

# Projet **MACSEN-PV**

MANUEL POUR L'ENSEIGNANT SUR LES ÉNERGIES  
RENOUVELABLES ET LEUR INTÉGRATION AU  
RÉSEAU ÉLECTRIQUE



Cette publication a vu le jour grâce à l'appui du Programme Européen PCT-MAC 2007-2013 (<http://www.pct-mac.org/>). Son contenu a été élaboré par les partenaires du projet et ne reflète pas nécessairement le point de vue de l'Union Européenne. Ni la Commission Européenne, ni qui que ce soit au nom de celle-ci ne peut être tenu pour responsable de l'usage de l'information contenue dans cette publication.

**Titre:** MANUEL POUR L'ENSEIGNANT SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES ET LEUR INTEGRATION AU RESEAU ELECTRIQUE. MACSEN-PV. 2012

**Auteurs:** M. Friend, M. Alonso, I. Youm, C. Wade, G. Galván, M. Iriarte, A. Pío, C. González, E. Pérez, A. Linares, N. Losada, E. H. Sylla, A. T. Niang, M. Hernández-Abad, E. López, G. Moncho.

**Coordination de l'édition:** AIET – Agencia Insular de Energía de Tenerife. Adresse: Polígono Industrial de Granadilla, s/n. 38600. Granadilla de Abona. S/C de Tenerife. [www.agenergia.org](http://www.agenergia.org)  
[agenergia@agenergia.org](mailto:agenergia@agenergia.org)

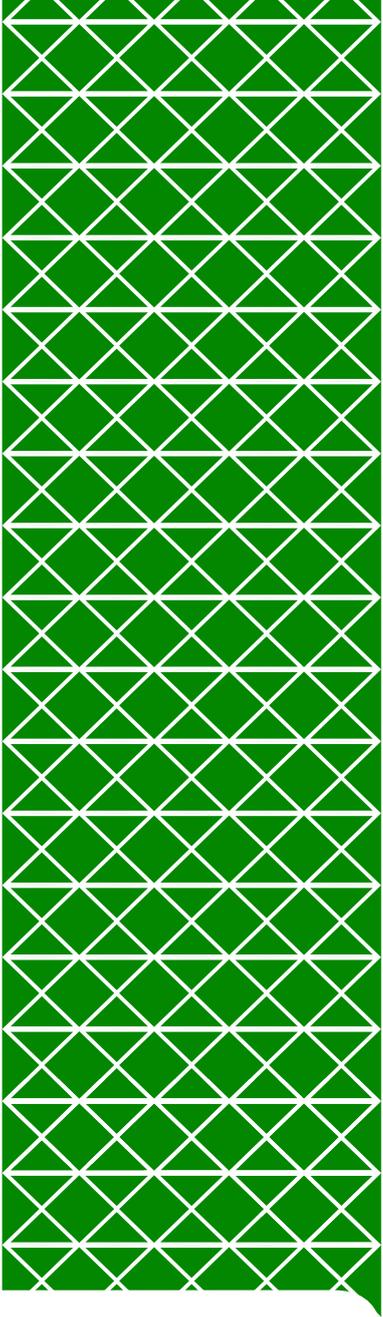
**Autres organisations participantes:**

ITER - Instituto Tecnológico y de Energías Renovables. [www.iter.es](http://www.iter.es)

ASER - Agence Sénégalaise d'Électrification Rurale [www.aser.sn](http://www.aser.sn)

CERER - Centre d'Etudes et de Recherches sur les Energies Renouvelables <http://cerer.ucad.sn/>

Le but de ce document est de fournir aux enseignants un ensemble de ressources dignes d'intérêt pour l'enseignement dans le domaine de l'énergie. Etant donné que sa diffusion par des tiers peut contribuer à augmenter son efficacité, ce document peut être reproduit et distribué librement, en totalité ou partiellement, à condition expresse que soit cité son auteur le projet MACSEN-PV et qu'il s'agisse d'usage à but non commercial.



## HISTORIQUE

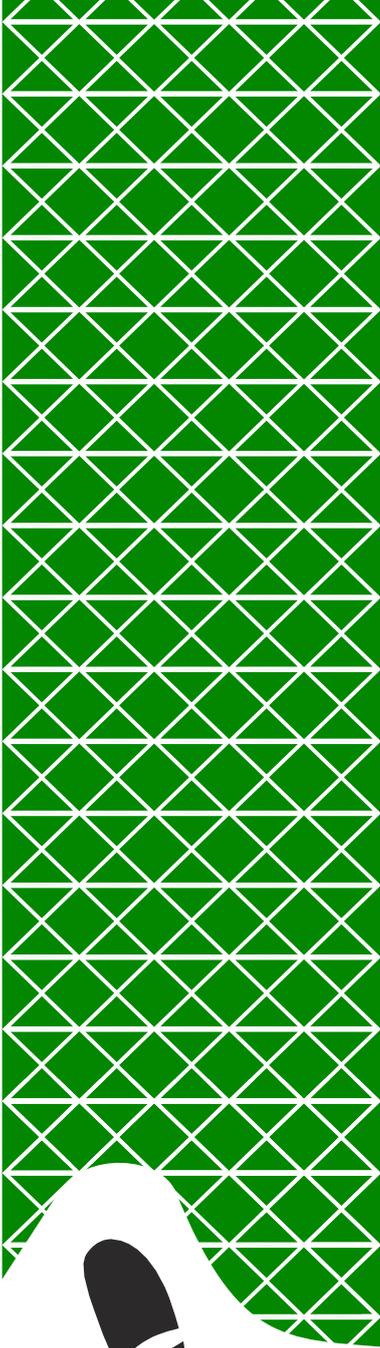
## HISTORIQUE

Ce document fait partie du projet européen MACSEN-PV, cofinancé par le programme européen PCT-MAC 2007-2013, lequel est conçu en tant que plateforme de coopération technique entre Tenerife et le Sénégal pour l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques. Son objectif principal est d'améliorer les capacités des décideurs publics et des techniciens locaux, dans le but de favoriser l'implantation des énergies renouvelables au niveau de la fourniture d'énergie électrique dans ces régions.

Lors de la phase antérieure du projet: "Analyse de l'environnement", la collaboration entre les divers partenaires (ITER, AIET, ASER Y CERER) a permis d'élaborer plusieurs rapports destinés à identifier dans les régions participantes les ressources disponibles, les prévisions de croissance de la demande énergétique, la législation en vigueur, les principaux besoins du marché de l'électricité, et les carences formatives dans ce domaine. Ces documents sont disponibles sur la page web du projet (<http://macsen-pv.iter.es>).

Le rapport « Analyse des plans de formation d'enseignement supérieur et des opportunités d'emploi dans le secteur des énergies renouvelables aux Canaries et Sénégal » a permis de prendre connaissance de la situation actuelle dans ces deux régions et servent de point de départ aux actions ultérieures du projet MACSEN-PV, entre lesquelles se trouve l'élaboration de ce Manuel. En complément à l'information contenue dans ce Manuel, le projet MACSEN-PV a développé d'autres documents et ressources telles le bureau d'assistance en ligne pour le gestionnaire public et pour l'enseignant, accessible sur la page web du projet.





## INTRODUCTION

## INTRODUCCION

L'énergie est à la base du développement de notre société moderne. Ses différentes formes ont évolué, depuis l'utilisation du bois, en passant par le charbon, jusqu'au pétrole, dont nous dépendons presque exclusivement.

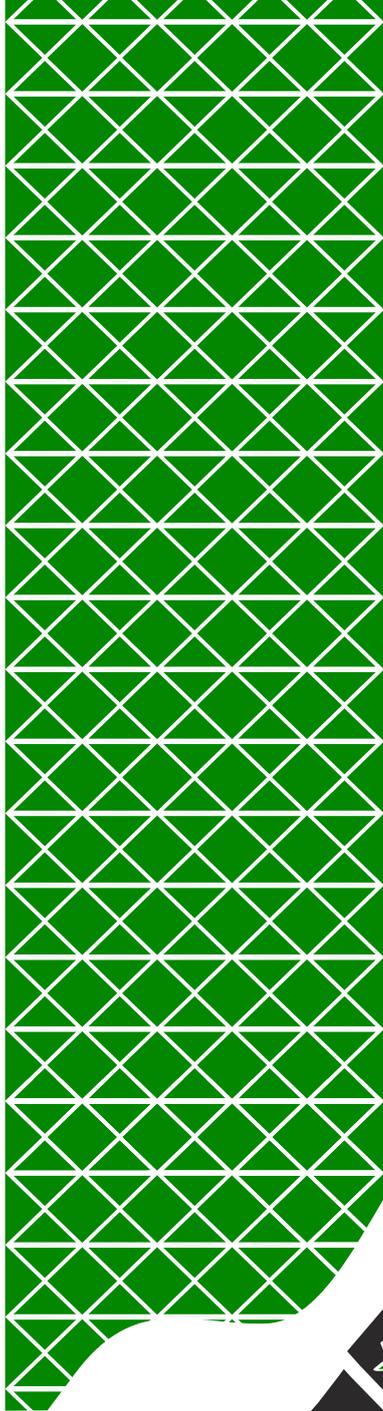
Sans énergie peu coûteuse et abondante, jamais nous n'aurions pu atteindre le niveau de vie dont nous jouissons actuellement ; cependant, les ressources énergétiques fossiles ne sont pas illimitées et les trouver et les extraire devient de plus en plus difficile. Ceci se traduit par une hausse des prix des carburants et entraîne une dépendance élevée de ceux-ci. Il faut ajouter à ce facteur le grand problème relatif aux émissions de gaz à effet de serre et autres polluants liés à l'usage des énergies fossiles, qui commence à peser sérieusement sur l'équilibre de notre environnement.

Les énergies renouvelables, éolienne, solaire (thermique et photovoltaïque), hydraulique, marémotrice, géothermique et la biomasse, constituent une alternative essentielle aux combustibles fossiles. Leur utilisation permet non seulement de réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant de la production et de la consommation d'énergie, mais aussi de réduire notre dépendance énergétique face aux importations de combustibles fossiles (essentiellement gaz et pétrole).

L'UE poursuit un objectif ambitieux: atteindre une participation de 20% d'énergies renouvelables dans son bouquet énergétique. Pour y arriver, elle prévoit d'intensifier ses efforts dans les domaines de l'électricité, du chauffage et du refroidissement, ainsi que des biocarburants. Dans le domaine des transports, qui dépend presque exclusivement du pétrole, la Commission désire augmenter d'ici 2020 la part des biocarburants jusqu'à hauteur de 10% de la consommation totale de carburants.

Tous ceci se traduit par une transition énergétique vers un autre système plus durable, autant du point de vue de l'économie que de l'environnement. La production d'énergie d'origine renouvelable augmente, et entraîne une demande croissante de profils professionnels et d'entreprises spécialisées dans ce secteur.

La formation adéquate du capital humain local est indispensable à la mise en œuvre des actions de promotion des énergies renouvelables. Cependant, la formation dans ce domaine est encore très limitée et les enseignants ne disposent pas suffisamment de soutien technique à cet égard.



## CONTENU DU MANUEL

## CONTENU DU MANUEL

Ce guide se veut être un support didactique destiné au corps enseignant, qui fournisse la matière indispensable à l'enseignement des énergies renouvelables et de l'usage de l'énergie.

Il aborde les concepts généraux concernant la consommation d'énergie, leur usage et leurs conséquences, en cherchant à présenter à l'élève une vision réaliste et responsable des implications.

De la même manière les énergies renouvelables seront introduites, décrivant brièvement chaque technologie, avant d'étudier plus spécifiquement le cas de l'énergie photovoltaïque et de l'énergie éolienne.

Le contenu de ce guide est structuré dans les chapitres suivants:



**Chapitre I: Concepts sur l'énergie et introduction aux énergies renouvelables**



**Chapitre II: Usage rationnel de l'énergie**



**Chapitre III: Energie éolienne**



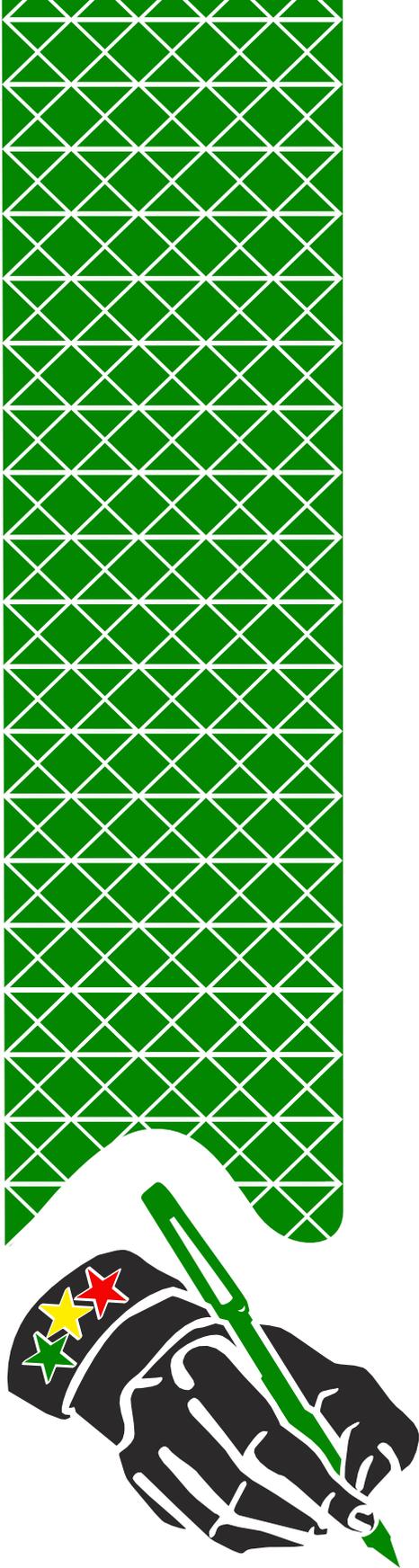
**Chapitre IV: Energie solaire photovoltaïque**

Chaque chapitre sera constitué d'unités d'enseignement, en rapport avec le thème correspondant, de problèmes et exercices, ainsi que d'expériences réalisables, et de liens de documents à consulter (disponibles dans d'autres manuels complémentaires à celui-ci de caractère théorique). Ces documents complémentaires sont aussi disponibles sur la page web du projet (<http://macsen-pv.iter.es>).

<b>Chapitre I:</b>	<b>CONCEPTS SUR L'ENERGIE ET INTRODUCTION AUX ENERGIES RENOUVELABLES</b>	<b>5</b>
<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION ET CONNAISSANCES DE BASE</b>	<b>5</b>
1.1.	<i>CONCEPTS GENERAUX SUR L'ENERGIE</i>	5
1.2.	<i>DEMANDE ENERGETIQUE ET RESSOURCES MONDIALES</i>	9
1.3.	<i>CONSEQUENCES DU MODELE ENERGETIQUE ACTUEL</i>	11
1.4.	<i>MESURES A PRENDRE</i>	12
1.5.	<i>EFFET DE SERRE</i>	12
1.6.	<i>LE PROTOCOLE DE KYOTO</i>	14
<b>2.</b>	<b>TYPES D'ENERGIES RENOUVELABLES</b>	<b>16</b>
2.1.	<i>LE SOLEIL, SOURCE COMMUNE DE TOUTES LES ENERGIES RENOUVELABLES</i>	16
2.2.	<i>ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE</i>	16
2.3.	<i>ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE</i>	22
2.4.	<i>ENERGIE EOLIENNE</i>	25
2.5.	<i>ENERGIES MARINES</i>	29
2.6.	<i>ENERGIE HYDRAULIQUE ET MINIHYDRAULIQUE</i>	34
2.7.	<i>ENERGIE GEOTHERMIQUE</i>	36
2.8.	<i>ENERGIE DE LA BIOMASSE</i>	38
<b>Chapitre II:</b>	<b>USAGE RATIONNEL DE L'ENERGIE</b>	<b>42</b>
<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>42</b>
1.1.	<i>PANORAMA MONDIAL</i>	42
1.2.	<i>CONCEPTS</i>	43
1.3.	<i>DISTRIBUTION PAR SECTEURS DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE MONDIALE</i>	45
<b>2.</b>	<b>EFFICACITE ENERGETIQUE PAR TECHNOLOGIE</b>	<b>45</b>
2.1.	<i>INSTALLATIONS DE CLIMATISATION</i>	45
2.2.	<i>SYSTEMES D'ECLAIRAGE</i>	48
2.3.	<i>INSTALLATIONS D'AIR COMPRISE</i>	54
2.4.	<i>INSTALLATIONS DE FROID INDUSTRIEL</i>	56
2.5.	<i>UTILISATION DE LA VAPEUR</i>	57
2.6.	<i>MOTEURS ELECTRIQUES</i>	58
2.7.	<i>EQUIPEMENTS DE BUREAUTIQUE</i>	59
2.8.	<i>COMPENSATION DE PUISSANCE REACTIVE</i>	60
2.9.	<i>ELECTROMENAGER</i>	60

<b>Chapitre III: ENERGIE EOLIENNE</b>	<b>64</b>
<b>1. HISTORIQUE</b>	<b>64</b>
<b>2. ORIGINE DU VENT</b>	<b>65</b>
2.1. <i>ORIGINE DU VENT</i>	65
2.2. <i>VENTS A L'ECHELLE LOCALE</i>	65
2.3. <i>INTERACTION DU VENT AVEC LA SURFACE</i>	66
<b>3. MESURE DU VENT</b>	<b>67</b>
<b>4. ENERGIE DISPONIBLE DANS LE VENT</b>	<b>70</b>
4.1. <i>LA VITESSE DU VENT INCIDENT</i>	70
4.2. <i>LA DENSITE DE L'AIR</i>	70
4.3. <i>LA SURFACE BALAYEE PAR LE ROTOR</i>	70
4.4. <i>EFFET DE SILLAGE</i>	71
4.5. <i>LIMITATIONS DU RENDEMENT</i>	72
<b>5. CARACTERISATION ET CHOIX D'UN AEROGENERATEUR</b>	<b>74</b>
<b>6. DIMENSIONS DE L'AEROGENERATEUR</b>	<b>76</b>
<b>7. LES AEROGENERATEURS ACTUELS</b>	<b>77</b>
7.1. <i>ROTOR: PALES ET MOYEU</i>	78
7.2. <i>NACELLE</i>	80
7.3. <i>LE MULTIPLICATEUR</i>	80
7.4. <i>LE GENERATEUR ELECTRIQUE</i>	80
7.5. <i>LE SYSTEME DE CONTROLE</i>	81
7.6. <i>SYSTEME D'ORIENTATION</i>	81
7.7. <i>LE PYLONE</i>	81
<b>8. LE PARC EOLIEN</b>	<b>82</b>
8.1. <i>TYPES DE CONNEXION D'UN PARC EOLIEN</i>	82
<b>9. CONCEPTION D'UN PARC EOLIEN</b>	<b>83</b>
9.1. <i>LE SITE D'IMPLANTATION</i>	83
9.2. <i>LE RESEAU D'EVACUATION DE L'ENERGIE</i>	84
9.3. <i>SELECTION DES AEROGENERATEURS ET DE LEUR EMPLACEMENT</i>	85
<b>10. ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL</b>	<b>86</b>
10.1. <i>IMPACT VISUEL</i>	86
10.2. <i>LE NIVEAU DE BRUIT</i>	86
10.3. <i>IMPACT SUR L'AVIFAUNE</i>	87
10.4. <i>POLLUTION</i>	87

<b>Chapitre IV: ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE</b>	<b>89</b>
<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>89</b>
<b>2. HISTORIQUE</b>	<b>90</b>
3. LA RADIATION SOLAIRE	91
<b>4. L'EFFET PHOTOVOLTAIQUE</b>	<b>92</b>
<b>5. LA CELLULE PHOTOVOLTAIQUE</b>	<b>93</b>
5.1. PROCESSUS DE FABRICATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAIQUE CRISTALLINE	93
5.2. TYPES DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES	95
5.3. CARACTERISTIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAIQUE	96
<b>6. FABRICATION D'UN MODULE PHOTOVOLTAIQUE</b>	<b>98</b>
6.1. ETAPES DE FABRICATION	99
6.2. PROCESSUS DE FABRICATION	100
<b>7. INSTALLATIONS PHOTOVOLTAIQUES</b>	<b>103</b>
7.1. APPLICATIONS DES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAIQUES	103
7.2. CLASSIFICATION DES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAIQUES	103
7.3. STRUCTURE DE SUPPORT	106
7.4. ONDULEUR D'INJECTION RESEAU	109
7.5. ONDULEUR POUR INSTALLATION EN SITE ISOLE	111
7.6. REGULATEUR DE CHARGE	111
7.7. SYSTEME ACCUMULATEUR	113
<b>8. CALCUL DE LA PRODUCTION D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAIQUE</b>	<b>115</b>
8.1. ORIENTATION ET INCLINAISON	115
8.2. OMBRES PORTEES ENTRE RANGEES DE MODULES	115
8.3. ENERGIE REÇUE PAR LE SOLEIL	116



# CHAPITRE I: CONCEPTS SUR L'ÉNERGIE ET INTRODUCTION AUX ÉNERGIES RENOUVELABLES

# Chapitre I:

## CONCEPTS SUR L'ENERGIE ET INTRODUCTION AUX ENERGIES RENOUVELABLES

**OBJET:** Ce bloc est conçu comme une introduction, destiné à inculquer aux étudiants les notions de base sur l'énergie, l'origine de celle-ci, sa consommation, ainsi que les sources de production disponibles.

