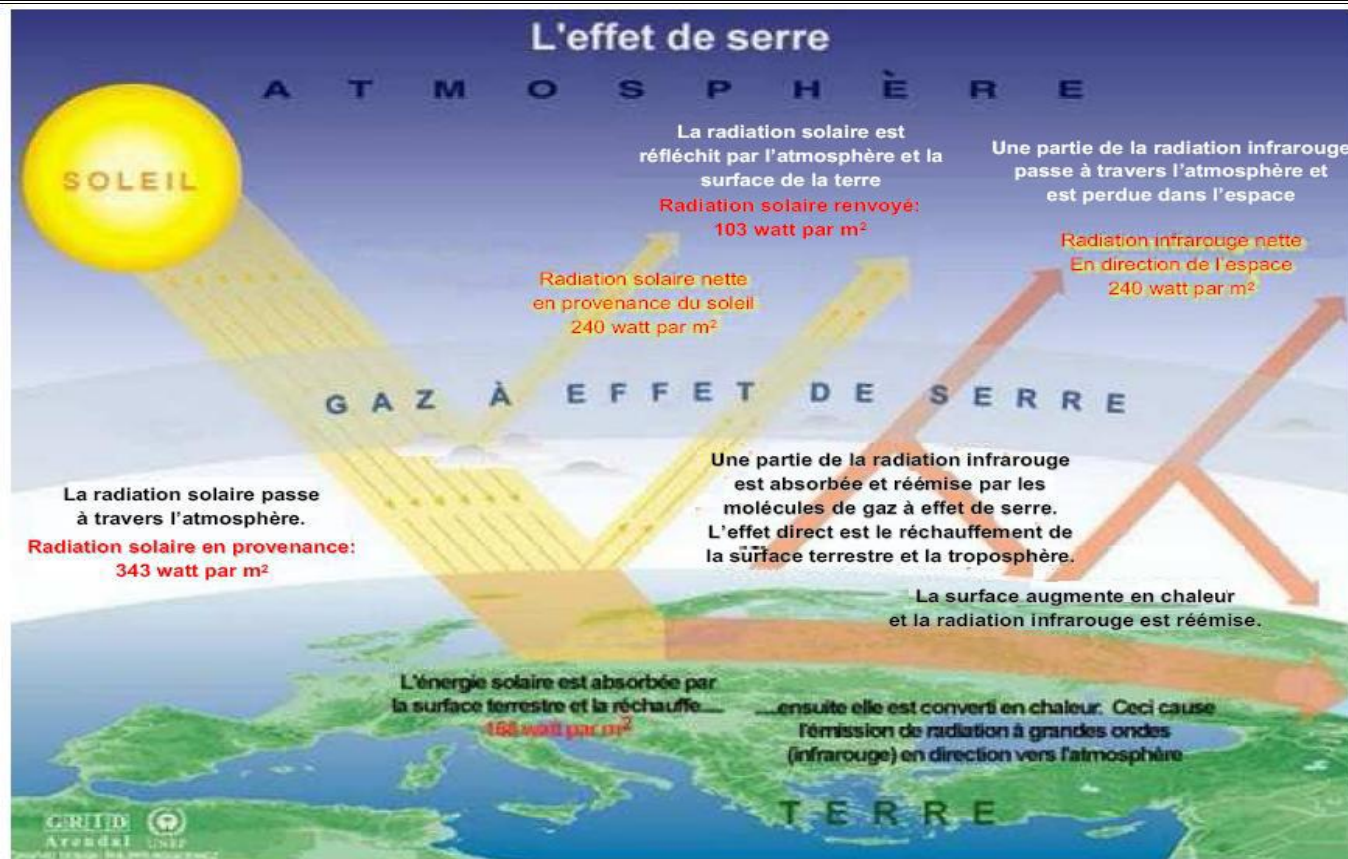
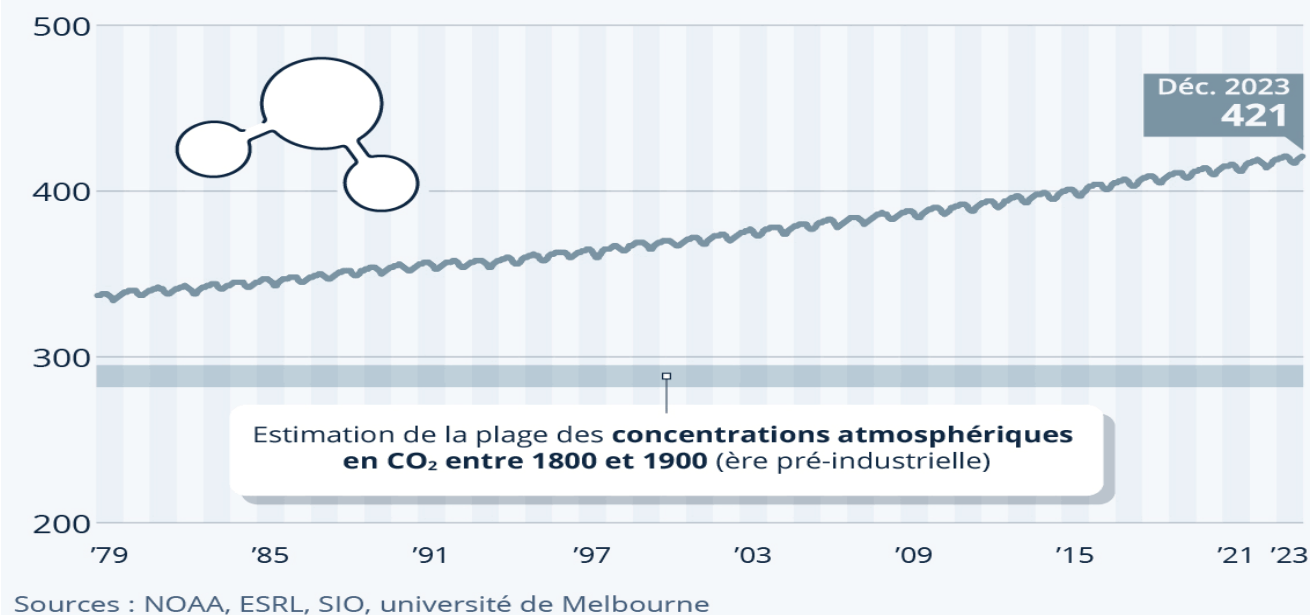


Figure I-1: Schéma explicatif de l'effet de serre

## Le rythme d'accroissement du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère s'accélère

Évolution de la concentration mensuelle de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (1979-2023) et niveau à l'ère pré-industrielle

Figure I-2 : Concentration de CO<sub>2</sub> à l'échelle planétaire

Source : NOAA, ESRL, SIO, Université de Melbourne. Graphics 2023

La Fig.1.1 présente le principe de fonctionnement de l'effet de serre. La terre reçoit une grande quantité d'énergie du soleil. Elle absorbe une partie de cette énergie et se réchauffe réémettant ensuite de la chaleur par l'intermédiaire des rayons infrarouges. Sans les gaz dits « à effet de serre », qui interceptent une partie de ces infrarouges émis par la Terre, toute cette chaleur serait renvoyée dans l'espace.

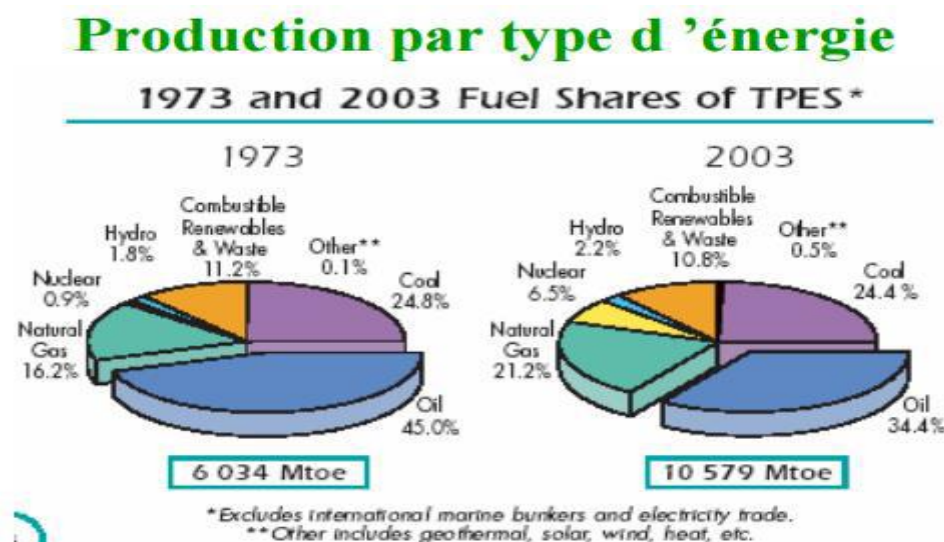
Les gaz à effet de serre sont naturellement très peu abondants. Mais du fait de l'activité humaine, depuis la révolution industrielle, la concentration de ces gaz dans l'atmosphère s'est sensiblement modifiée. Ainsi, la concentration en CO<sub>2</sub>, principal gaz à effet de serre, a augmenté d'environ 35% depuis l'ère préindustrielle 280ppm (19<sup>ème</sup> siècle), **atteignant maintenant 421 ppm (parties par million) (pour l'année 2023) soit 151% comme présenté sur la Fig.1.2.** Cela représente 4 ppm de plus qu'il y a deux ans et 24 ppm qu'il y a dix ans, en 2013. Les trois quarts de CO<sub>2</sub> de ces dernières années sont dus **à la combustion fossile de charbon, de pétrole ou de gaz et une éventuelle réduction de l'absorption du carbone par les forêts.**