Les énergies renouvelables sont introduites, et ses principaux concepts généraux expliqués.

### 1. INTRODUCTION ET CONNAISSANCES DE BASE

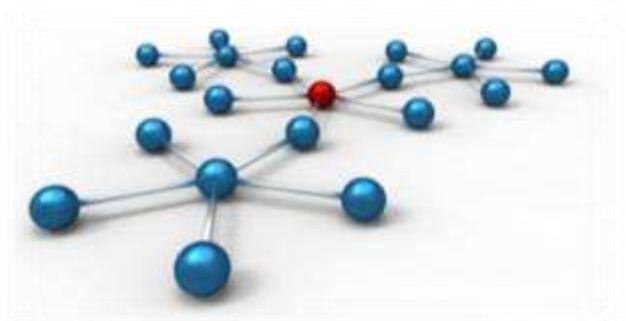
**OBJET:** Cette unité aborde sommairement, en guise d'introduction, quelques notions de base sur la production d'énergie et les ressources disponibles. Le niveau de consommation mondiale, ainsi que l'évolution des gisements de ressources sont analysés. Enfin, les concepts liés aux émissions de CO<sub>2</sub> et le protocole de Kyoto seront aussi traités.

#### 1.1. CONCEPTS GENERAUX SUR L'ENERGIE

##### 1.1.1. L'énergie

 **L'énergie:** Capacité de produire un travail entraînant un mouvement. Ce pourrait être une définition du terme, mais il faut l'élargir en considérant que tout ce qui entraîne un changement (mouvement, température, état physique, chimique, etc...), fait intervenir de l'énergie.

L'unité du Système International de mesure de l'énergie est le joule (J).



Freedigitalphotos.net

$$1 \text{ J} = 1 \text{ W} \times 1 \text{ s}$$

Les différentes unités de mesure de l'énergie quantifient la quantité de travail effectué par un système. D'autres unités de mesure de l'énergie sont:

 **La calorie:** Quantité d'énergie nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau d'un degré (plus précisément de 14,5 à 15,5 °C, à pression atmosphérique).

 **Frigorie:** C'est l'énergie qu'il faut extraire d'un gramme d'eau pour la refroidir d'un degré centigrade.

 **Thermie:** Un million de calories.

 **Kilowatt heure:** énergie fournie par une puissance de 1 kilowatt délivrée pendant une heure.

 **Tonne équivalent pétrole:** quantité d'énergie similaire à celle produite par la combustion d'une tonne de pétrole. Elle vaut environ 10.000 thermies.

$$1 \text{ tep} = 107 \text{ kcal} = 11.628 \text{ kWh}$$

L'énergie peut se manifester de diverses manières, en particulier sous forme d'énergie cinétique, thermique ou potentielle. Concrètement, l'énergie thermique est celle qui a le plus de difficulté à produire un travail mécanique, surtout à faible différence de température.

### 1.1.2.Énergie primaire et transformation de l'énergie

On appelle énergie primaire celle que l'on extrait directement de la nature, que ce soit sous forme de carburant, comme le pétrole, le gaz ou la biomasse, sous forme d'énergie mécanique (cas de l'éolienne ou de l'hydraulique), ou encore sous forme de chaleur (solaire thermique, géothermie).

L'énergie finale est celle que nous achetons, qui peut se trouver sous forme de carburant, d'électricité, de chaleur, etc... Elle est obtenue par transformation de l'énergie primaire, par exemple par raffinage du pétrole brut, par production dans une centrale électrique, ou autre.

Ces processus de transformation de l'énergie introduisent toujours des pertes, plus ou moins importantes selon le type de processus mis en jeu.

En conséquence, l'énergie finale totale est nettement inférieure à l'énergie primaire totale. Pour pouvoir comparer entre eux ces différents types d'énergie, par exemple une certaine quantité de carburant à un autre, on utilise des facteurs de conversion. Nous utiliserons ceux de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). L'unité de mesure d'énergie utilisée est la tonne d'équivalent pétrole (tep) ou le kWh.

Ces processus de transformation peuvent être représentés graphiquement dans un diagramme de Sankey, qui fournit visuellement les informations utiles concernant la quantité d'énergie fournies par les sources, les pertes par transformation et l'utilisation de l'énergie dans un système.

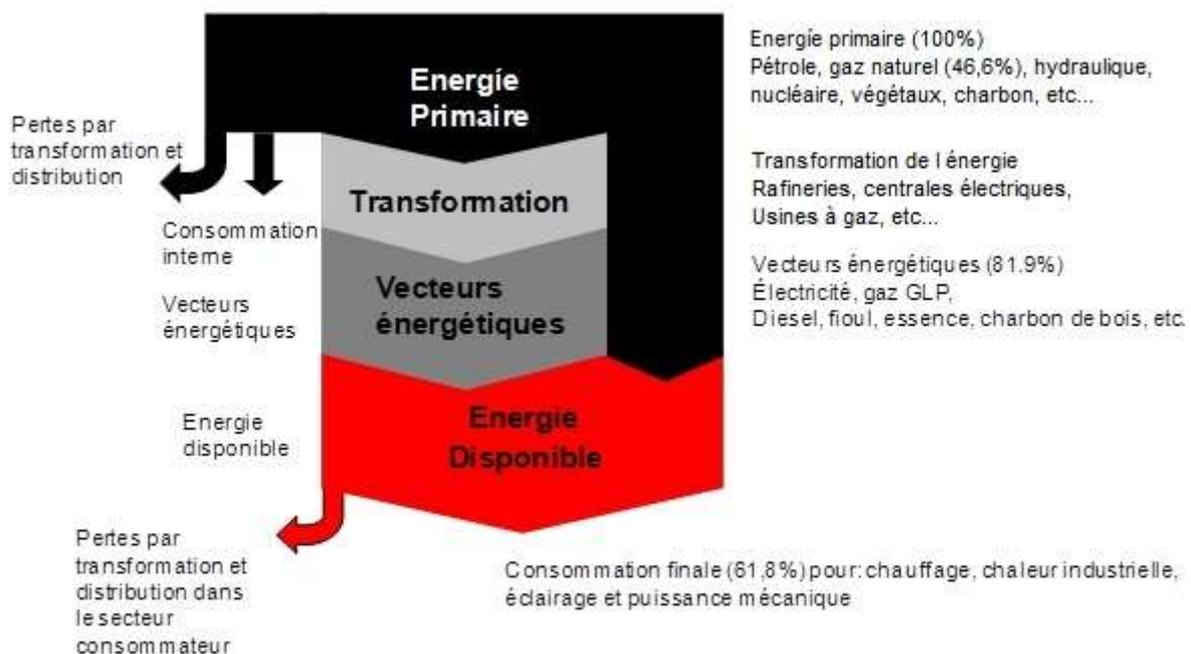


Diagramme de Sankey type. Source personnelle

La loi de conservation de l'énergie, (**premier principe de la thermodynamique**), est le principe fondamental qui définit l'une des caractéristiques les plus importantes de l'énergie: "L'énergie ne se crée ni se détruit, elle se transforme"

Ce principe explique les différentes formes ou états que peut prendre l'énergie dans un même système. Ainsi, il est possible de convertir l'énergie potentielle emmagasinée dans un lac en altitude: en faisant descendre l'eau vers un réservoir inférieur, son énergie potentielle se transforme en énergie cinétique qui peut faire tourner une turbine.

Cette énergie cinétique est ensuite transmise au rotor d'un alternateur qui la convertit en énergie électrique. Dans ce processus, l'énergie initiale potentielle est transformée en énergie électrique finale, à laquelle il faut ajouter les pertes à chacune des étapes.

### 1.1.3. Les sources d'énergie

Les sources d'énergie dont nous disposons peuvent être classifiées en deux groupes principaux: les énergies renouvelables et les énergies non renouvelables.



**Sources non renouvelables:** ce sont celles qui à l'échelle humaine ne se régénèrent pas au rythme où elles sont consommées.

- ✓ **ENERGIE FOSSILE:** Ce sont essentiellement le charbon, le gaz naturel et les produits pétroliers. Ceux-ci se sont formés par décomposition incomplète de grandes quantités d'êtres vivants qui ont vécu il y a des millions d'années. Ces ressources sont très limitées et actuellement, le sommet de production a été dépassé.

#### Avantages et inconvénients:

Initialement, ces ressources étaient faciles à extraire, elles étaient disponibles en grandes quantités et peu coûteuses par rapport à d'autres sources d'énergie. Mais la réalité actuelle a bien changé: ces avantages ne le sont plus vraiment, les ressources qui restent sont de plus en plus rares, difficiles à extraire, et en conséquence leurs coûts sont de plus en

plus élevés. Il faut ajouter à cela que leur extraction et de leur usage produit des émissions de gaz qui sont toxiques et sérieusement dommageables pour l'environnement.

- ✓ **ENERGIE NUCLEAIRE:** Elle se base sur l'utilisation de l'énergie libérée lors de la fission ou de la fusion des noyaux atomiques. La fission est la désintégration de certains noyaux lourds qui libère de grandes quantités d'énergie sous forme de chaleur, et permet de générer de l'électricité grâce à des turbines à vapeur. La fusion consiste à exploiter l'énergie libérée lors que deux atomes fusionnent pour donner un troisième atome de masse légèrement inférieure.

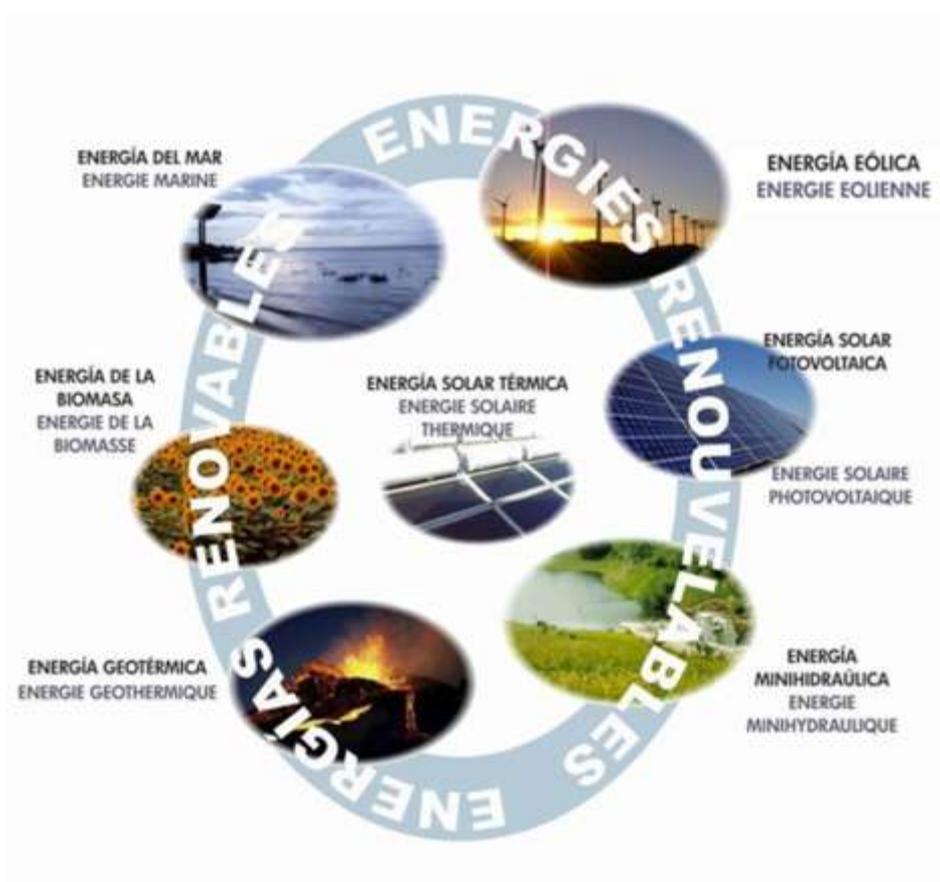
#### Avantages et inconvénients:

Pour l'instant, seule la fission a pu être maîtrisée à l'échelle productive, mais bien qu'elle fournisse de l'énergie à bas prix, elle génère une grande quantité d'éléments radioactifs extrêmement dangereux, au coût de stockage élevé, et difficile à garantir durant de très longues périodes. Sans parler du risque potentiel exorbitant que représentent les centrales nucléaires en cas d'accident.

En ce qui concerne l'énergie de la fusion, celle-ci est encore à l'état de développement. Elle permet en théorie de fournir de l'énergie à bas prix, sans pour autant générer autant de déchets nucléaires que la fission, et avec un risque potentiel moindre en cas d'accident. Cette technologie est souvent présentée comme une source alternative d'énergie dans le futur.



**Sources renouvelables:** elles sont inépuisables à l'échelle humaine. Le soleil est à l'origine de la quasi-totalité d'entre elles, de manière directe ou indirecte. On distingue principalement:



Source personnelle

En général, on peut citer les avantages suivants des énergies renouvelables par rapport aux sources conventionnelles:

	E. RENOUVELABLES	E. CONVENTIONNELLES
<b>Avantages environnementaux</b>	n'émettent pas de CO2 ni d'autres polluants atmosphériques.	L'énergie produite à partir de combustibles fossiles émet de nombreux polluants, et/ou des gaz à effet de serre.
	Elles ne produisent pas de déchets difficiles à traiter	Autant l'énergie nucléaire que l'énergie d'origine fossile génèrent des déchets qui affectent fortement la qualité de l'environnement.
	Elles sont inépuisables	Les combustibles fossiles sont limités.
<b>Avantages stratégiques</b>	Elles sont autochtones et produites localement, souvent à proximité immédiate des lieux de consommation.	Les combustibles fossiles existent dans un nombre limité de pays
	Elles diminuent la dépendance extérieure	Elles doivent être la plupart du temps importées
<b>Avantages socio-économiques</b>	Elles génèrent cinq fois plus d'emploi que les énergies conventionnelles	Elles génèrent peu d'emplois par rapport au chiffre d'affaires
	Elles permettent le développement de technologies locales	Elles utilisent la plupart du temps des technologies importées

## 1.2. DEMANDE ENERGETIQUE ET RESSOURCES MONDIALES

La consommation d'énergie par habitant dans les pays développés est de 13 fois la consommation dans les pays en développement. La consommation d'énergie d'une population est entièrement liée à son développement économique.

On estime qu'un tiers des habitants de la planète n'a pas accès aux sources d'énergie commerciales.

Environ un quart de la population mondiale (USA, Japon et EU) consomme les trois quarts de la totalité de l'énergie commercialisée dans le monde.



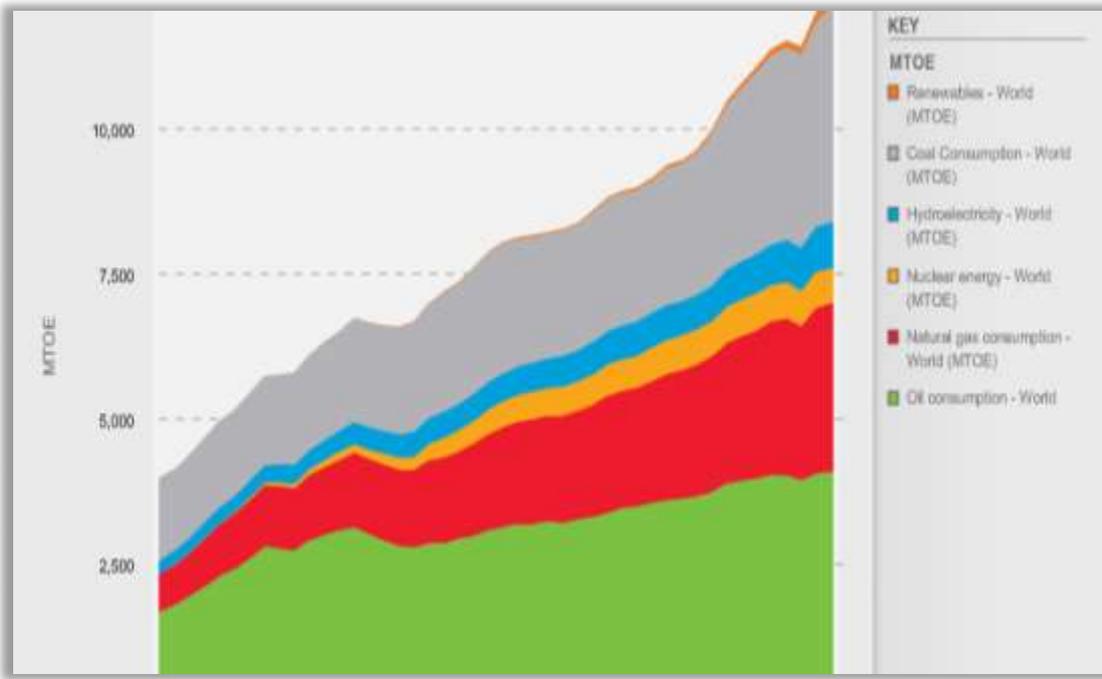
On prévoit que d'ici 2020, la population mondiale augmente de plus de 2.000 millions de personnes et que la consommation mondiale d'énergie augmente de 50%.

Consommation d'énergie primaire dans le monde.

Source: BP Statistical Review of World Energy 2012

Le graphique précédent trace la consommation d'énergie primaire dans le monde (2011) et son évolution au cours des 50 dernières années. On remarquera l'importante croissance de la consommation dans les pays asiatiques, principalement liée au développement économique qui les caractérise actuellement. Les unités sont en millions de tonnes équivalent pétrole.

Nous pouvons également analyser le graphique ci-dessous, qui visualise l'évolution des diverses ressources énergétiques dans la consommation mondiale.



Contribution de chaque source d'énergie à la consommation d'énergie primaire au niveau mondial.  
Source: BP Statistical Review of World Energy 2012.

Dans ce cas, bien que les énergies renouvelables aient évolué de manière significative ces dernières années, leur participation à la consommation mondiale reste minime. On remarquera combien l'humanité dépend fortement des ressources classiques, principalement le pétrole, le charbon et le gaz naturel.

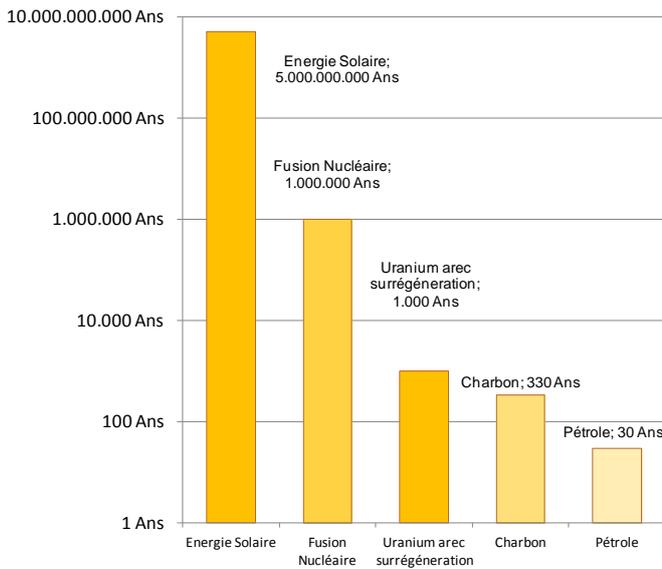


Freedigitalphotos.net

Le graphique ci-contre indique les réserves constatées de pétrole actuellement. Bien que les technologies permettent maintenant de découvrir et d'accéder à de nouveaux gisements, ces découvertes n'évoluent pas au rythme de croissance de la consommation.

Réserves prouvées de pétrole.

Source: BP Statistical Review of World Energy 2012



### Durée des ressources énergétiques

Ce graphe montre combien de temps nous durerait chacune des ressources d'énergie en supposant qu'elle soit la seule à couvrir les besoins énergétiques de notre civilisation, et que ces besoins n'augmentent pas et restent au niveau actuel de consommation.

Source personnelle

### 1.3. CONSEQUENCES DU MODELE ENERGETIQUE ACTUEL

Actuellement 80% de l'énergie utilisée par l'humanité provient des combustibles fossiles. Leur existence en quantité limitée et leur impact environnemental exigent une utilisation rationnelle de ces ressources. Il est particulièrement intéressant d'étudier les aspects suivants:

-  Diminution des réserves de combustibles fossiles
-  Réchauffement planétaire

-  Pollution des nappes phréatiques, des sols, etc.
-  Pollution atmosphérique et pluies acides
-  Déchets nucléaires et risque d'accident majeur
-  Destruction de la couche d'ozone
-  Désertification

Tous ces aspects entraînent indirectement des répercussions importantes sur l'économie. Depuis la dégradation de l'environnement, dont la correction représente un coût important pour la société, jusqu'aux conséquences de la pénurie de combustibles, qui est à l'origine de l'augmentation des prix et les tensions géopolitiques liées à leur exploitation, ces effets négatifs se cumulent et génèrent des problèmes majeurs pour l'humanité.

#### 1.4. MESURES A PRENDRE

Il existe trois principaux moyens d'action pour les citoyens et les pouvoirs publics, face à l'épuisement des réserves de combustibles fossiles, et les nombreux problèmes que cause leur consommation. Ce sont:

-  **Réduire la consommation** par des économies d'énergie.
-  **Améliorer l'efficacité** énergétique.
-  Favoriser le développement des **énergies renouvelables** et d'autres sources énergétiques alternatives.



Freedigitalphotos.net

#### 1.5. EFFET DE SERRE

Bien que généralement associé à un effet négatif sur la planète, ce phénomène est en réalité un processus naturel qui réchauffe la Terre, et y permet la vie.