Les effets combinés de tout gaz à effet de serre équivalent aujourd'hui à une augmentation de 50% de CO<sub>2</sub>. Ce surplus artificiel d'effet de serre, appelé « l'effet de serre additionnel », retient dans l'atmosphère une plus grande quantité de rayonnement infrarouge provoquant un réchauffement du climat.

### I.1.3 Le passage de l'ère du pétrole au post pétrole

Par leur nature, les ressources fossiles sont limitées et épuisable. Leur épuisement parviendra d'autant plus vite que la consommation est grande. La situation actuelle devient fortement préoccupante du fait de l'approche du pic de production avec une demande qui ne cesse de croître. En effet, le pétrole commencera à manquer lorsque la production ne pourra plus suivre la consommation.

Ces considérations sur l'état de la production du pétrole imposent une diversification de la production d'énergie et un changement technologique majeur dans tous les domaines. Ainsi, un intérêt croissant est porté aux énergies renouvelables et nucléaires.



Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables.

## **I.2 Définition des Énergies renouvelables, exploitation :**

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité.

Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateaux à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

Mais dans les pays industrialisés, dès le XIX<sup>ème</sup> siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses. Dès lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire.

Les chocs pétroliers successifs depuis les années 70 ont démontré les risques économiques et géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les réserves sont mal réparties et épuisables. De plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles à y accéder.

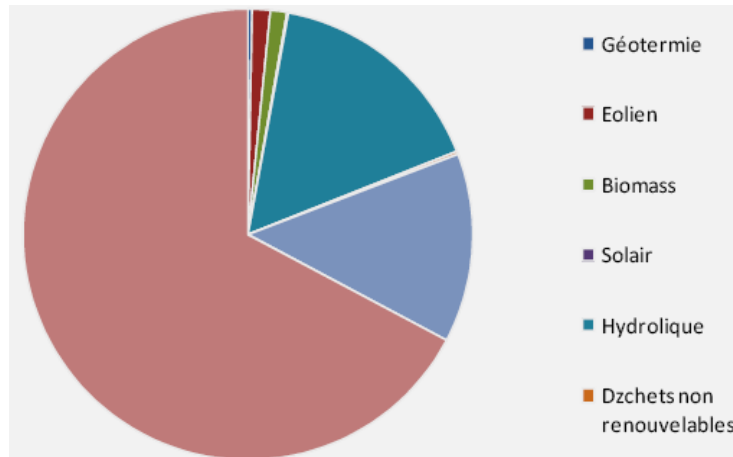
Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres :

- Elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets ;
- Elles peuvent atténuer :
  - Les effets des pluies acides
  - L'ozone au niveau du sol.
  - La brume sèche régionale.
  - Les particules.
  - La menace d'un rechargement climatique



- Elles sont inépuisables et gratuites ;
- Elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux ;
- Elles offrent une importante indépendance énergétique.

La production d'électricité renouvelable a atteint 3810.3 TWh en 2009, soit 19.1% de la production d'électricité mondiale contre 30.24% en 2023.



**Figure I-3: Structure de la production d'électricité 2023. [05]**

### **I.3 Les différents types d'énergies renouvelables**

#### **I.3.1 L'énergie solaire**

Transformation de l'énergie solaire en électricité ou en chaleur à partir de panneaux ou de capteurs solaires. Le soleil, principale source des différentes formes d'énergies renouvelables disponibles sur terre.