L'effet de serre naturel augmente la température de la surface terrestre d'environ 33°C, apportant ainsi les conditions qui permettent la vie telle que nous la connaissons sur notre planète.



Freedigitalphotos.net

##### 1.5.1. Le processus naturel

L'énergie provenant du soleil est absorbée en partie par la surface terrestre et les océans, réchauffant la planète. L'autre partie est renvoyée vers l'espace. Le réchauffement en surface émet aussi des rayonnements infrarouges vers l'espace. Ces derniers ne sont pas totalement perdus car une partie est absorbée par les gaz à effet de serre. De cette manière, comme dans une serre, l'énergie piégée aide à réchauffer la surface de la planète, ainsi que l'atmosphère.

Les principaux gaz de l'atmosphère responsables de l'effet de serre sont: la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), ils agissent comme une couverture naturelle qui empêche le rayonnement infrarouge terrestre de s'échapper vers l'espace.

### 1.5.2. Facteurs du processus

Il y a trois facteurs principaux qui influent directement sur l'effet de serre:



**Le flux total d'énergie lumineuse reçue du soleil.** Celui-ci dépend de l'activité solaire, et de sa distance à la terre.



**L'albédo.** Il correspond à la proportion d'énergie lumineuse réfléchiée par la surface terrestre.



**La composition chimique de l'atmosphère,** Les gaz qui composent l'atmosphère, et leurs concentrations respectives.

### 1.5.3. Le processus renforcé

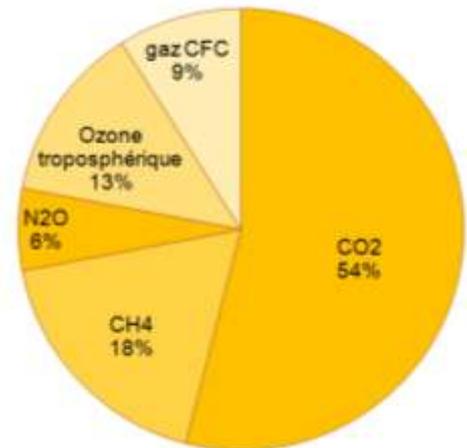
Des facteurs décrits ci-dessus, le seul qui ait changé de manière significative ce dernier siècle, est la composition chimique de l'atmosphère, essentiellement à cause de l'activité humaine.

Cette variation concerne principalement les niveaux de concentration des gaz, et a débuté vers le milieu du 18ème siècle, coïncidant avec l'ère préindustrielle. Les niveaux de concentration, à l'origine naturels, ont vu apparaître des émissions supplémentaires de gaz carbonique, de méthane, et de protoxyde d'azote, en plus de divers autres gaz industriels qui n'existaient pas dans la nature. Il en résulte que la "couverture" naturelle dont nous parlons devient de plus en plus épaisse, et accentuée en conséquence cet effet de serre, provoquant un réchauffement supplémentaire de la planète.

Le dernier siècle a vu une augmentation moyenne de la température de l'ordre de 0,6°C, et la décennie des années 90 a été la plus chaude jamais enregistrée. Selon le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, il ya plus de 90% de probabilité que l'activité humaine soit à l'origine de l'augmentation des températures moyennes mondiales.

### 1.5.4. Contribution des différents gaz à effet de serre

Le graphique suivant montre la contribution des différents gaz à l'effet de serre:



Contribution des différents gaz à effet de serre  
Source personnelle



Le dioxyde de carbone, CO<sub>2</sub>, résulte de la combustion des combustibles fossiles



Le méthane, CH<sub>4</sub>, est essentiellement produit par les animaux ruminants, et est également libéré dans les zones humides, les décharges, et les gisements d'hydrocarbures.



L'ozone est libéré par l'industrie et les transports.



Les chlorofluorocarbures, CFC, sont utilisés dans les systèmes de réfrigération.



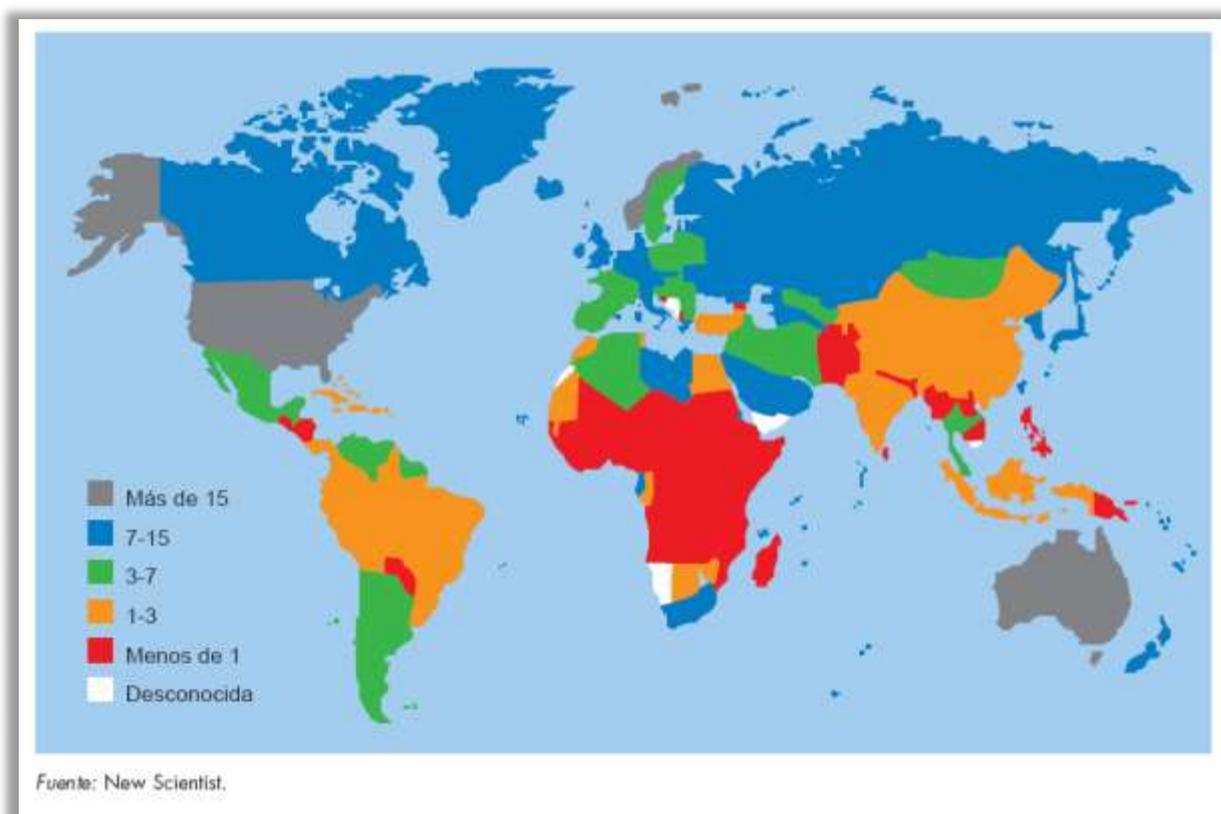
Le protoxyde d'azote, N<sub>2</sub>O, est essentiellement libéré par les engrais chimiques.

## 1.6. LE PROTOCOLE DE KYOTO

Le Protocole de Kyoto est l'instrument juridique majeur qui permet de lutter contre le changement climatique. Il rassemble les engagements de 37 pays industrialisés qui ont promis de réduire leurs émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) tout en reconnaissant qu'ils sont les principaux responsables des niveaux élevés de GES dans le monde, par suite de la combustion de combustibles fossiles durant plus de 150 ans.

Le compromis adopté est que les émissions totales des pays développés devront être réduites au cours de la période 2008-2012 à au moins à 5% en dessous des niveaux de 1990. A ce point de vue, le protocole reconnaît un principe essentiel, qui est celui de la responsabilité commune, mais différenciée.

De cette manière, le protocole a encouragé les décideurs à élaborer les lois et les politiques leur permettant de tenir leurs engagements, a encouragé les sociétés privées à intégrer dans leurs plans stratégiques la dimension environnementale et a également conduit à la création du marché du carbone.



Emissions de CO<sub>2</sub> dans divers pays (Tonnes par habitant).  
(Más de 15 – Plus de 15 ; Menos de 1 – Moins de 1 ; Desconocida – Inconnu)

## De la ratification à l'accomplissement

**CP-1 Berlin 1995:** à la première réunion de la convention des parties, a été lancé un cycle de négociations en vue de décider de l'adoption d'engagements plus solides et détaillés pour les pays industrialisés.

**CP-3 Kyoto 1997:** adoption du Protocole de Kyoto, qui définit les bases du mécanisme et du système de vérification. Cette fois, 84 pays l'ont signé, signifiant ainsi qu'ils avaient l'intention de le ratifier plus tard, même si beaucoup ont hésité à franchir le pas, craignant de laisser le Protocole entrer en vigueur avant qu'ils n'aient une compréhension claire des règles.

**CP-4 Buenos Aires 1998:** les parties établissent un groupe de travail, dont la mission est de développer le mécanisme de vérification du respect des dispositions du Protocole.

**CP-7 Marrakech 2001:** à cette occasion sont adoptées les règles détaillées de mise en œuvre du protocole. Il s'agit du document exécutif qui facilite, promeut et exige le respect des engagements pris.

Seules sont obligées au respect des engagements de Kyoto les parties de la convention qui font également partie du protocole (c'est à dire qu'ils l'aient ratifié, accepté, approuvé, ou y aient adhéré).

Les objectifs couvrent les émissions de six gaz à effet de serre:

-  Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)
-  Le méthane (CH<sub>4</sub>)
-  Le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O)
-  Les hydrofluorocarbures (HFC)
-  Les perfluorocarbures (PFC)
-  L'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>)

La convention autant que le protocole de Kyoto reconnaissent les nécessités et les problèmes spécifiques des pays en voie de développement. Pour cela, les Parties doivent rendre compte de leurs efforts pour atteindre leurs objectifs de réduction des émissions, tout en réduisant au maximum les effets négatifs possibles que subissent les pays en voie de développement.

## 2. TYPES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

**OBJET:** Dans cette unité sont introduits les différents types d'énergie renouvelable, avec leurs principales caractéristiques. L'objectif est de clarifier les concepts des principes de fonctionnement de chaque technologie, sans entrer dans les détails.

### 2.1. LE SOLEIL, SOURCE COMMUNE DE TOUTES LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Pratiquement toutes les sources d'énergie dont nous disposons proviennent du soleil, de manière directe ou indirecte. Le soleil est responsable des courants aériens, de l'évaporation de l'eau en surface, de la formation des nuages, des pluies, et par conséquent il est à l'origine de formes d'énergie renouvelables comme le vent, les vagues, ou la biomasse.

Au cœur du soleil ont lieu les réactions de fusion nucléaire qui transforment l'hydrogène en hélium. Ce processus libère de grandes quantités d'énergie qui atteignent sa surface et s'échappent dans l'espace sous forme de rayons solaires.



Freedigitalphotos.net

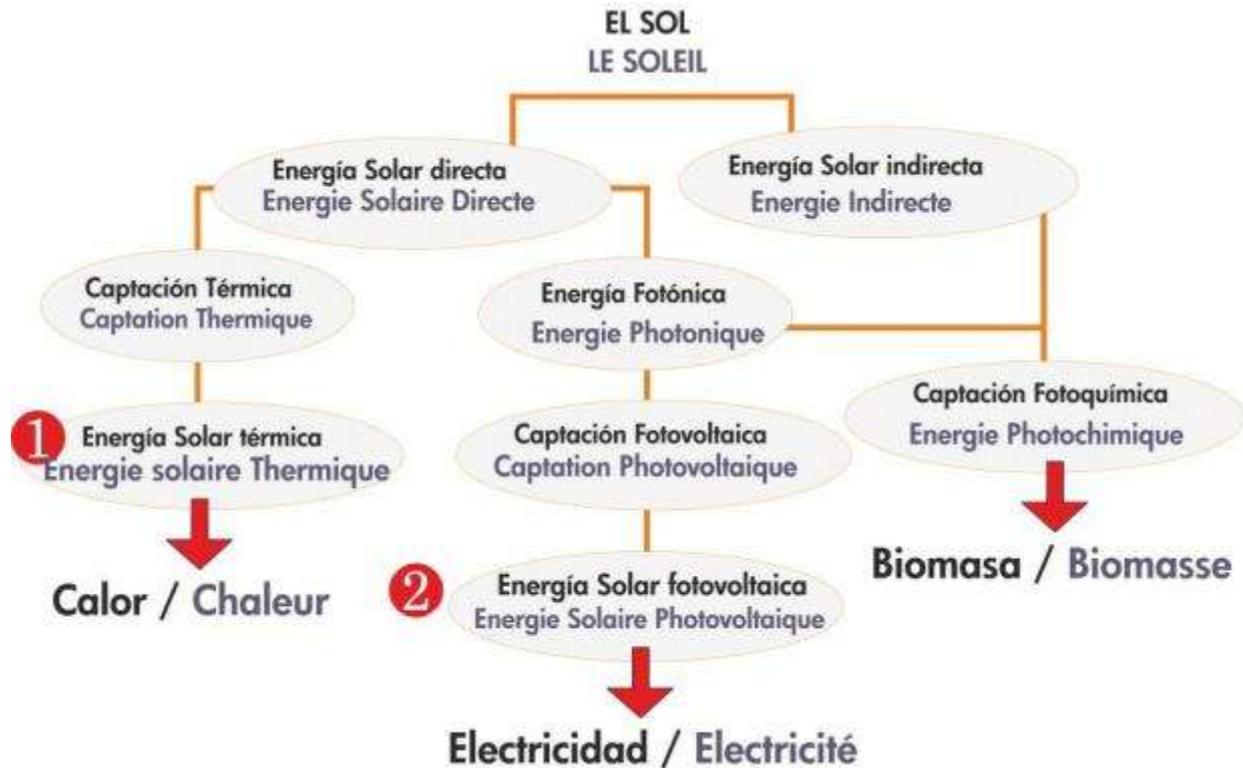
Chaque seconde, environ 700 millions de tonnes d'hydrogène réagissent, dont 4.3 millions est totalement transformée en énergie. Une part de cette énergie émise sous forme de rayons atteint les planètes, lunes, astéroïdes et comètes qui composent notre système solaire. En particulier, la terre reçoit en permanence une puissance solaire équivalente à  $1,7 \times 10^{14}$  kW, ce qui représente 170 millions de réacteurs nucléaires de 1 000 MW de puissance unitaire, soit encore l'équivalent de 10 000 fois la consommation énergétique mondiale.

Ainsi, nous pouvons assurer que nous disposons d'une source d'énergie gratuite, accessibles à tous (tous les pays en disposent), et respectueuse de l'environnement, et ceci pour une durée pratiquement illimitée.

### 2.2. ÉNERGIE SOLAIRE THERMIQUE

Comme nous l'avons exposé, quasi toutes les énergies renouvelables proviennent du soleil. Plus spécifiquement, nous pouvons capter cette énergie de manière directe (capteurs thermiques ou photoniques) ou indirecte (comme par exemple l'énergie éolienne).

Comme indiqué dans le graphique suivant, le processus de captation solaire thermique génère directement de la chaleur. Cependant, les applications de cette chaleur peuvent être très diverses suivant le type de capteur utilisé (passif, actif, à concentration, etc...). Au niveau de l'utilisation finale, cette chaleur peut servir à chauffer un bâtiment, de l'eau chaude sanitaire, produire du froid à l'aide d'une machine à absorption, ou encore de la vapeur qui pourra servir à produire de l'électricité



Processus possibles de transformation de l'énergie solaire. Source personnelle



### Avantages

- Qualité de l'énergie.
- Impact environnemental pratiquement nul.
- Inépuisable.



### Inconvénients

- Cycles jour/nuit et saisonniers.
- Impossibilité de stockage direct de la lumière solaire.
- Influence de la météorologie.

#### 2.2.1. Energie solaire passive

La technologie solaire passive est un ensemble de techniques destinées à exploiter l'énergie solaire directement, sans la transformer sous une autre forme, afin de l'utiliser immédiatement ou de manière différée sans nécessiter un système mécanique ou d'alimentation externe.

Les principes de base du fonctionnement consistent à contrôler divers facteurs comme:



Les apports thermiques, qu'ils soient directs ou indirects



L'effet de serre.



Les inerties thermiques.

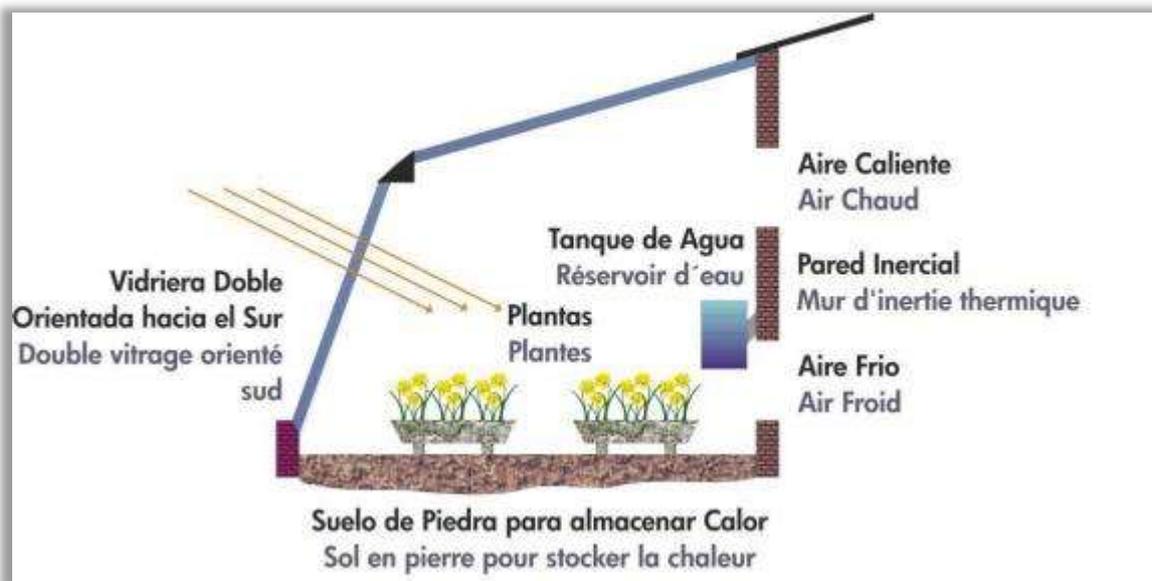


Les ombres.

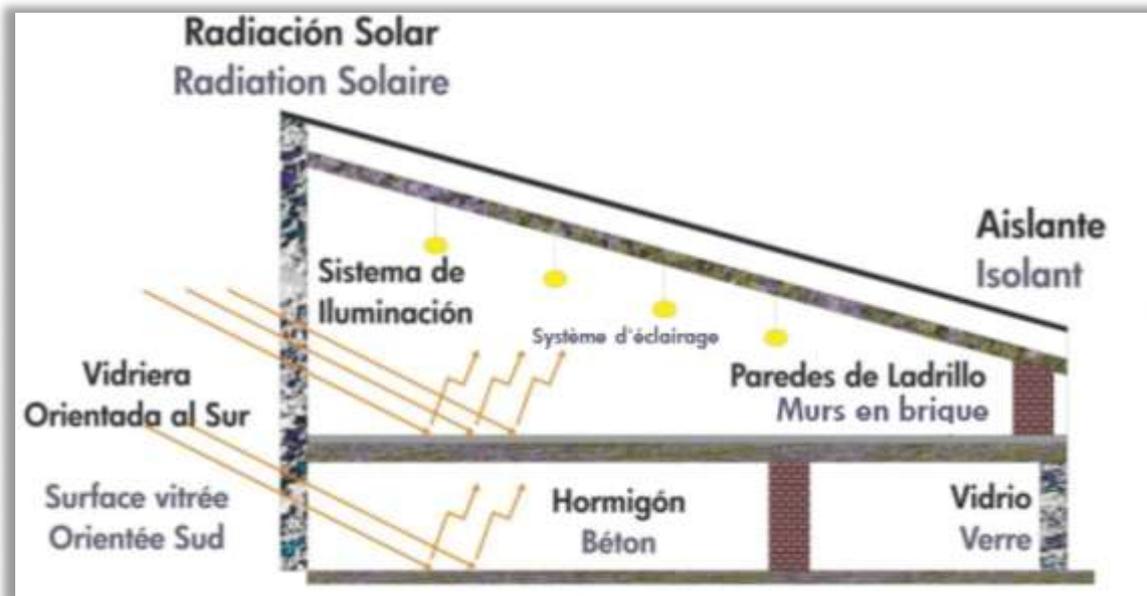


La ventilation naturelle

Ainsi, l'énergie solaire passive, utilisée essentiellement dans l'habitat, recherche le confort thermique par une simple disposition optimale d'éléments architecturaux, en utilisant au maximum l'énergie solaire reçue et les possibilités de ventilation naturelle.



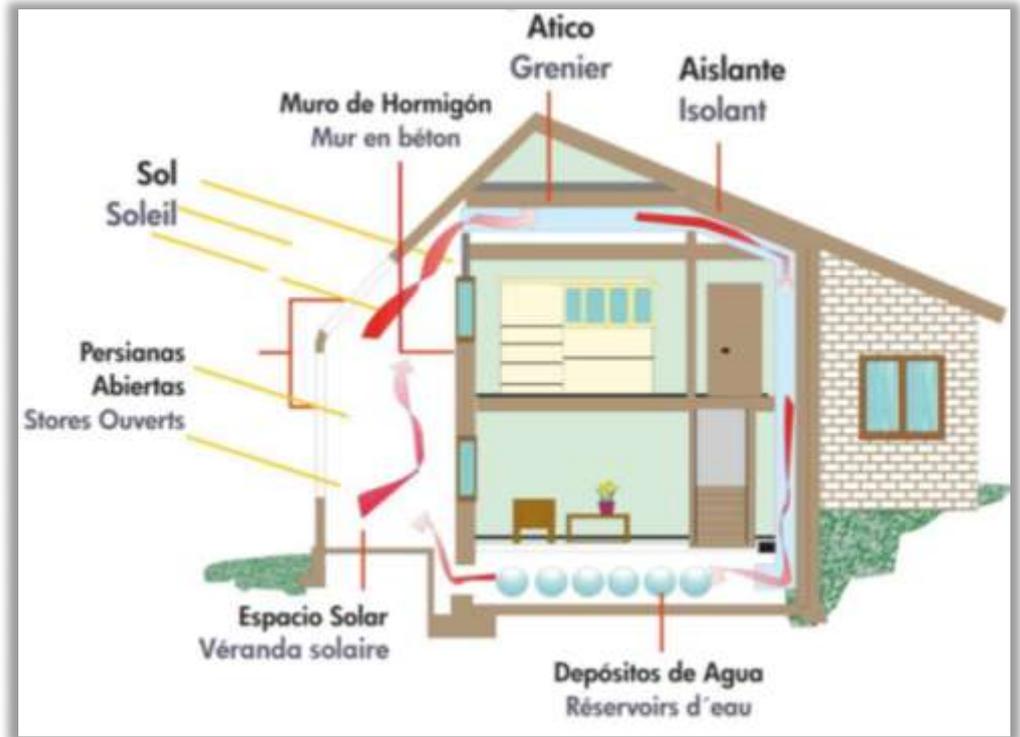
Ces dessins montrent les techniques d'énergie solaire passives utilisables dans l'habitat.



Systèmes à énergie solaire passive.  
Source personnelle

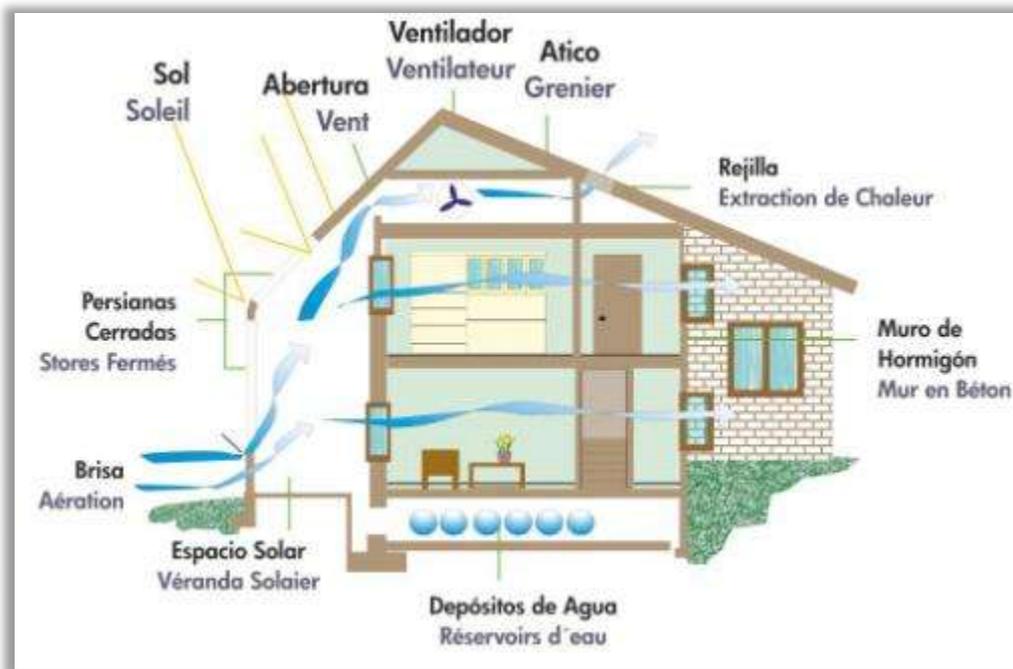
Principe de chauffage dans un système solaire passif.  
Source personnelle

Nous pouvons observer comment les rayons du soleil sont utilisés pour chauffer l'intérieur de cette maison. L'air chauffé dans la véranda monte par convection naturelle et redescend sur la paroi opposée. L'inertie thermique aide à maintenir la température constante.



Principe de refroidissement dans un système solaire passif. Source personnelle

Dans ce cas, des protections (persiennes) sur les fenêtres empêchent le réchauffement de l'habitat par les rayons solaires. Par ailleurs, on cherche à créer une ventilation naturelle, en laissant entrer l'air frais qui montera en s'échauffant et sera évacué par une ouverture en hauteur.



### 2.2.2. Energie solaire active

Le principe de fonctionnement consiste à récupérer l'énergie solaire par un ensemble de capteurs, et de l'emmagasiner dans un système de stockage qui fournira les besoins en consommations à la demande.

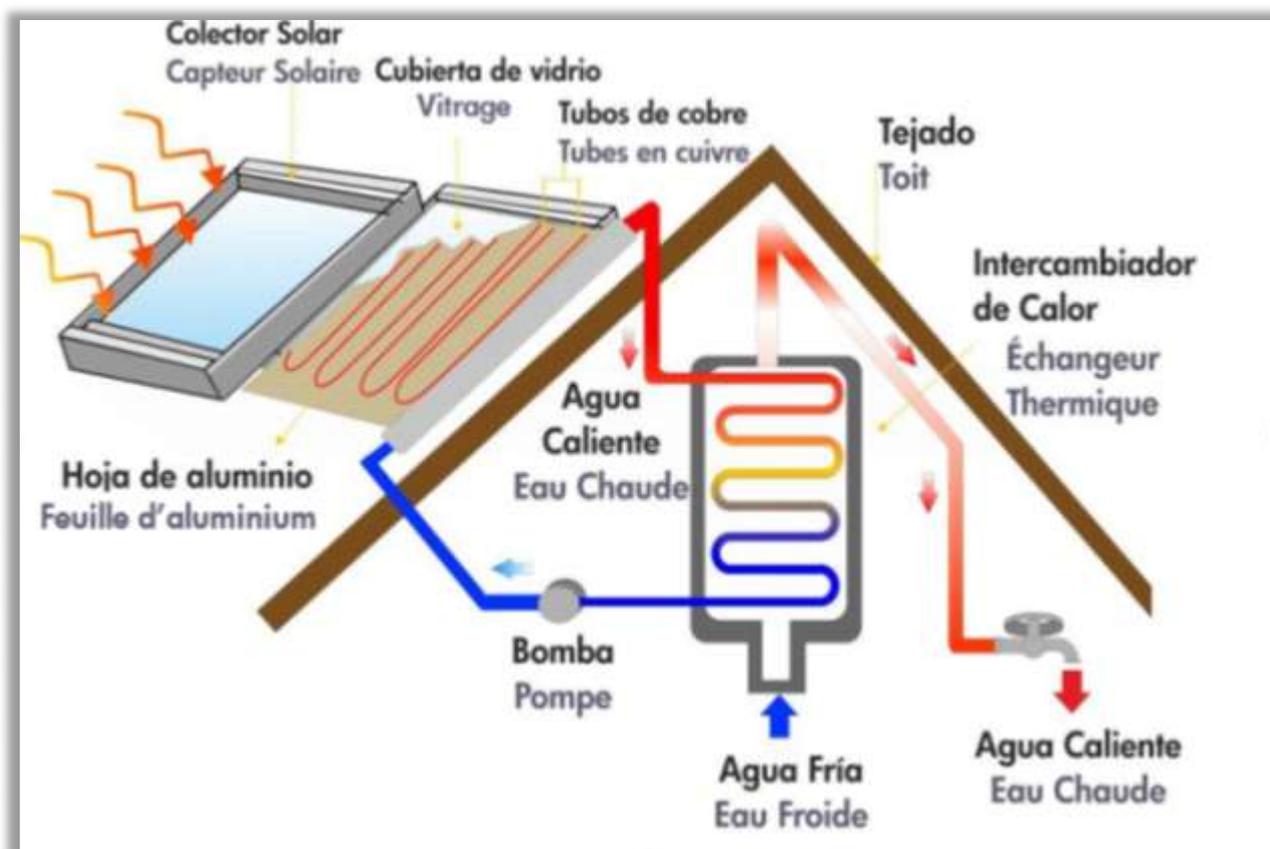
Ce système est utilisable autant au niveau domestique qu'industriel. Ceci est utilisé par exemple dans les installations d'eau chaude sanitaire, l'apport d'énergie pour le chauffage solaire, le chauffage des piscines, ou encore le préchauffage de fluides dans l'industrie.

L'énergie lumineuse du soleil est transformée en chaleur dans le capteur au niveau de la surface de l'absorbeur. Celui-ci communique la chaleur à un fluide qui circule dans le capteur. Hormis le capteur proprement dit, l'autre partie essentielle du système est constituée par le système de stockage thermique.

Bien que l'on puisse accumuler d'importantes quantités d'énergie de cette manière, et sur de longues durées (même intersaisonniers), le système devra être adapté à la quantité d'énergie solaire qui arrive sur le capteur, et aux besoins d'énergie.

Le schéma suivant montre le principe de fonctionnement d'une installation d'eau chaude sanitaire domestique.

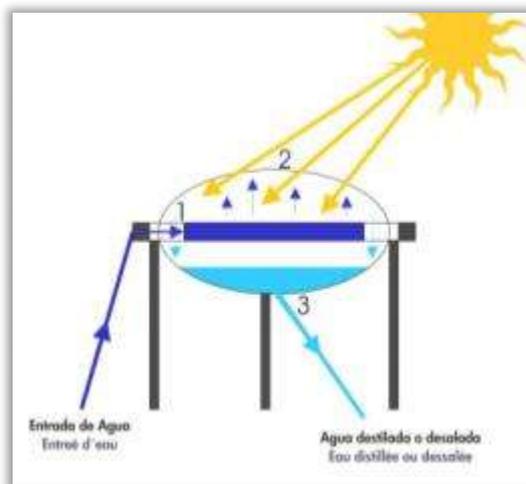
Schéma de fonctionnement d'une installation solaire thermique d'eau chaude sanitaire.  
Source personnelle



L'efficacité de conversion de la lumière solaire en chaleur dépend de nombreux facteurs, dont la température de captation. Une classification des différentes applications peut être effectuée selon ces températures:

TEMPERATURE	TYPE DE CAPTEUR	UTILISATION
HAUTE > 250°C	Capteurs parabolique ou centrales à tour	Production d'électricité
MOYENNE 80-250°C	Capteurs à tubes sous vide ou à concentration	Production de vapeur, usages industriels
BASSE < 80°C	Capteurs plans ou à tubes sous vide	Eau chaude sanitaire, chauffage de piscines, chauffage

Les applications de ce système sont principalement domestiques, et permettent de générer de l'eau propre dans des zones où l'eau douce est rare, et lorsqu'on ne dispose pas d'énergie suffisante pour utiliser d'autres processus de dessalement ou de distillation



Source personnelle

### 2.2.3. Autres applications de l'énergie solaire thermique

En plus des applications classiques de l'énergie solaire thermique, d'autres usages sont possibles, en particulier dans des régions qui ont un accès limité à certaines ressources.



**Distillateur solaire:** Il s'agit d'exploiter l'évaporation de l'eau réchauffée par le soleil, pour la distiller. On peut utiliser ce système pour dessaler de l'eau de mer.

L'eau introduite dans le dispositif (1), s'évapore sous l'action du réchauffement par le soleil, amplifié par l'effet de serre du plastique transparent (2) qui constitue la partie supérieure du distillateur. L'eau distillée, glisse le long des parois du dispositif, et est collectée dans sa partie inférieure(3), d'où elle peut être extraite pour utilisation.



**Four solaire:** Par les réflexions sur les parois internes du four, et l'effet de serre qui piège la chaleur du soleil, la température s'élève à l'intérieur et permet d'atteindre des températures de l'ordre de 80°C, suffisantes pour cuire des aliments à feux doux.



(ITER – Tenerife) Source personnelle

## 2.3. ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE

Le principe de l'énergie photovoltaïque est la conversion directe de la lumière en électricité, grâce à l'utilisation d'un dispositif électronique appelé "cellule solaire".

Cette conversion utilise le phénomène de l'effet photovoltaïque, qui crée une force électromotrice dans le matériau de la cellule.

### 2.3.1.Principe de fonctionnement

Cette conversion devient possible lorsque l'énergie lumineuse est suffisante pour exciter les électrons d'un matériau, et les mettre en mouvement.

La face collectrice d'une plaquette de silicium est traitée ("dopée") avec deux types d'éléments, l'un qui fait perdre facilement des électrons, et l'autre qui facilite leur captation. Ainsi se fabrique, de manière simplifiée, une cellule photovoltaïque.



Freedigitalphotos.net

Lorsque la radiation solaire frappe les cellules, une "différence de potentiel", ou tension -continue- s'établit entre deux couches du matériau. Des conducteurs et des contacts électriques sur chacune de ces couches permettent de récupérer ces électrons pour les faire circuler dans un circuit électrique externe. Nous avons généré ainsi de l'électricité qui peut être utilisée de diverses manières

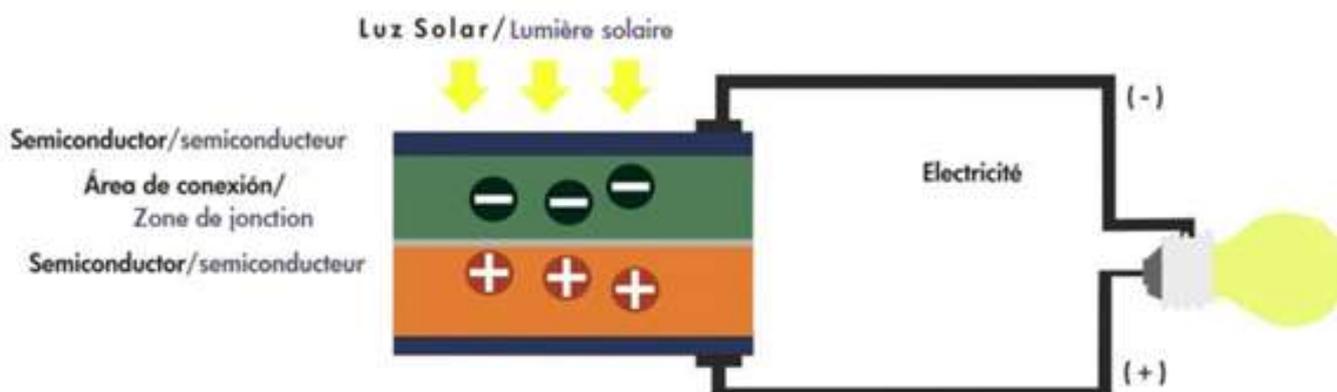


Schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Source personnelle

**L'avantage principal de l'énergie photovoltaïque est qu'elle est très versatile.**

-  Elle permet de fabriquer aussi bien des petits systèmes, tels des montres solaires, que des grandes installations, telles des centrales de plusieurs mégawatts alimentant des villes entières.
-  Elle produit directement de l'électricité qui peut servir pour pratiquement n'importe quelle application.
-  Elle peut être installée quasiment partout dans le monde, et la production d'électricité peut se produire sur le lieu même de production (permettant de grandes économies dans le système de distribution).
-  Elle est silencieuse, propre et respectueuse de l'environnement.
-  Son entretien est minime et la durée de vie des systèmes est très longue.
-  Il s'agit de systèmes modulables, et rapides à installer.



(ITER – Tenerife) Source personnelle



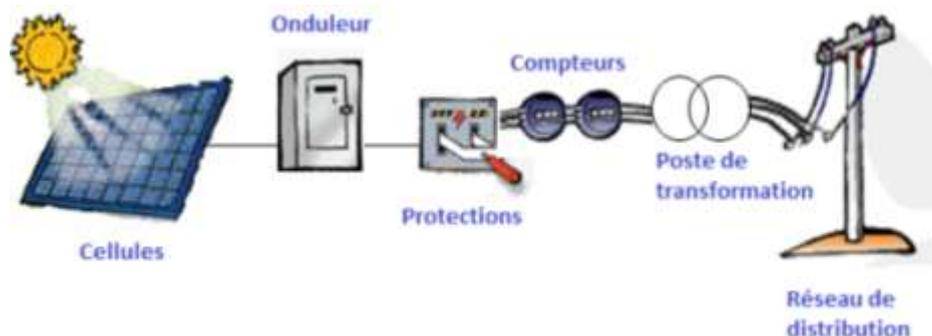
(ITER – Tenerife) Source personnelle

**2.3.2. Installations connectées au réseau**

Une installation connectée au réseau injecte l'énergie qu'elle génère sur le réseau électrique.

L'électricité produite dans les panneaux photovoltaïques en courant continu, est convertie en courant alternatif par un onduleur, lequel injecte cette électricité sur le réseau à travers un compteur qui comptabilise les kWh produits.

Schéma de fonctionnement d'une installation photovoltaïque connectée au réseau. Source personnelle



### 2.3.3.Applications isolées

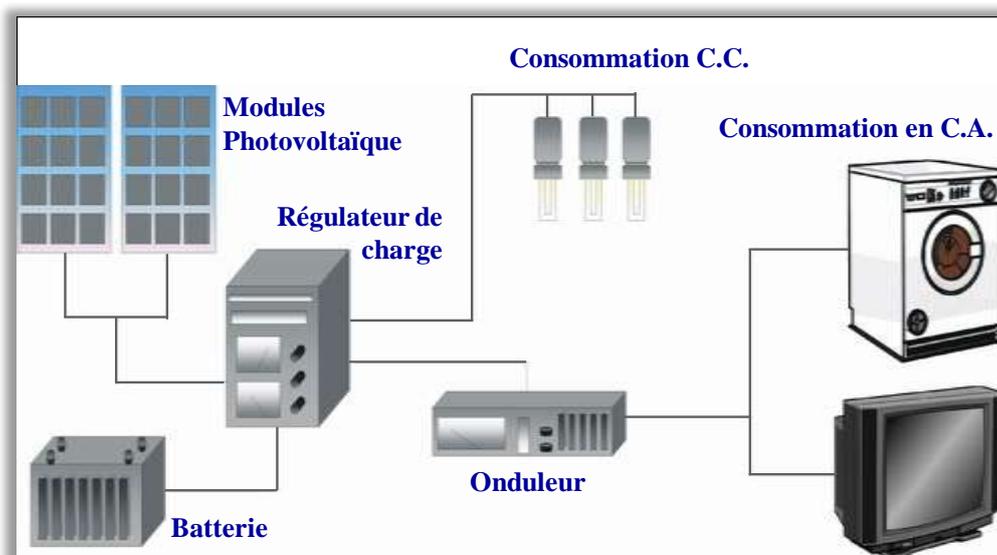
Les installations isolées sont celles qui fournissent de l'énergie sur les sites qui ne disposent pas de connexion au réseau électrique. Ces installations se composent de panneaux photovoltaïques qui produisent l'énergie électrique, d'un banc de

batteries éventuel pour le stockage de cette énergie, et d'éléments électroniques qui permettent d'adapter l'énergie produite aux équipements utilisateurs.

Comme déjà indiqué, la quantité d'applications possibles est très large.



Exemple d'installation solaire photovoltaïque domestique isolée. Source personnelle



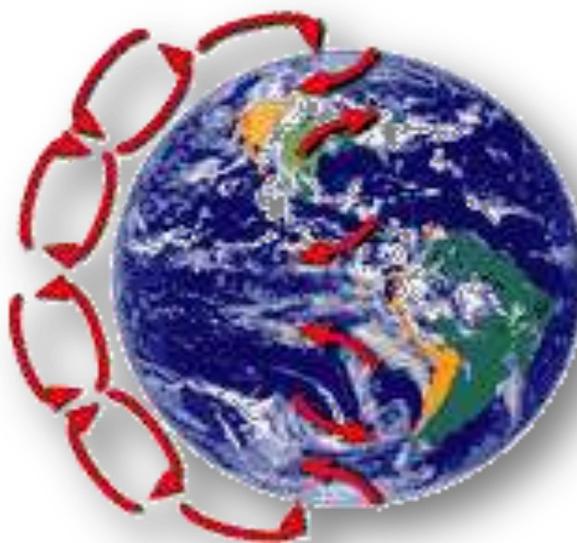
## 2.4. ENERGIE EOLIENNE

On estime qu'environ 1% à 2% de l'énergie qui nous provient du soleil finit par se transformer en énergie éolienne.

### 2.4.1. Origine du vent

Le vent est une conséquence du réchauffement inégal des différentes régions de la surface et de l'atmosphère terrestre. Cette différence de réchauffement est due à l'alternance jour/ nuit et des saisons, à la distribution des continents et des océans, etc...

L'air se réchauffe au contact du sol éclairé par le soleil. Devenant plus léger, il s'élève et laisse la place à de l'air plus froid qui vient le remplacer, provoquant ainsi un courant d'air. Ce phénomène dit convectif, est à l'origine des vents et participe à la formation des phénomènes météorologiques.