Il existe deux types :

##### **a. L'énergie solaire photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie.



**Figure I-4: Module photovoltaïque**



### b. L'énergie solaire thermique

Elle est radicalement différente de l'énergie solaire photovoltaïque, elle, produit de la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge afin de chauffer de l'eau ou de l'air. On utilise dans ce cas des capteurs thermiques qui relèvent d'une toute autre technologie.

Dans le langage courant, ce sont des « chauffe-eau solaires » ou des « capteurs à air chaud ».

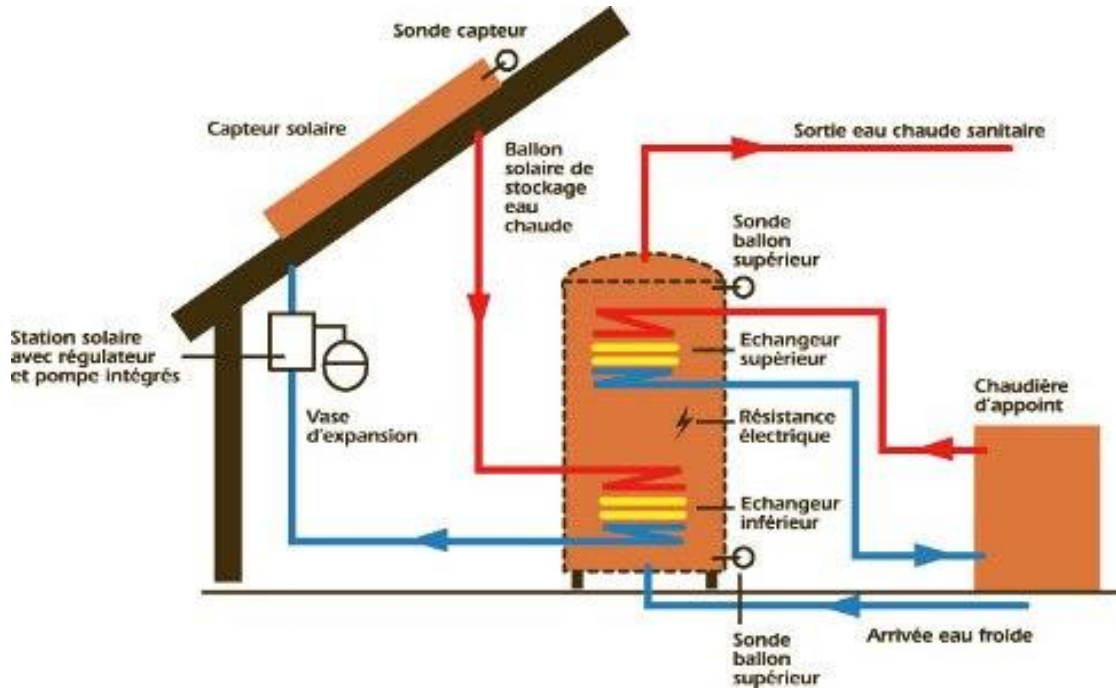


Figure I-5: Chauffe-eau solaire

### c. L'énergie solaire thermodynamique

Il y a aussi ce qu'on appelle l'énergie solaire thermodynamique, qui fonctionne sur le principe de concentration des rayons solaires au moyen des miroirs galbés, en un foyer placé sur une tour qui emmagasine les calories pour les restituer ensuite sous forme mécanique à l'aide d'une turbine à vapeur par exemple.