Formation des cellules convectives sur terre.  
Source: Windpower.org

### 2.4.2. Exploitation des ressources éoliennes

Cette énergie peut être récupérée à l'aide de machines qui transforment l'énergie cinétique de l'air en mouvement mécanique. Depuis longtemps, l'homme a appris à utiliser le vent, d'abord pour déplacer des bateaux à l'aide de voiles, puis pour le pompage de l'eau ou pour moulin du grain avec des moulins à vent, ou plus récemment pour produire de l'énergie électrique avec des aérogénérateurs.

Pour exploiter cette ressource aux mieux, il est important de tenir compte des facteurs suivants:

 A grande échelle, des vents dominants s'établissent sur toute la planète à grande altitude dans les couches stratosphériques. Ceux-ci sont régis par des facteurs comme les variations de température et de pression atmosphérique, mais aussi la force de Coriolis, due à la rotation de la terre, qui dévie les vents dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord (et l'inverse au Sud).

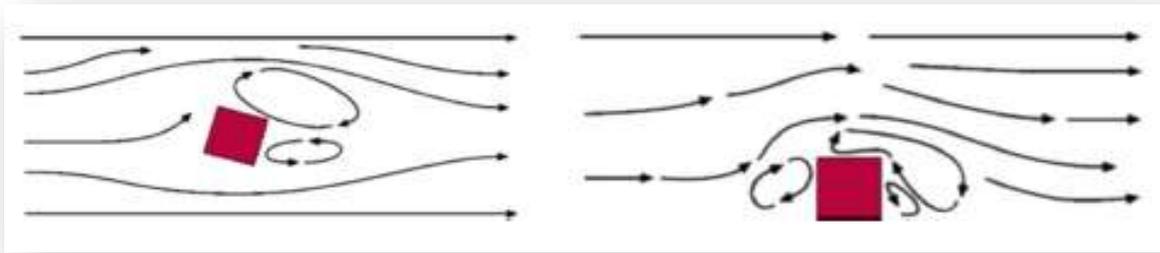
 Le soleil chauffe plus les zones équatoriales que les zones polaires. Il s'établit ainsi une **circulation globale** de l'air des couches inférieures de l'atmosphère de l'équateur vers les pôles, (l'inverse à très haute altitude).

 D'autre part, à proximité immédiate de la surface (en dessous de quelques centaines de mètres), d'autres effets plus locaux interviennent, dus au relief, à la rugosité des terrains, etc..., qui modulent les **vents locaux**.

 Le vent est influencé par la nature du terrain et les obstacles. Sa vitesse augmente en général avec l'altitude, mais peut aussi être renforcée sur le bord des obstacles.

 Le vent varie en permanence (en force et en direction).

 Ses variations peuvent être cycliques (jour/nuit, étant habituellement plus fort de jour), ou encore saisonnières



Modification du vent par des obstacles.  
Source: Windpower.org

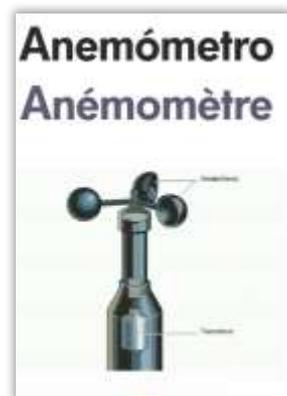
Afin de mieux connaître les caractéristiques du vent, on utilise principalement les appareils suivants:



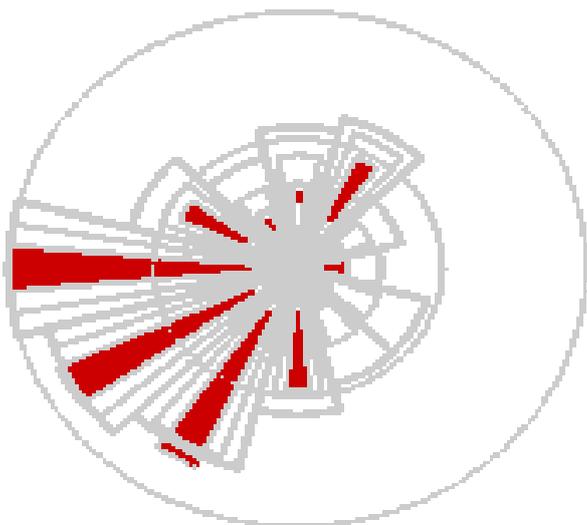
**Girouette.** Elle indique la direction du vent.



**Anémomètre.** Il indique l'intensité (la vitesse) du vent.



Source personnelle



La mesure de ces variables et leur enregistrement sur de longues durées sont essentielles pour déterminer le potentiel éolien d'un site déterminé.

### 2.4.3. Types d'éoliennes

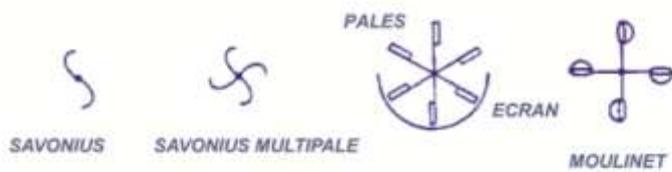


Source personnelle

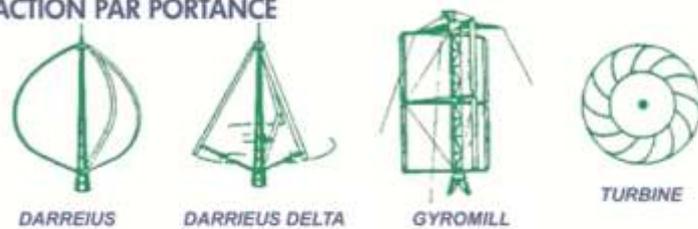
Il y a de très nombreux types d'éoliennes, développés pour différents usages. On peut les classifier de la manière suivante:

### Types d'Éoliennes

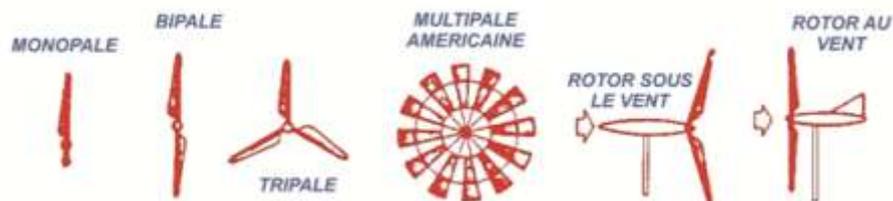
#### ACTION PAR TRAINEE



#### ACTION PAR PORTANCE



#### AXE HORIZONTAL



Source personnelle



Les **éoliennes à axe horizontal** sont les plus utilisées et celles de plus grande puissance. On peut en distinguer trois types:

- ✓ Les moulins à vent traditionnels. ce sont les moulins utilisés historiquement, qui ne sont plus utilisés mais que l'on conserve comme monuments
- ✓ les éoliennes lentes, ont un nombre de pales élevé et sont généralement utilisées pour le pompage. Elles s'orientent habituellement avec un système de type girouette.
- ✓ les éoliennes rapides n'ont que quelques pales. A puissance égale, elles sont plus légères, ce qui permet d'en construire de plus grandes, plus hautes, et de puissance supérieure.



(ITER – Tenerife) Source personnelle

## 2.5. ENERGIES MARINES

Les énergies marines présentent de grandes perspectives pour le futur, car leurs ressources sont moins exploitées que les autres, alors que les océans couvrent la majeure partie de la terre (4/5).

Les mers et les océans sont d'énormes capteurs solaires (et gravitationnels), et l'énergie s'y retrouve sous les forme suivantes:

 Le rayonnement solaire incident sur l'eau, et sous certaines conditions atmosphériques, fait apparaître des **gradients thermiques** importants aux basses latitudes et à des profondeurs inférieures à 1000 m.

 L'influence gravitationnelle de corps célestes (essentiellement la lune) sur les masses d'eau océaniques provoque les **marées**.

 Les marées, ainsi que des différences de températures à l'échelle planétaires, sont à l'origine des **courants marins**.

 L'action des vents et des courants marins sont à l'origine de **vagues**. Cette énergie est en général diffuse, mais significativement plus concentrée que d'autres énergies renouvelables communément utilisées sur terre.



Freedigitalphotos.net

A partir de ces formes d'énergie, on peut distinguer les méthodes qui permettront de les exploiter:

### 2.5.1. Energie thermique

L'exploitation de l'énergie thermique des mers consiste à utiliser la différence de température entre l'eau de surface, et celle qui se trouve à une centaine de mètres de profondeur. Dans les zones tropicales, cette différence est de l'ordre de 20 à 24 °C. L'exploitation peut se faire à partir de 20 °C.

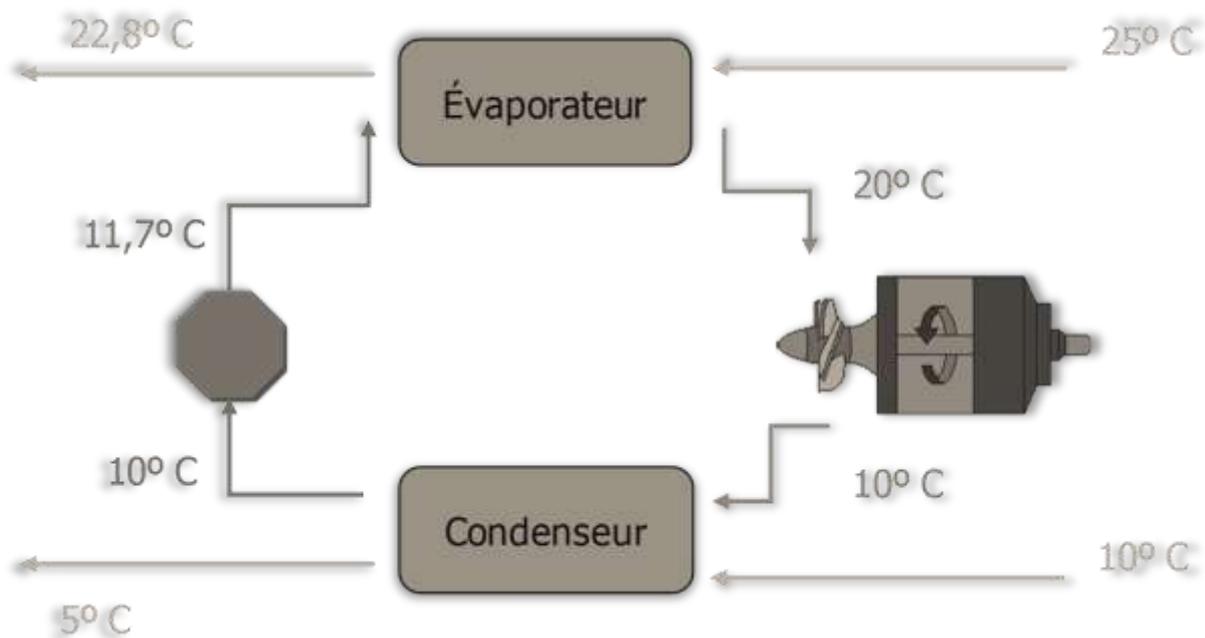
Les avantages de cette énergie est qu'elle est permanente, et considérée comme ayant un faible impact environnemental.

Les possibilités de cette technique se sont améliorées avec l'évolution des technologies offshore pétrolières. Ce développement technologique, ainsi que l'utilisation de nouveaux matériaux composites rend l'exploitation possible, mais encore onéreuse.

Une différence de température aussi faible, comparable à celles de certains capteurs solaires thermiques peut être utilisée grâce au cycle de

Rankine, qui convertit cette énergie thermique en énergie mécanique.

Le cycle de Rankine, qui est aussi celui des turbines à vapeur, utilise ici en général un fluide à basse température d'ébullition (ammoniaque, fréon, propane, eau sous faible pression), utilisé en circuit fermé à la place de la vapeur dans les turbines: celui-ci est échauffé et évaporé par les eaux superficielles, alimente une turbine, et se condense par refroidissement avec les eaux profondes.



Source personnelle

Les principaux écueils de cette technologie sont les suivants:

-  Cette technologie nécessite de grandes structures à construire au large et en eaux profondes, et donc chères.
-  Le rendement est faible, de l'ordre de 7%, à cause de la faible différence de température exploitée. De plus, le pompage de l'eau froide en profondeur nécessite une énergie non négligeable.

### 2.5.2.Énergie des marées

Les marées sont des mouvements périodiques verticaux de la surface de la mer, provoqués par l'attraction gravitationnelle de la lune, du soleil et autres corps célestes.

Leur intensité dépend essentiellement des positions relatives de la lune et du soleil par rapport à la terre, l'influence de la lune bien moins massive que le soleil, mais beaucoup plus proche, est 2.35 fois plus forte que celle de ce dernier.

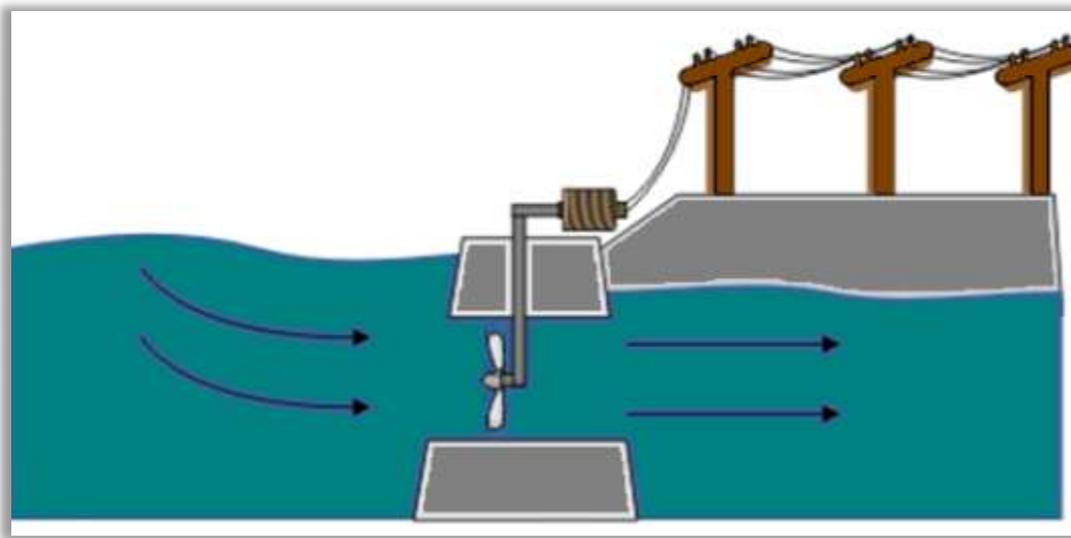
### Principe de fonctionnement d'une centrale marémotrice.

En construisant un barrage dans une zone d'amplitude de marée importante, on peut générer une différence de hauteur d'eau qui permettra de faire tourner des turbines hydrauliques. Ces turbines pourront fonctionner dans les deux sens.

Cette source d'énergie n'est intéressante que dans des zones où l'amplitude des marées est importante, et où la construction de barrages est réalisable à coût acceptable.

Principaux inconvénients de cette technologie:

- ✎ Coûts d'investissements élevés par rapport à la production énergétique.
- ✎ Elle n'est intéressante que dans des zones peu nombreuses où l'amplitude des marées est importante.
- ✎ Il faut de plus que la construction de barrages soit réalisable à coût acceptable.



Source personnelle

### 2.5.3.Énergie des courants marins

Les courants marins peuvent être dus aux courants de marée, ou encore aux courants générés par les différences de températures existantes entre les eaux tropicales et les eaux polaires.

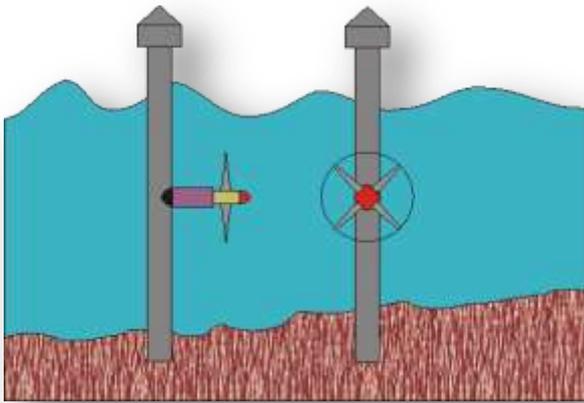
Leur exploitation de ces énergies commence à être sérieusement étudiée, et s'appuie sur le développement des techniques offshore.

Les zones les plus intéressantes, où la vitesse des courants est importante (au moins 1 à 3 m/s), se trouvent aux endroits où la topologie de la côte accélère les courants, comme les détroits, les caps, les entrées de fjords, etc...

L'énergie cinétique des courants marins peut être exploitée en utilisant des techniques similaires à celles de l'énergie éolienne. A cause de la densité nettement plus élevée de l'eau, on peut obtenir des puissances beaucoup plus importantes à faible vitesse.

### Principe de fonctionnement d'une hydrolienne

La technique la plus courante utilise un rotor connecté à un générateur, et qui est orienté face au courant, similaire à une éolienne, c'est pour cela que l'on parle alors d'**hydrolienne**. Le système peut être posé sur le fond de la mer, en encore suspendu sous une plateforme flottante.



Source personnelle

Ce sont les vagues générées par le vent sur la surface de la mer, (la houle) qui contiennent le plus d'énergie. La houle accumule de l'énergie, et la transporte en même temps vers les côtes. La houle est donc ainsi une conséquence de l'énergie solaire (au 2ème niveau car générée par le vent). Seulement 0,01% du flux solaire sur terre est transformé en énergie de la houle.

Cette énergie varie selon le site, et augmente en général lorsqu'on s'écarte de l'équateur. Ici aussi, les conditions locales comme la topologie de la côte et des reliefs sous-marins, ainsi que la météorologie, jouent un grand rôle en ce qui concerne le potentiel sur un site donné.

Cette technologie offre les avantages suivants:

-  Elles sont facilement prévisibles.
-  L'impact environnemental est faible: ni pollution, ni bruit, et impact visuel faible ou inexistant.
-  L'énergie des courants marins est bien plus concentrée que dans la plupart des autres énergies renouvelables, et s'apparente à celle de l'énergie hydraulique au fil de l'eau.
-  Des études récentes montrent que les courants marins pourraient à l'avenir proportionner une partie significative des besoins énergétiques.

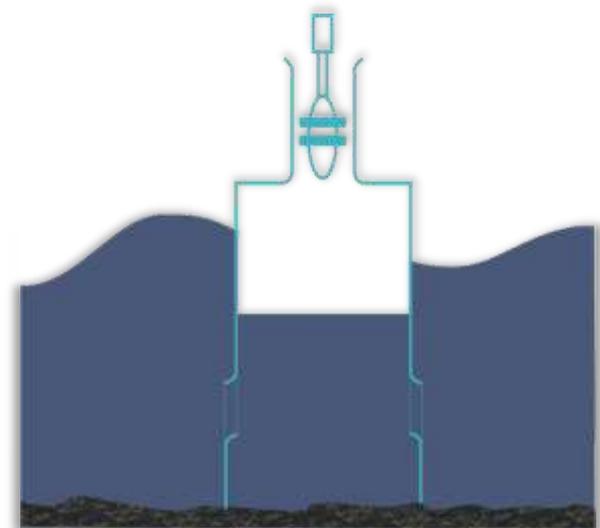
#### 2.5.4.Énergie des vagues

Les vagues peuvent être considérées comme une transmission d'énergie de la haute mer vers les côtes. Une des propriétés caractéristiques des vagues est leur capacité à se propager sur de grandes distances sans perdre à peine d'énergie. Ainsi l'énergie générée sur les océans arrive en grande partie sur les côtes où elle se concentre.

#### Systèmes utilisés pour l'exploitation des vagues

De nombreux dispositifs ont été inventés pour exploiter l'énergie des vagues, mais seuls quelques-uns ont été testés à échelle réelle.

La construction de tels dispositifs qui fonctionnent correctement est techniquement faisable. Cependant, seuls les essais grandeur nature en détermineront la fiabilité, et la robustesse lors des tempêtes.



Dispositif à air comprimé. Source personnelle

Les systèmes de récupération de l'énergie des vagues se composent en général:



d'un **élément d'interface**, qui est celui actionné par les vagues.

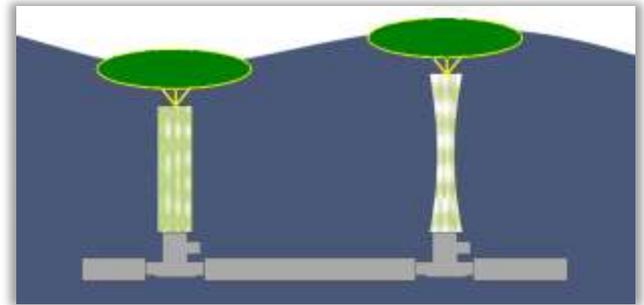
- ✓ Floteurs entraînés par l'action de la houle.
- ✓ Cavités dans lesquelles un fluide est mis en pression (air comprimé, directement ou indirectement: membrane), ou en mouvement (eau, huile).



d'un **système d'extraction de l'énergie**, qui amortit le mouvement de l'élément d'interface.

- ✓ Systèmes hydrauliques de haute pression (huile), ou basse pression (eau de mer).
- ✓ Turbines à air comprimé.

La plupart de ces systèmes sont conçus pour obtenir de l'électricité. Certains permettent de dessaler de l'eau de mer (mécaniquement par osmose inverse).



Dispositif par pompage: pompe à tube élastomère, développé en Suède dans les années 80, qui utilise la déformation élastique du tube. Source personnelle

## 2.6. ENERGIE HYDRAULIQUE ET MINIHYDRAULIQUE

Notre planète est couverte à 71% d'eau. L'énergie hydraulique provient, elle aussi, indirectement de l'énergie solaire, qui est responsable du cycle naturel de l'eau en provoquant l'évaporation de l'eau qui condensera plus tard sous forme de nuages avant de précipiter.

L'air chaud transporte de l'eau évaporée (invisible). Lorsque cet air se refroidit, une partie plus ou moins importante condense sous forme de gouttelettes d'eau minuscules (visibles) qui forment les brouillards, et les nuages. Dans certaines conditions, les gouttelettes deviennent trop grosses pour flotter dans l'air et tombent au sol sous forme de pluie, de neige, de grêle. De cette manière, de l'eau s'accumule dans les lacs, glaciers, etc..., et coule peu à peu vers la mer. On peut exploiter l'énergie potentielle de l'eau qui descend et se transforme en énergie cinétique à l'aide de turbines qui la transforment directement en énergie mécanique. Ces turbines autrefois appelés moulins à eau permettaient essentiellement de moudre du grain, mais aussi d'alimenter des scieries, forges, etc.... Aujourd'hui, les centrales hydrauliques modernes entraînent des alternateurs qui fournissent de l'électricité, ce sont des **centrales hydroélectriques**.



**Différences entre une centrale hydraulique et une centrale minihydraulique.** Une centrale minihydraulique est en quelque sorte une petite centrale hydraulique, mais qui ne nécessite que peu de travaux de génie civil, et n'a donc pas l'impact environnemental des grands ouvrages comme certains barrages qui ont inondé des régions entières.

Ce qui conditionne principalement le choix des technologies de production hydraulique est la configuration du terrain, pour les travaux de génie civil, et la différence de hauteur d'eau exploitable, en ce qui concerne les types de turbine.



On peut classer les centrales de la manière suivante:

### 2.6.1. Centrales au fil de l'eau et d'éclusée

Les centrales au fil de l'eau captent une partie d'un cours d'eau et la dérivent vers une centrale, l'eau retourne en aval au cours d'eau après utilisation. Leur production dépend directement du débit du cours d'eau et peut donc présenter des variations suivant les conditions hydrologiques. Un petit réservoir peut permettre d'amortir ces variations sur quelques jours, on parle alors de centrale d'éclusée.

Ce sont souvent des installations de plus faible puissance que les centrales de barrage.

Représentation d'une centrale d'éclusée.  
Source personnelle

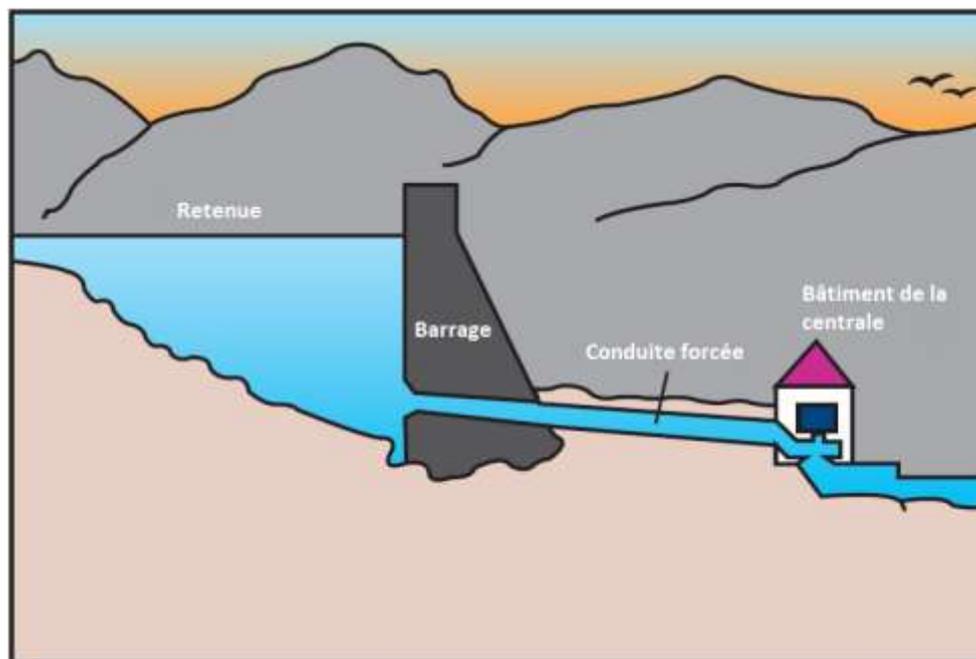


### 2.6.2. Centrales de lac

Elles se trouvent en dessous des réservoirs, naturels, ou créés par des barrages. La hauteur de chute de l'eau est habituellement importante.

Dans ce type de centrale, une grande quantité d'eau est stockée dans le lac, ce qui permet à la centrale de fonctionner à la demande. Ceci, associé à la rapidité de mise en route des turbines est un avantage primordial lorsqu'il s'agit de couvrir les variations de demande d'électricité, lors des heures de pointe par exemple.

Représentation d'une centrale de lac.  
Source personnelle



### 2.6.3. Centrales sur canal d'irrigation ou d'alimentation

Ce type de centrale, en général de petite puissance permet:



D'utiliser directement les dénivelés sur un canal, de la même manière qu'une centrale au fil de l'eau.



D'utiliser le dénivelé entre un canal et un cours d'eau proche. Dans ce cas, on ne turbinera que l'eau excédante du canal.

## 2.7. ENERGIE GEOTHERMIQUE

Lors de sa formation, la terre était à l'origine une masse de gaz et de poussières ardentes. En se refroidissant, sa surface a formé une croûte, il y a environ 3 800 millions d'années, mais une grande partie de la chaleur se trouve encore sous la surface. C'est pour cela que notre planète est encore aujourd'hui, une immense chaudière naturelle, qui est le lieu de nombreux processus géodynamiques, de la dérive des continents et formation des montagnes et failles, aux tremblements de terre et volcans, etc...



Freedigitalphotos.net

La chaleur interne de la terre trouve son origine dans:

-  La désintégration des isotopes radioactifs présents dans la croûte et le manteau terrestre, essentiellement l'uranium 235, l'uranium 238, le thorium 232 et le potassium 40. Ceci couvre environ la moitié de l'énergie.
-  La chaleur initiale de sa formation il y a environ 4 500 millions d'années.
-  L'échauffement par friction entre les diverses couches qui composent la terre.
-  La cristallisation du noyau interne libère aussi de l'énergie.

L'extraction de chaleur de la terre peut être aussi inversée, pour stocker de la chaleur ou du froid. Cette technique, utilisable à grande échelle pour la climatisation de bâtiments, présente un potentiel élevé pour l'avenir.



Usage thermique dans le secteur résidentiel.  
Freedigitalphotos.net

L'énergie géothermique ne provient donc pas du soleil. Bien qu'elle soit utilisée depuis des siècles (thermes romains, bains turcs, etc...), son niveau d'exploitation est aujourd'hui très inférieur à son potentiel.

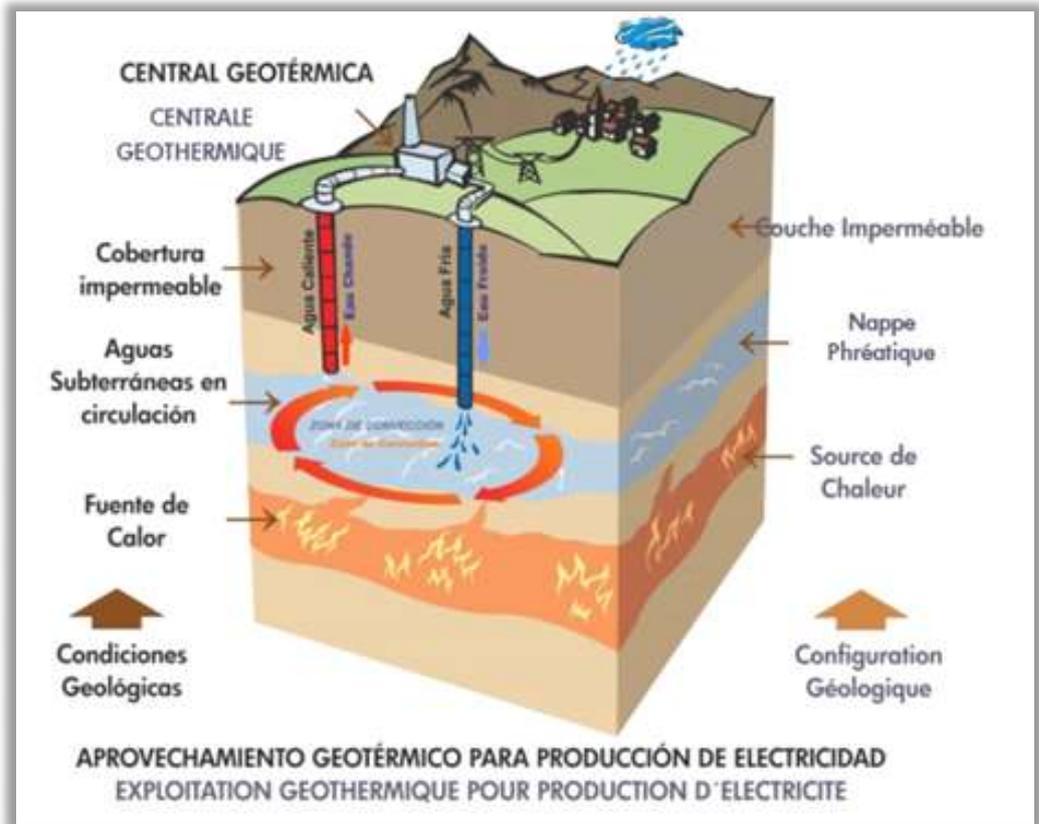
Dans l'état actuel des technologies, la géothermie est utilisée principalement de deux manières:

-  **Génération de chaleur.** Des stations balnéaires, piscines et autres applications traditionnelles à l'usage pour la production d'eau chaude sanitaire et de chauffage, pour l'agriculture, l'aquaculture ou l'industrie.

-  **Génération d'électricité.** Depuis le siècle dernier, la production de vapeur d'origine géothermique a été utilisée pour la production d'électricité.

Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique de production d'électricité.

Source personnelle



Applications suivant le type de gisement

Les applications de la géothermie dépendent essentiellement de la température du gisement, comme le montre le tableau suivant.

Source personnelle

APLICACIONES / APPLICATIONS			
Temperatura	Tipos de Yacimientos	Producción	Usos directos de calor
>250°C	Alta temperatura (T > 150°C) Haute Température	Producción directa de Electricidad Production (Directe) d'Électricité	Programas alimentarios, cultivo de setas Usages Alimentaires, culture de champignons
150°C	Roca Caliente Seca T= 250 - 300°C Gisement Sec	Producción de Electricidad Production d'électricité	Secado de frutos y vegetales Séchage de fruits et végétaux
70°C	Temperatura Media (70°C < T < 150°C) Moyenne Température	Producción de Electricidad Production d'électricité Procesos Industriales Usages Industriels	Hidroterapia/ Hydrothérapie Secado de papel y pulpa Séchage de papier, de pulpe
20°C	Baja Temperatura (T < 70°C) Basse Température	Usos directo de Calor Usage direct de la chaleur	Calefacción de Invernaderos Chauffage de serres Calefacción de viviendas Chauffage de bâtiments
Temperatura	Types de gisement	Production	Usage direct de la Chaleur

## 2.8. ENERGIE DE LA BIOMASSE

Selon la norme européenne CEN/TS 14588, la biomasse est un: « matériau d'origine biologique à l'exclusion des matériaux intégrés dans des formations géologiques et fossilisés ». Parmi ces derniers se trouvent le charbon, le pétrole et le gaz, dont la formation a emmagasiné il y a plusieurs milliers d'années une grande quantité de carbone que nous libérons aujourd'hui sous forme de dioxyde de carbone (CO<sup>2</sup>) par leur combustion.

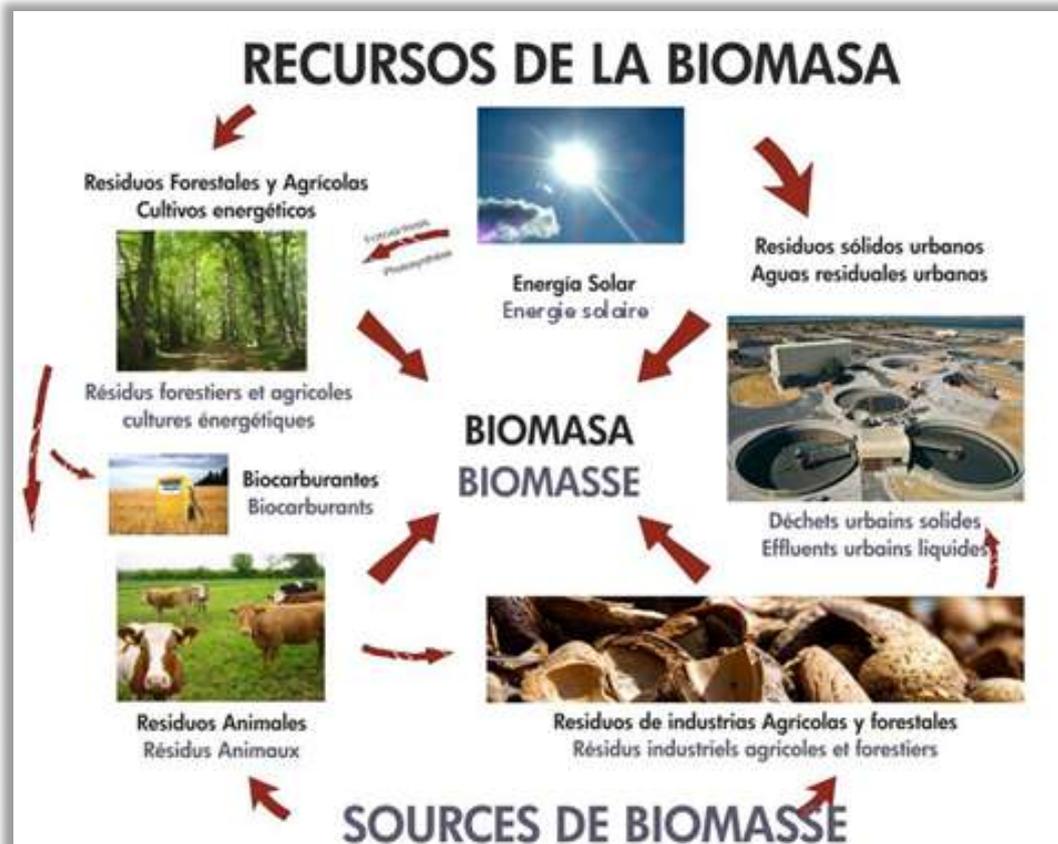


La biomasse, elle, utilise des matières organiques qui ont **récemment** fixé du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Dans ce cas, le carbone libéré par la combustion sera à nouveau fixé par photosynthèse par les plantes, ce qui fait de la biomasse une énergie durable, **à condition que cette ressource ne soit pas surexploitée.**



Comme pour la plupart des énergies renouvelables, le soleil est à l'origine de l'énergie contenue dans la biomasse: les plantes utilisent l'énergie solaire (la photosynthèse) pour leur croissance, et fabriquent de la matière organique à partir du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et des composés du sol.

Cycle de la biomasse. Source personnelle



### 2.8.1. Ressources, transformation et utilisations de la biomasse

Los recursos en biomasse sont très variées, les principales étant d'origine agricole et forestière:

-  Cultures énergétiques
-  Résidus agricoles et forestiers
-  Déchets animaux
-  Déchets urbains solides
-  Effluents urbains liquides

En fonction des ressources, on pourra utiliser l'un ou l'autre des processus de transformation de la biomasse. A leur tour, ces processus pourront être orientés vers un ou plusieurs usages différents, parfois même simultanément.



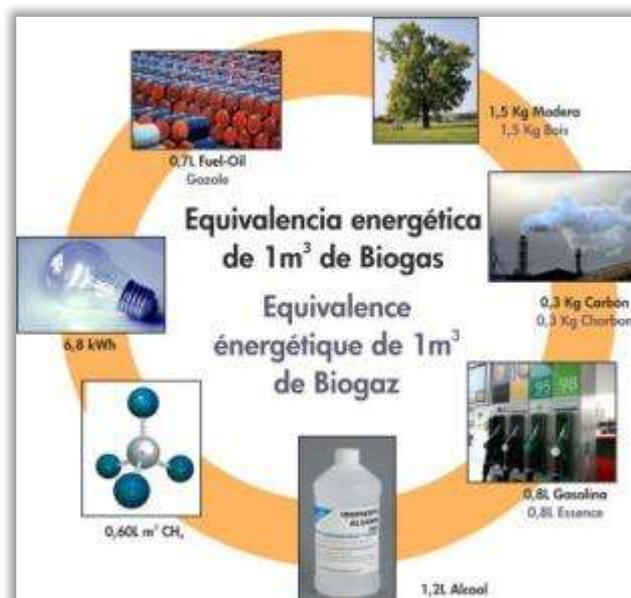
Source personnelle

### 2.8.2. Exploitation du biogaz

Le biogaz s'obtient par décomposition anaérobie (à l'abri de l'air) de la matière organique. Il est composé de méthane ( $CH_4$ ) à plus de 60%.

Le méthane se trouve aussi à l'état fossile sous forme de gaz naturel, associé ou non à d'autres hydrocarbures (grisou des mines de charbon, gaz naturel des puits de pétrole, etc.). C'est un puissant gaz à effet de serre. Le méthane est un bon combustible qui n'émet pas de cendres ou suies. Cette utilisation énergétique du méthane, plutôt que son dégagement dans l'atmosphère, est dans tous les cas bénéfique pour l'environnement, car sa combustion génère du gaz carbonique  $CO_2$ , gaz à effet de serre moins puissant que lui, lequel  $CO_2$  peut être recyclé par les plantes.

La technique de digestion anaérobie permet de valoriser toutes sortes de déchets à contenu organique en générant du biogaz ainsi que d'autres matières utilisables comme fertilisants.



Equivalence du biogaz. Source personnelle

Le schéma suivant analyse un exemple de production et d'utilisation de biogaz et en montre les différentes étapes.

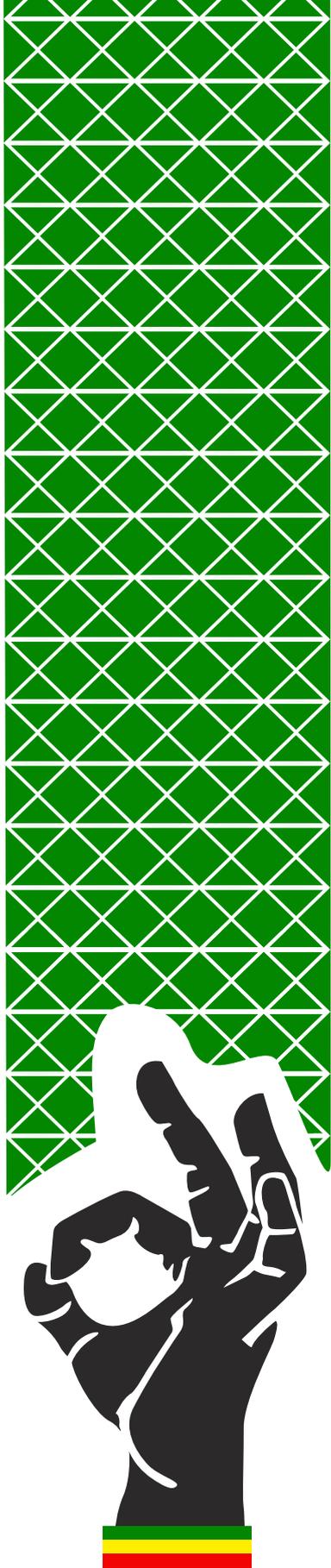


Cycle du Biogaz. Source personnelle

### Cycle du Biogaz.

Il s'agit de l'une des énergies renouvelables les plus accessibles, autant par la multitude de matières premières utilisables, que par sa simplicité. De plus, par la valorisation énergétique de déchets, elle présente un avantage environnemental supplémentaire.

L'utilisation la plus efficace du biogaz est la cogénération, qui produit à la fois de l'électricité et de la chaleur.



## **CHAPITRE II: USAGE RATIONNEL DE L'ENERGIE**

## Chapitre II: USAGE RATIONNEL DE L'ENERGIE

**OBJET:** Cette unité couvre les concepts de base liés à l'efficacité énergétique et l'utilisation rationnelle de l'énergie.

Elle vise à donner à l'étudiant une vue d'ensemble de l'état actuel des technologies, et à lui fournir les connaissances de base lui permettant de différencier les différentes technologies et leur efficacité.

Les outils nécessaires pour effectuer les calculs de base de consommation des différents équipements sont présentés.

### 1. INTRODUCTION

L'efficacité énergétique est au centre des trois axes de la politique énergétique globale, qui sont:



La sécurité de l'approvisionnement, par la réduction et l'optimisation des usages de l'énergie.



La compétitivité, particulièrement importante dans le scénario économique et financier actuel.



La durabilité, dont l'un des buts est de limiter le réchauffement climatique.

La politique énergétique d'un pays, avant toute implémentation de programmes d'action sur l'énergie, doit commencer par l'analyse de ces deux éléments basiques:



Il faut d'abord quantifier le potentiel d'**économies d'énergie** existant, qui permettra de faire un usage rationnel de l'énergie



En second lieu, on pourra étudier l'optimisation des usages de l'énergie, et les réductions de consommation que peuvent apporter des **mesures d'efficacité énergétique**.