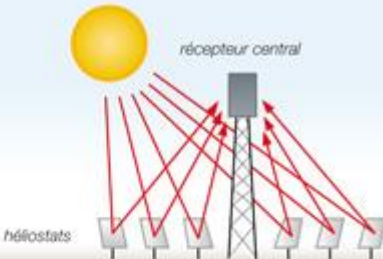
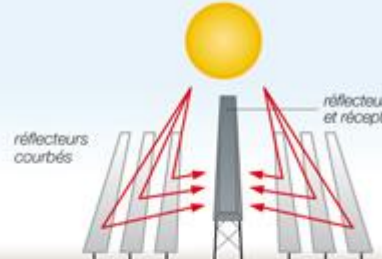
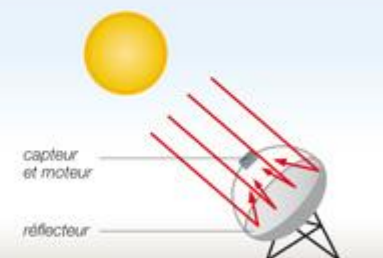
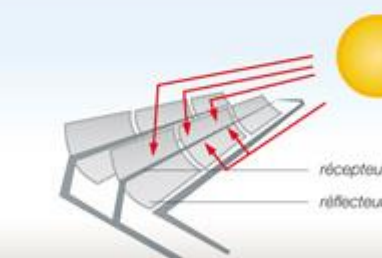
Récepteurs	Focalisé sur un point	Focalisé sur une ligne
Fixes		
Maturité industrielle et commerciale	<p><b>Centrales à tours</b></p> <p>Les réflecteurs dotés d'un système de suivi du soleil sur 2 axes concentrent le flux solaire au sommet d'une tour fixe. Cette solution a dépassé l'échelle pilote pour atteindre la validation commerciale. Les perspectives d'amélioration de l'efficacité sont prometteuses quand on les compare à l'ensemble des technologies étudiées.</p>	<p><b>Capteurs Fresnel linéaires</b></p> <p>Les réflecteurs linéaires de Fresnel utilisent des miroirs de faible courbure pour concentrer le flux sur un récepteur surfacique fixe. Cette technologie présente de nombreux avantages : faible coût de l'électricité, compacité, simplicité d'opération, faible consommation d'eau liée à l'utilisation de refroidissement à l'air...</p>
Mobiles		
Maturité industrielle et commerciale	<p><b>Disques paraboliques</b></p> <p>Les coupôles paraboliques suivent la course solaire suivant deux axes et concentrent le flux solaire en leur point focal. Depuis 25 ans, divers développements ont été menés avec des modules de puissance unitaire de 1 kW à quelques dizaines de kW. Le plus grand capteur construit avait une superficie de 400 m<sup>2</sup> et le moteur situé au foyer, une puissance de 40 kW. Depuis 2005, des réalisations ambitieuses ont été lancées aux USA.</p>	<p><b>Cylindro paraboliques</b></p> <p>La collecte cylindro parabolique suit la course solaire suivant 1 seul axe et concentre les flux solaires linéairement sur des tubes liés au réflecteur. En régime de diffusion depuis 2007, la croissance du marché pour cette technologie est en Espagne et aux USA. Cette technologie bénéficie d'un recul d'exploitation suffisamment long pour avoir encore la faveur des banques par rapport aux technologies nouvelles (centrales à tour et technologie Fresnel).</p>

Figure I-6: Tour solaire

### I.3.2 L'énergie éolienne:

C'est une énergie produite par le vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur ou un moulin à vent.



Figure I-7: éolienne

### I.3.3 L'énergie hydraulique

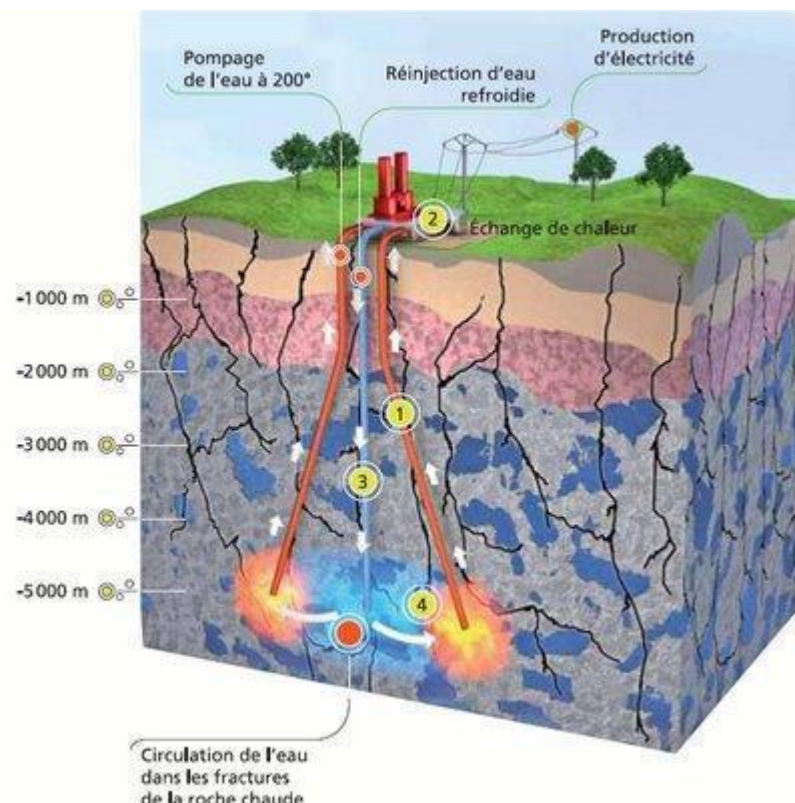
Utilisant des cours d'eau pour produire d'électricité.