Une fois ces deux points analysés, on pourra prendre les mesures d'économies et d'efficacité conséquentes, et par la suite lancer les programmes de promotion des énergies renouvelables adaptés au potentiel de chaque région.

#### 1.1. PANORAMA MONDIAL

Actuellement, la consommation mondiale d'énergie est supérieure à 12 300 millions de tonnes équivalent pétrole (tep), le pétrole étant la source d'énergie la plus utilisée dans le monde avec 34% du total.

L'Agence internationale de l'énergie a estimé que la demande d'énergie primaire dans le monde devrait augmenter de 36% entre 2008 et 2035, et que l'essentiel de l'approvisionnement dépendrait encore en 2035 des réserves de combustibles fossiles.

A titre d'exemple, selon une étude réalisée par la Commission Européenne, le potentiel actuel d'économies d'énergie serait de 20%, cette énergie étant **actuellement perdue par simple gaspillage**. Cette même étude prévoit que d'ici l'an 2020, on pourrait techniquement et économiquement économiser au moins le cinquième de l'énergie primaire consommée dans l'Union européenne.

## 1.2. CONCEPTS

Nous décrivons ici un certain nombre de concepts liés à l'efficacité énergétique. Ceux-ci serviront de point de départ aux étudiants, avant d'entrer plus en détail en fonction des diverses technologies.

### 1.2.1. Efficacité énergétique

*Celle-ci se définit comme étant: la réduction de la consommation d'énergie tout en maintenant les mêmes services énergétiques, sans diminuer notre confort et notre qualité de vie, en assurant le maintien de l'approvisionnement et la protection de l'environnement, et en promouvant un comportement durable.*

L'efficacité énergétique comprend toutes les mesures qui visent à modifier la consommation d'énergie, autant du côté de l'offre, par des améliorations technologiques, que du côté de la demande, par le biais de changements technologiques, économiques et de comportement.

### 1.2.2. Audit énergétique

Il s'agit d'un outil d'évaluation de la consommation d'énergie, destiné à identifier les améliorations potentielles qui peuvent contribuer aux économies d'énergie ou à une utilisation plus efficace de celle-ci, le but étant d'optimiser la demande énergétique d'une installation.

### 1.2.3. Services énergétiques

Ensemble de prestations permettant l'optimisation et/ou la réduction des coûts énergétiques.

Ces prestations peuvent inclure des travaux de construction, d'installation ou de modification, de modernisation ou de renouvellement d'équipements et de systèmes, leur maintenance, ainsi que leur exploitation et la gestion nécessaire à une bonne utilisation des technologies mises en œuvre.

Le service énergétique est en général défini sur la base d'un contrat qui assure une économie d'énergie vérifiable, mesurable ou estimable.

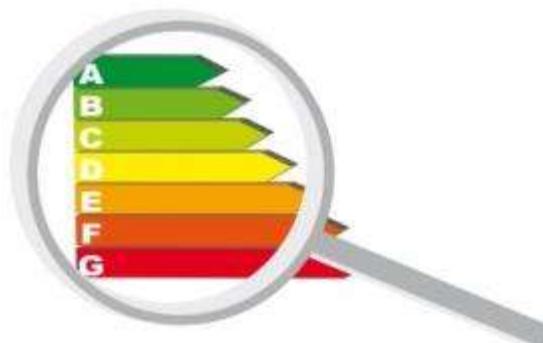
### 1.2.4. Entreprise de services énergétiques

Il s'agit de toute personne physique ou morale qui propose des services énergétiques ou une amélioration de l'efficacité énergétique dans les installations ou locaux d'un utilisateur, en prenant pour cela un certain risque financier. En effet, le paiement des services fournis se base en général (partiellement ou totalement) sur les résultats d'amélioration de l'efficacité énergétique et le respect des performances annoncées

### 1.2.5. Gestionnaire énergétique

Il s'agit de la personne responsable de l'optimisation des processus impliqués dans la consommation énergétique d'un bâtiment, d'une installation, ou d'une entreprise. Ses tâches principales sont: le suivi des consommations d'énergie du bâtiment ou des installations, l'analyse des consommations, le contrôle des fournitures d'énergie, l'identification des économies d'énergie potentielles, et la proposition de solutions destinées à économiser l'énergie.

leur appliquer des critères de gestion optimale, d'économies et d'efficacité. Ceux-ci peuvent être utilisés par toute entité qui désire:



Freedigitalphotos.net

### 1.2.6. Intensité énergétique

L'intensité énergétique, est la consommation d'énergie primaire ou finale, rapportée au produit intérieur brut (PIB). Ceci équivaut à évaluer la quantité moyenne d'énergie nécessaire pour générer une unité de richesse. Cet indice est un bon indicateur de l'évolution de l'efficacité énergétique.

De nombreux facteurs influent sur l'évolution de cet indice, comme la structure industrielle du pays, le niveau d'équipement, l'évolution de la conjoncture économique et des prix, la disponibilité de ressources autochtones, la diversification énergétique, le climat, la situation géographique, etc...

-  Améliorer systématiquement son efficacité énergétique.
-  Etablir, mettre en œuvre, entretenir et améliorer son système de gestion énergétique.
-  Augmenter l'utilisation d'énergies renouvelables ou recycler son énergie excédentaire ou celle de tiers.
-  Se mettre en concordance avec sa politique énergétique, et le démontrer aux tiers.
-  Faire certifier ce protocole de gestion énergétique par une organisation externe

### 3.2.7. Protocole de gestion énergétique.

Les protocoles de gestion de l'énergie visent à normaliser les processus qui font intervenir l'énergie afin de pouvoir

Le but recherché est de proposer aux entités, quel que soit leur secteur ou leur taille, un outil facilitant la réduction de la consommation d'énergie, des coûts, ainsi que des émissions de gaz à effet de serre (GES) associées.

### 1.3. DISTRIBUTION PAR SECTEURS DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE MONDIALE

La demande finale d'énergie par secteur au niveau mondial se répartit de la manière suivante:

-  **L'industrie** – environ 35%
-  **Les transports** – 25%
-  **Les secteurs résidentiels et tertiaire** – 40%

Les patrons de demande énergétique par secteur varient selon les pays. Dans les pays développés c'est le secteur des services qui a enregistré la croissance la plus rapide, tandis que dans les pays en développement, c'est l'ensemble des secteurs qui a connu une croissance annuelle soutenue comprise entre 2% et 3%



Freedigitalphotos.net

Avant de concevoir une installation de climatisation, il est nécessaire de bien étudier (ou concevoir) l'enceinte à climatiser. C'est à dire qu'il faut prendre en compte les matériaux employés pour l'isolation, l'orientation, les ouvertures, la répartition des espaces dans le bâtiment, les éléments architecturaux (bioclimatiques) qui permettent de réduire les besoins en climatisation et donc en énergie.

La production de froid ou de chaleur, ainsi que la régulation de l'humidité, s'utilisent dans divers secteurs, depuis le secteur résidentiel pour permettre le confort thermique des habitants, jusqu'aux immeubles de bureaux, les hôpitaux, les centres éducatifs, etc...

Il existe différents types de systèmes de climatisation à l'heure de générer de la chaleur ou du froid. Les plus utilisés sont les suivants:

## 2. EFFICACITE ENERGETIQUE PAR TECHNOLOGIE

### 2.1. INSTALLATIONS DE CLIMATISATION

Les installations de climatisation (au sens large) sont celles qui permettent le contrôle de la température (chauffage et/ou réfrigération), et éventuellement de l'humidité. Elles sont constituées de systèmes de production de chaleur et/ou de froid (chaudière, pompe à chaleur, etc...), d'un système de distribution, et d'unités terminales

CHALEUR	FROID
Chaudière	Pompe à chaleur à compression
Résistance électrique	Refroidisseur par évaporation
Pompe à chaleur	Pompe à chaleur à absorption

### 2.1.1. Chauffage

Parmi les systèmes de chauffage, on trouve essentiellement:



**Les chaudières.** Les systèmes de chauffage par chaudière peuvent être

considérés comme des boîtes noires où entrent le fluide à réchauffer et le combustible, et d'où sortent le fluide chaud, et les gaz de combustion. Les chaudières peuvent se classer de la manière suivante, selon leur rendement:

	CONVENTIONNELLES	BASSE TEMPERATURE	CONDENSATION
Combustible	Bois, charbon, fioul, propane, gaz naturel.	Bois, charbon, fioul, propane, gaz naturel.	Propane, gaz naturel
Caractéristiques principales	Fonctionnent à haute température	La température de sortie est plus faible que dans une installation conventionnelle.	Une partie des gaz résidus de combustion est condensée
Rendement	80 – 85%	90 – 95%	100 – 105%
Economie par rapport à une chaudière conventionnelle		Environ 15%	Environ 25%

Hormis les combustibles habituellement utilisés dans les chaudières, d'autres possibilités existent, telles l'usage de biomasse d'origine forestière ou agricole (déchets de cultures ou cultures énergétiques).

Les émissions des chaudières qui utilisent de la biomasse sont considérées comme neutres car la quantité de CO<sub>2</sub> émise lors de la combustion, a été préalablement extraite et fixée par la plante par photosynthèse durant sa croissance.



**Résistance électrique.** Le principe de chauffage par résistance électrique se base sur l'effet Joule. Bien que le

rendement de cet élément soit élevé, **le rendement de la chaîne complète peut être désastreux**, en particulier si l'énergie électrique est obtenue à partir d'une centrale thermique où sont brûlés des combustibles. Dans ce cas, le rendement global de la chaîne est nettement inférieur à celui de la combustion du même combustible dans une chaudière. En général, le système de chauffage par résistance électrique, quoique très simple à installer, est finalement peu rentable.



**Les pompes à chaleur.** Elles permettent de générer aussi bien de la chaleur que du froid. Ce sont des

machines thermiques qui permettent d'extraire de la chaleur d'un milieu pour le transférer à un autre. Ces appareils comportent quatre composants principaux (le compresseur, l'évaporateur, le condenseur et le réducteur de pression).

Pour **limiter la consommation de chauffage**, on peut:

-  Réduire les pertes par ventilation (fuites d'air), et par radiation.
-  Améliorer l'isolation thermique des pièces à chauffer.
-  Améliorer le rendement, par l'utilisation d'une chaudière plus efficace, basse température ou condensation par exemple.
-  Changer de combustible, par exemple remplacer le fioul par du gaz naturel.
-  Améliorer l'entretien, le système de régulation, ou passer à un système plus efficace (introduire des énergies renouvelables).

### 2.1.2. Réfrigération

Pour la production de froid, différents systèmes sont possibles, mais les plus utilisés habituellement sont les **pompes à chaleur** (à compression), ou les **refroidisseurs par évaporation** (en conditions sèches), qui utilisent de l'énergie électrique. Il existe aussi des systèmes de réfrigération, qui utilisent une source de chaleur au lieu de l'électricité (**pompes à chaleur à absorption**).

Ces dernières présentent une excellente opportunité d'utilisation d'économie d'énergie, par utilisation d'énergie renouvelable comme le solaire thermique, ou la chaleur résiduelle d'autres processus.

Les **refroidisseurs par évaporation** utilisent le refroidissement obtenu par évaporation de l'eau dans l'air. Ils nécessitent une alimentation en eau, et ne fonctionnent que si l'air ambiant est suffisamment sec.

Dans les systèmes de **refroidissement par absorption**, l'énergie mécanique fournie par le compresseur est remplacée par celle d'une source de chaleur.

Pour **limiter la consommation en réfrigération**, on peut:

-  Réduire les pertes par ventilation (fuites d'air), et radiation.
-  Améliorer l'isolation thermique des pièces à refroidir
-  Réduire les apports thermiques des systèmes d'éclairage (remplacer les ampoules et luminaires par d'autres plus efficaces), ainsi que des appareils électroménagers.
-  Améliorer le rendement de l'installation (remplacer la machine à froid par une autre plus efficace, améliorer le système de distribution, utiliser le free-cooling, de la géothermie de basse température, des systèmes à absorption, ou améliorer le système de régulation)

### 2.1.3. Ventilation

Dans la plupart des cas, un certain renouvellement de l'air est nécessaire, ce qui s'obtient à l'aide de ventilateurs et extracteurs. La ventilation en elle-même ne nécessite que peu d'énergie, mais l'air entrant est à climatiser également, ce qui nécessite une consommation supplémentaire.

Les types de ventilation habituels sont les suivants:



Ventilation naturelle: le renouvellement de l'air se fait par les ouvertures et infiltrations naturelles.



Ventilation forcée: le renouvellement de l'air se fait par des systèmes actifs (ventilateurs et extracteurs).

Il y a aussi des systèmes de ventilation qui récupèrent une partie de la température de l'air extrait, dans le but de diminuer la consommation additionnelle de climatisation.



Les **mesures d'économie** à adopter se basent sur l'adaptation de la ventilation aux nécessités réelles du bâtiment. Un excès de ventilation augmente la consommation en climatisation, car l'air entrant doit être traité. L'idéal est de limiter le débit d'air entrant au minimum nécessaire pour maintenir les conditions d'hygiène. Ce débit dépend de l'occupation du bâtiment, laquelle peut varier amplement au cours de la journée.

## 2.2. SYSTEMES D'ECLAIRAGE

Actuellement, l'éclairage joue un rôle important en ce qui concerne les activités productives et

sociales. La technologie a évolué, en s'adaptant à des critères de qualité de plus en plus exigeants, et en utilisant des technologies de plus en plus efficaces du point de vue énergétique.

Globalement, la consommation pour l'éclairage représente 19% du total de l'énergie électrique, mais 70% de la consommation de la rue, et 20% de la consommation domestique.

Dans l'union européenne, 75% de l'éclairage se base sur des technologies anciennes à bas rendement énergétique, ce qui représente un potentiel d'économies d'énergie de 650 millions d'euros correspondant à 2.7 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>.

Au niveau sectoriel, l'éclairage représente une part importante de la consommation électrique de nombreux bâtiments. Le tableau suivant montre la proportion d'électricité utilisée pour l'éclairage dans les différents secteurs:

SECTEUR	% ENERGIE ELECTRIQUE POUR L'ECLAIRAGE
Bureaux	50%
Hôpitaux	20 – 30%
Industrie	15%
Ecoles	10 – 15%
Commerces	15 – 70%
Hôtels	25 – 50%
Résidentiel	10 – 15%

Le potentiel d'économies d'énergie est important, et pourrait être exploité en remplaçant les systèmes d'éclairage actuels par des systèmes plus performants, et en ajoutant des moyens de régulation et de contrôle.

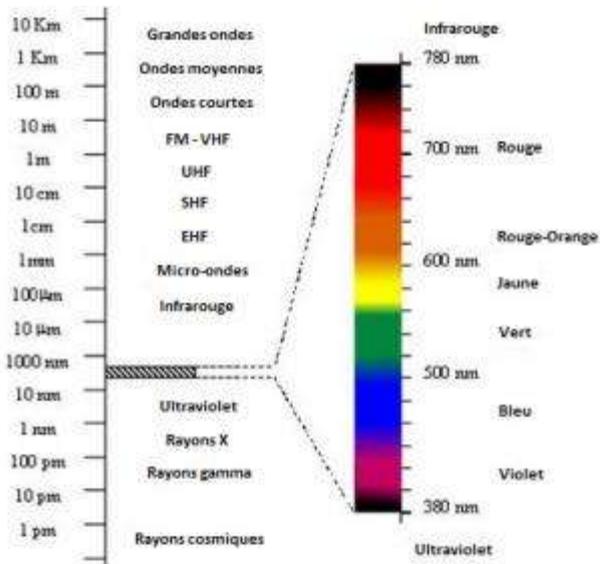
### 2.2.1. Concepts généraux



**La lumière** est l'une des formes que peut prendre l'énergie, elle se présente ici sous forme de rayonnement électromagnétique. L'une des caractéristiques principales de ces rayonnements est la longueur d'onde. L'œil humain n'est sensible qu'à une bande étroite de longueurs d'onde, connue comme **spectre visible**, et qui va de 380nm à 780nm de longueur d'onde



**La couleur** est la sensation que produisent les yeux en fonction des longueurs d'onde, mélange de trois couleurs primitives que sont le rouge, le vert, et le bleu. Celles-ci permettent de générer les autres couleurs du spectre visible par synthèse additive.



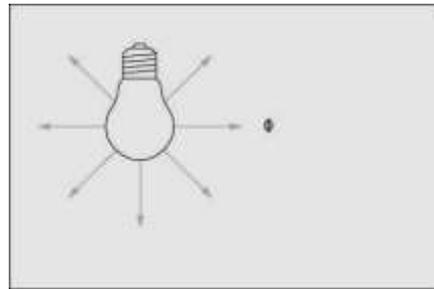
Spectre de la lumière

La mesure de la lumière inclut des mesures de quantité (flux lumineux, intensité lumineuse,

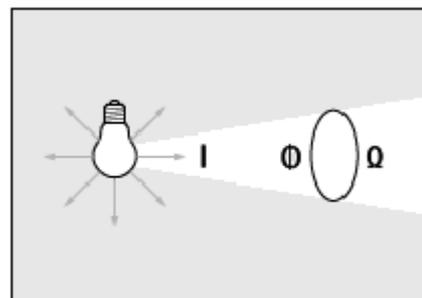
éclairage et luminance) et de qualité (rendu des couleurs et température de couleur).



**Le flux lumineux ( $\Phi$ )** est la quantité totale de lumière qu'une source lumineuse peut émettre; elle se mesure en lumen (lm), et permet de classer les lampes en fonction de leur capacité à émettre de la lumière. *Par ex. une ampoule incandescente de 75W émet un flux lumineux de 900lm, alors qu'une ampoule fluorescente de 58W émet 5200lm.*

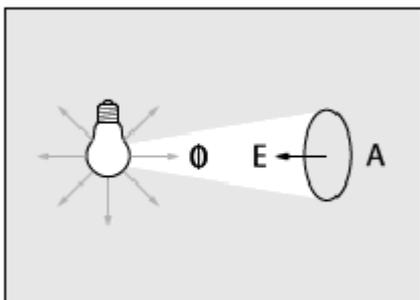


**L'intensité lumineuse (I)** est le flux lumineux émis dans une direction donnée. Il se mesure en candela (cd) et permet de comparer l'éclat de diverses sources lumineuses, comme les ampoules halogènes, les ampoules à arc, et les leds.

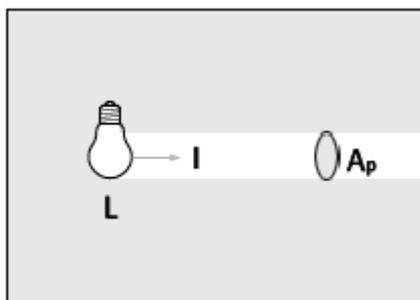




**L'éclairement (E)** est la quantité de lumière reçue par unité de surface  $E = I / S$ . Il se mesure en lux et donne le niveau d'éclairement sur un plan de travail, ou dans la rue par exemple. L'éclairement diminue avec le carré de la distance à la source lumineuse.



**La luminance (L)** est la lumière émise par unité de surface dans une direction donnée. Elle se mesure en candela par  $m^2$ . Elle a son importance dans l'éclairage des voies publiques.



**L'indice de rendu de couleur (IRC)** est la capacité à reproduire correctement les couleurs, son échelle va de 0 à 100 et correspond au tableau suivant :

IRC	Qualité de rendu des couleurs
90 - 100	Excellent
80 - 90	Bon
60 - 80	Modéré
< 60	Mauvais

Les lampes qui offrent un IRC élevé permettent de différencier facilement les couleurs.



**La température de couleur** permet de classifier les différents types de lumière. La lumière blanche est une combinaison de couleurs, et les blancs ne sont pas tous identiques. Plus la température de couleur est élevée, plus la lumière blanche est "froide" (ou bleutée).



**Le rendement lumineux** mesure le rendement d'une lampe, et s'exprime comme le rapport de l'intensité lumineuse émise en lumens, par la puissance consommée, en watts. Le tableau ci-dessous indique les rendements lumineux de différents types de sources.

Source	Rendement (lm/W)	*Durée de vie (heures)
Incandescence	10 - 15	1.000
Halogène	15 - 25	2.000
Tube fluorescent	60-93	10.000
Ampoule fluorescente compacte	50-81	8.000
Induction	70	85.000 - 100.000
Vapeur de mercure	46 - 55	12.000
Vapeur de sodium haute pression	100 - 130	18.000 – 24.000
Vapeur de sodium basse pression	130 – 170	18.000 – 20.000
Halogénures métalliques	70 - 90	7.000 – 10.000
LED	90 -120	50.000

**\*Durée de vie:** indique la durée de fonctionnement jusqu'à ce que le flux lumineux descende à une valeur telle que la source lumineuse ne soit plus rentable, et que son remplacement devienne recommandable: on prend en compte le prix de la source, celui de l'énergie consommée, et celui de la maintenance.