**Figure I-8:** Chute d'eau d'une cours d'eau.

### I.3.4 La géothermie

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol. La plus grande partie de la chaleur de la terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre.

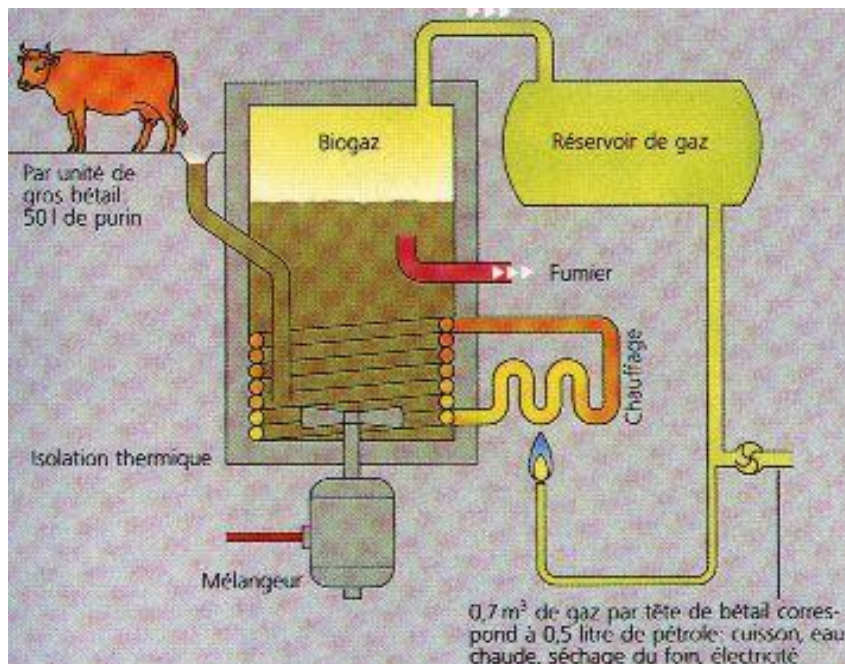


**Figure I-9:** Centrale géothermique de Nesjavellir en Islande.

### I.3.5 Le biogaz



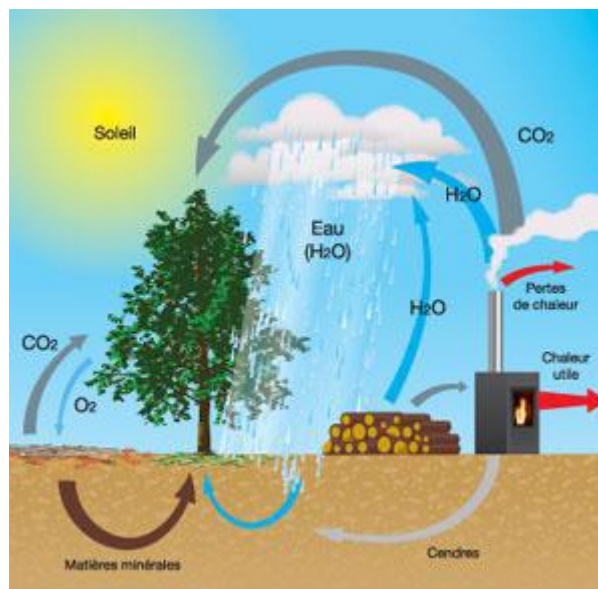
Utilisation de l'énergie générée par la combustion du gaz méthane collecté et produit par les déchets organiques parvenant de l'agriculture et des décharges industrielles.



**Figure I-10:** Le principe du biogaz

### I.3.6 La biomasse

Il s'agit d'énergie stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse, et exploitée par combustion (bois et autre biocarburants). Elle est considérée comme renouvelable si on admet que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites.



**Figure I-11:** Le principe de La biomasse

### I.3.7 L'énergie marémotrice

L'énergie des vagues (marée haute, marée basse), transformée en énergie électrique.



**Figure I-12:** Le principe de la marémotrice

#### **I.4 Les énergies renouvelables au Mali []**

Ces dernières

##### **I.4.1 Potentiel d'énergie solaire au Mali [06]**

De par