### 2.2.2.Systèmes d'éclairage

Un système d'éclairage est composé de divers éléments:



**La lampe.** C'est la source de lumière artificielle que génère le passage du courant électrique.

Les divers types de lampes peuvent se classer de la manière suivante:

Lampes incandescentes	Lampes à décharge	autre technologies
classiques à vide	mixtes (fluorescence/incandescence)	LED
classiques à gaz noble	Fluorescentes (mercure basse pression)	OLED
halogènes	mercure haute pression	
	Halogénures métalliques	ESL
	Sodium basse/haute pression	
	xénon	

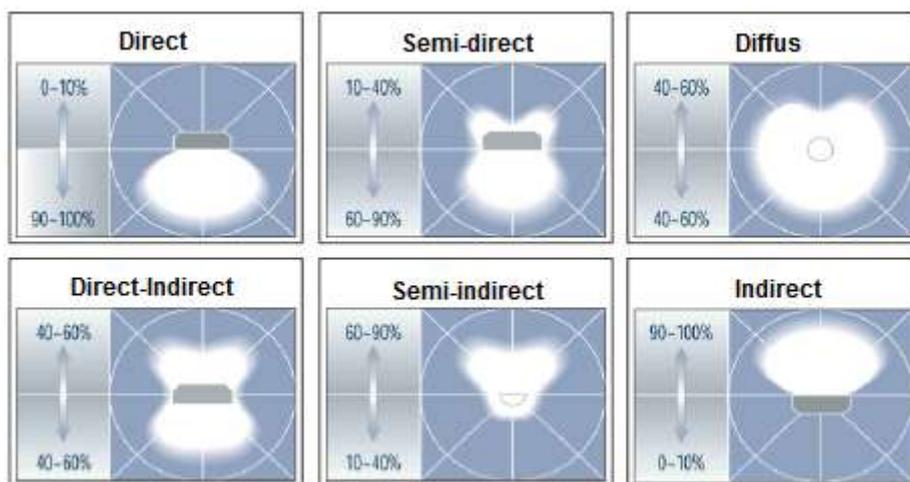
Le choix de la source lumineuse doit tenir en compte divers points: les besoins d'éclairage, tant quantitatifs que qualitatifs, le rendement de la lampe, sa durée de vie utile, et son prix.

L'objectif est de déterminer la meilleure solution satisfaisant aux besoins, au meilleur coût total du système (comportant prix d'achat et dépenses énergétiques).



**Luminaire.** C'est l'élément qui répartit, filtre ou transforme la lumière d'une ou plusieurs lampes pour éviter l'aveuglement, et en même temps les fixe et les protège.

Les luminaires peuvent être classifiés selon la manière dont ils distribuent la lumière:



Différents types de luminaires.

Le choix d'un luminaire dépendra des besoins de l'espace à éclairer, du degré de protection nécessaire face aux agents extérieurs auquel il sera soumis, de son efficacité, d'éventuelles contraintes de pollution lumineuse, et bien sûr de son prix.

*électronique permet une économie de 20% à 30% sur l'énergie consommée.* Les équipements auxiliaires les plus courants sont les ballasts, les starters, et les condensateurs, ainsi que les transformateurs pour les lampes halogènes basse tension et LED.



**Équipement auxiliaire.** Celui-ci est nécessaire pour assurer le démarrage ou l'alimentation électrique de certains types de lampes, ou encore le réglage de l'intensité lumineuse. Il peut dans certains cas, suivant la technologie utilisée, représenter une part importante de la consommation électrique du système d'éclairage. *Par exemple, le remplacement d'un ballast ferromagnétique par un ballast*

Les ballasts interviennent dans l'alimentation de la lampe, et stabilisent le courant de celle-ci à une valeur adéquate. Le starter permet l'allumage de la lampe, en générant la haute tension nécessaire à son amorçage. Il peut être électrique, électromécanique ou électronique.

Les condensateurs corrigent le facteur de puissance, et réduisent la puissance réactive consommée, et par là même les

pertes énergétiques induites dans les câbles d'alimentation.

### 2.2.3. Mesures d'économie d'énergie dans l'éclairage.

La consommation d'énergie d'un système d'éclairage est égal à la somme des puissances consommées par la lampe et par ses équipements auxiliaires (s'il y a lieu), multipliée par le temps de fonctionnement. Pour diminuer la consommation énergétique, deux voies sont possibles:



**Réduire la puissance.** Adapter le niveau d'éclairage si celui-ci est excessif en remplaçant les lampes par des lampes de moindre puissance ou en réduisant leur nombre. On peut également remplacer les lampes, les luminaires ou les ballasts par d'autres de meilleur rendement.

Le tableau suivant indique les économies d'énergie possibles lorsqu'on remplace des ampoules à incandescence par des lampes fluocompactes, tout en maintenant le même éclairement.

Ampoule incandescente	Ampoule fluocompacte	Economie d'énergie(%)
40W	9W	77
60W	11W	82
75W	15W	80
100W	20W	80



**Réduire le temps de fonctionnement.** Par des automatismes d'allumage et d'extinction dans les zones de passage,

en utilisant des détecteurs de présence ou des minuteries. On peut également éteindre ou diminuer l'éclairage en fonction de l'éclairage naturel (détecté par des cellules photoélectriques), de la fréquentation ou de l'heure, à l'aide de gradateurs ou de ballasts réglables.

### 2.2.4. Analyse économique

Le remplacement d'un système d'éclairage existant par un nouveau système plus performant implique une dépense financière initiale, qui devra s'amortir avec les économies futures.

L'analyse économique ne doit pas seulement tenir compte du coût initial, elle doit inclure également les coûts prévus de fonctionnement et de maintenance. Il sera donc nécessaire de disposer des données suivantes:



Nombre, type et prix des luminaires.



Nombre, type et prix des lampes.



Consommation de chaque luminaire (y compris les équipements auxiliaires si nécessaire).



Coût de l'énergie électrique.



Heures de fonctionnement annuel.



Financement et amortissement.

## 2.3. INSTALLATIONS D'AIR COMPRIME

### 2.3.1. Concepts

L'air comprimé est souvent utilisé dans les installations industrielles. Il sert habituellement à fournir du travail mécanique par déplacement linéaire ou rotatif, à des applications de soufflage, pistolets à peinture, etc...

On obtient de l'air comprimé à l'aide d'un compresseur, qui est une machine qui augmente la pression de l'air, d'un gaz ou d'un mélange de gaz à partir de la pression atmosphérique.

### 2.3.2. Composants d'une installation

Une installation d'air comprimé se compose essentiellement de:

-  **Un système d'aspiration:** c'est l'ensemble des éléments traversés par l'air entrant, destiné à être comprimé.
-  **Un compresseur:** il est chargé d'augmenter la pression du fluide.
-  **Un réservoir d'air comprimé:** permet le stockage de l'air comprimé.
-  **Des lignes d'alimentation:** ce sont les tubes qui transportent l'air comprimé jusqu'aux lieux d'utilisation.

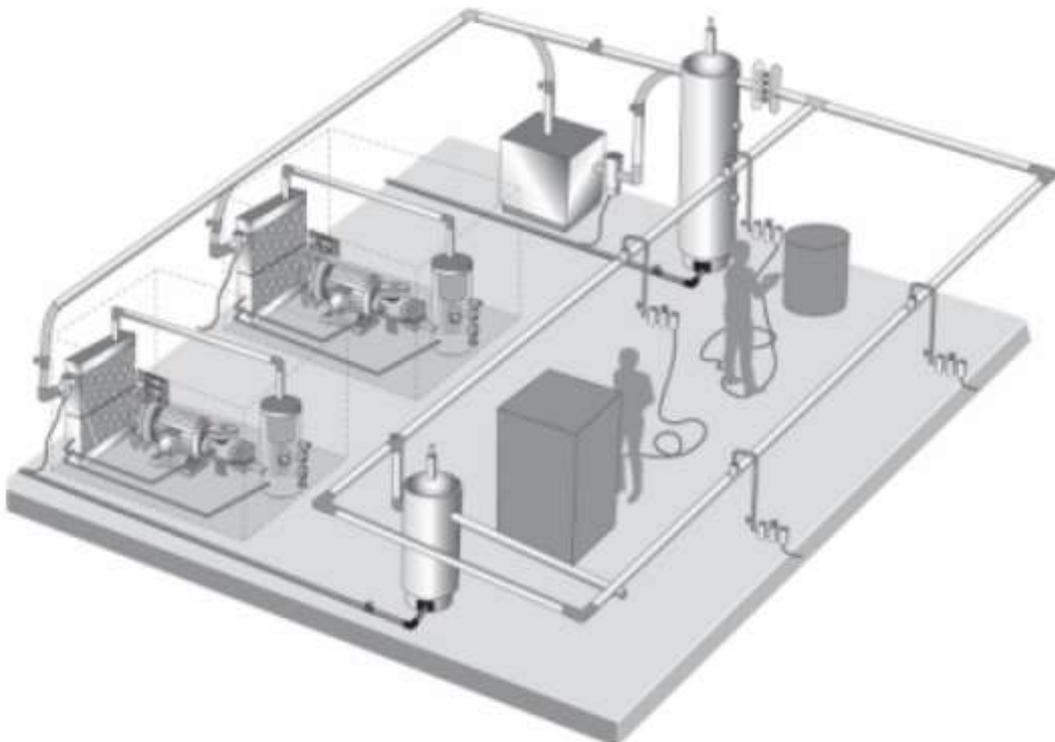


Schéma d'une installation d'air comprimé.

### 2.3.3. Consommation d'énergie

Celle-ci dépend de:

-  **Type de compresseur.** Il peut être à mouvement alternatif (compresseur à pistons), ou rotatif (turbocompresseur).
-  **Pertes par fuites d'air.** Dans les installations en bon état, les fuites représentent habituellement 2% à 5%, dans des installations plus anciennes, elles peuvent représenter 10%, et jusqu'à 25% dans le cas de mauvaise maintenance.
-  **Pertes de charge** diverses (aspiration et lignes d'alimentation). Le filtrage de l'air entrant, ou sortant du compresseur (séchage, déshuilage, etc...) peut aussi être à l'origine de pertes de charge importantes.
-  **Facteur de charge:** c'est le rapport entre le débit moyen d'utilisation d'air comprimé et le débit maximum que peut fournir le système à pleine charge. Il est idéalement de l'ordre de 50% à 80%.
-  **Type de compression:** la compression peut s'effectuer en une ou plusieurs étapes (étages de compression).

### 2.3.4. Mesures d'économie d'énergie dans les équipements d'air comprimé

Ci-dessous sont énumérées diverses mesures possibles pour améliorer l'efficacité d'une installation d'air comprimé.

-  **Remplacement du compresseur par un de meilleur rendement:** ce peut être un compresseur rotatif haute vitesse à paliers à lévitation magnétique, qui évite les pertes par frottement des pièces mobiles, ou encore un compresseur à plusieurs étages. Dans tous les cas, il faudra adapter le compresseur au plus près des besoins (pression, courbe de charge, etc...)  
*Economie d'énergie: jusqu'à 45%, en particulier à faible facteur de charge.*
-  **Aspirer l'air le plus froid et le plus sec possible,** de manière à améliorer le rendement du compresseur et à limiter les pertes par purge de la condensation.  
*Economie d'énergie: environ 5%.*
-  **Réduire la pression d'utilisation** à celle qui est juste nécessaire:  
*on gagne 5% d'énergie en passant de 7 à 6 bars*
-  **Utiliser des moteurs électriques à variation de vitesse.** Les variateurs permettent d'adapter la vitesse de rotation des compresseurs aux besoins réels, et de limiter le pic de courant au démarrage.  
*Economie d'énergie: jusqu'à 30%.*
-  **Adapter le volume de stockage:** Un volume plus grand de stockage réduit le nombre de cycles démarrage/arrêt du compresseur.  
*Economie d'énergie: jusqu'à 5%.*



### Installer un récupérateur de chaleur.

Une grande partie de l'énergie (de l'ordre de 90%) est transformée sous forme de chaleur lors de la compression. En installant un échangeur thermique, on peut en récupérer une bonne partie et l'utiliser dans des applications thermiques: chauffage, alimentation en air de chaudières, etc...

*Economie d'énergie: de l'ordre de 60% sous forme de chaleur.*

CYCLE	COMPRESSION	ABSORPTION
Energie consommée	Electrique	Thermique
Rendement énergétique	Elevé. Chaque kWh électrique peut produire jusqu'à 3kWh de froid.	Moyen. Chaque kWh de chaleur peut produire jusqu'à 1kWh de froid.
Applications	La majorité des installations de froid industriel.	Utilisé lorsqu'une source de chaleur résiduelle à température suffisante est disponible. Ce peut être de l'énergie solaire.

## 2.4. INSTALLATIONS DE FROID INDUSTRIEL

### 2.4.1. Concepts

Les technologies du froid ont de nombreuses applications dans l'industrie: elles sont utilisées pour neutraliser et éliminer de la chaleur, de la poussière, de la fumée, des vapeurs, de la condensation, des odeurs, etc... Une application importante est la conservation de la nourriture dans l'industrie alimentaire.

Tous les systèmes de réfrigération se basent sur des cycles thermodynamiques ou des processus physiques qui transfèrent de la chaleur entre une source à haute température et une source à basse température. Les principales méthodes de production de froid sont le cycle de compression et le cycle d'absorption.

Le tableau suivant compare ces deux types de machine à froid.

### 2.4.2. Mesures d'économie d'énergie



#### Remplacer ou renforcer l'isolation thermique.

C'est le facteur le plus important de la consommation énergétique d'une installation de froid. On emploiera des matériaux à basse conductivité thermique et en épaisseur suffisante, avec une enveloppe de surface la plus faible possible.

*Economie d'énergie: variable.*



#### Améliorer le système de compresseur.

Réduire la consommation du compresseur en le remplaçant par un compresseur plus performant, à plusieurs étages, ou encore à l'aide de systèmes à variation de vitesse.

*Economie d'énergie: jusqu'à 30%.*



**Produire du froid pendant la nuit.**

Permet de profiter des températures extérieures plus faibles, et de réduire la facture d'électricité en déplaçant la consommation vers les heures creuses.

*Economie d'énergie: variable.*



**Améliorer les conditions de fonctionnement.** Revoir l'isolation des tubes et des équipements, maintenir propres les condenseurs, évaporateurs et les éventuels filtres, réparer les éventuelles fuites.

*Economie d'énergie: variable.*



**Installer un système de régulation et de gestion** qui optimise et automatise le réglage des installations.

*Economie d'énergie: variable.*



**Remplacer le système à compresseur par un système à absorption.** Le rendement est moindre que celui d'un système à compression, mais s'il existe une source de chaleur résiduelle, son énergie autrement perdue peut être utilisée pour produire du froid.

*Economie d'énergie: variable.*

## 2.5. UTILISATION DE LA VAPEUR

### 2.5.1. Concepts

La vapeur industrielle est produite à partir de l'énergie électrique ou d'un combustible, à des pressions supérieures à la pression atmosphérique. Elle est utilisée dans de nombreuses applications et procédés industriels tels que la production de chaleur ou de mouvement des machines, et dans presque toutes les unités de procédés chimiques.

Un système de génération de vapeur comprend une chaudière, dans laquelle l'énergie est fournie généralement par un procédé de combustion, et un système de distribution de la vapeur et de retour des condensats.

### 2.5.2. Consommation d'énergie

La consommation d'un système utilisant de la vapeur se mesure par la quantité de combustible utilisé:



**Pertes dans les fumées:** dans des installations conventionnelles, et selon la température des gaz, ces pertes peuvent être limitées à 7%



**Pertes par radiation et conduction:** elles dépendent de la température de travail et de l'isolation des équipements et sont en général de 3% à 5%.



**Pertes par imbrûlés:** résultant d'une combustion incomplète du carburant gazeux ou liquide.



**Pertes par purges:** les purges permettent d'évacuer les condensats mais sont à l'origine de pertes si ceux-ci ne sont pas correctement recyclés.

### 2.5.3. Mesures d'économie d'énergie



**Montrer des échangeurs de chaleur qui améliorent le rendement.** On peut installer des économiseurs, qui préchauffent l'eau avant de l'envoyer dans la chaudière, par exemple en récupérant une partie de la chaleur des fumées.

*Economie d'énergie: entre 1% et 5%.*



**Remplacer la chaudière conventionnelle par une chaudière à condensation.** Ceci permet de récupérer la chaleur latente de vaporisation de l'eau perdue autrement sous forme de vapeur dans les fumées.

*Economie d'énergie: jusqu'à 20%.*



**Réduire les pertes de chaleur dans les gaz de combustion.** Le rendement s'améliore de 1% si l'on supprime un excès d'air de 15%, ou si l'on diminue la température des gaz de combustion de 4,5°C.

*Economie d'énergie: entre 1% et 3%.*



**Planter de la maintenance préventive et un système de régulation.** Le traitement préalable de l'eau d'alimentation des chaudières permet d'éviter des dépôts solides qui peuvent réduire les rendements.

*Economie d'énergie: entre 10% et 12%.*



**Améliorer le réseau de distribution.** Isoler correctement les conduits de distribution avec des matériaux adéquats et d'épaisseur suffisante.

*Economie d'énergie: entre 3% et 13%.*

## 2.6. MOTEURS ELECTRIQUES

### 2.6.1. Concepts

Les moteurs électriques servent à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique (sous forme de mouvement).

Les moteurs électriques les plus utilisés sont les moteurs à courant alternatif **asynchrones**, dont le rotor tourne à une vitesse légèrement inférieure à celle du synchronisme. Les variateurs électroniques actuels permettent de faire varier la vitesse de ces moteurs.

Dans les moteurs **synchrones**, le rotor tourne en synchronisme avec la fréquence d'alimentation des enroulements fixes (stator). Ils sont habituellement employés dans les machines où une vitesse constante est nécessaire (ex: machine-outil). Les variateurs électroniques actuels permettent de faire varier la vitesse de ces moteurs.

Les moteurs électriques peuvent présenter des pics de consommation, de l'ordre de 4 fois leur puissance nominale, en particulier lors des phases de démarrage. Des dispositifs électroniques peuvent limiter ces appels de courants.

Les moteurs électriques consomment souvent de la puissance réactive, à cause de la présence d'enroulements inductifs. Ce phénomène est particulièrement sensible à faible charge.

### 2.6.1. Mesures d'économie d'énergie



**Régulation de vitesse.** Le montage de variateurs de vitesse (ou de fréquence) permet de modifier la vitesse du moteur, ou encore d'offrir différentes courbes de charge. Ceci permet de faire des économies d'énergie importantes lorsque le moteur fonctionne à charge partielle.

*Economie d'énergie: jusqu'à 40%.*



**Adaptation des moteurs aux besoins.**

Un dimensionnement correct du moteur lui permettra de fonctionner dans sa meilleure zone de rendement.

*Economie d'énergie: variable.*



**Remplacement des moteurs par des moteurs plus performants.** Les moteurs modernes ont un meilleur rendement. On peut aussi choisir des moteurs de haut de gamme à rendement amélioré.

*Economie d'énergie: variable.*

## 2.7. EQUIPEMENTS DE BUREAUTIQUE

### 2.7.1. Concepts

Le matériel de bureautique comprend tous les éléments (ordinateurs, imprimantes, modems, etc) qui sont utilisés pour les activités de gestion dans une entreprise ou un environnement de travail, les loisirs ou la communication dans les ménages.

La consommation de ces appareils n'est pas constante: par exemple, un ordinateur non utilisé qui se trouve en mode veille consomme 85% moins d'énergie que lorsqu'il est utilisé.

### 2.7.1. Mesures d'économie d'énergie



**Ordinateurs portables.** Un ordinateur portable consomme nettement moins qu'un ordinateur de bureau, pouvant réduire de moitié la consommation à performances identiques.

*Economie d'énergie: de l'ordre de 50%.*



**Ecrans LCD ou LED.** Ces écrans consomment peu d'énergie et offrent une meilleure résolution que les écrans cathodiques (CRT).

*Economie d'énergie: entre 40% et 50%.*



**Multiprises coupe veille.** Elles permettent de couper totalement l'alimentation des appareils. Certaines le détectent et le font automatiquement. Cette mesure peut être appliquée pour un appareil individuel, ou un ensemble d'appareils (chaîne HIFI-TV).

*Economie d'énergie: variable.*



**Eteindre les équipements.** Eteindre totalement les équipements lorsque ceux-ci ne sont pas utilisés.

*Economie d'énergie: variable*

## 2.8. COMPENSATION DE PUISSANCE REACTIVE

### 2.8.1. Concept

La puissance consommée par un récepteur électrique alimenté en courant alternatif peut présenter deux composantes:



**Active:** c'est la puissance qui génère réellement un travail ou de la chaleur dans le récepteur



**Réactive:** cette "puissance" apparaît lorsqu'il y a un déphasage entre le courant et la tension, en général dû à la présence d'éléments inductifs (comme les enroulements des moteurs ou transformateurs), ou capacitifs. Elle ne génère aucun travail au niveau du récepteur, mais provoque néanmoins des pertes et des échauffements inutiles dans les conducteurs électriques. C'est pour cela qu'il faut essayer de l'éviter, ou à défaut la compenser.

### 2.8.2. Mesures d'économie d'énergie

On peut utiliser des batteries de condensateurs pour compenser la puissance réactive d'une installation (dans le cas habituel de puissance réactive inductive).

L'intérêt de la compensation réside dans:



La réduction des pénalités appliquées par les compagnies électriques pour la consommation de puissance réactive.



La réduction des chutes de tension sur les lignes d'alimentation dues au transport de puissance réactive.



L'usage de conducteurs de sections plus petites lors de la conception d'un projet.



La diminution des pertes par effet Joule (échauffement) dans les conducteurs et transformateurs



L'augmentation de la puissance disponible dans une installation, grâce à la réduction des intensités.

## 2.9. ELECTROMENAGER

### 2.9.1. Concepts

Sera traité essentiellement le gros électroménager (secteur blanc) qui est représenté une part importante de la consommation domestique et du secteur hôtelier. Pour l'électroménager du secteur marron, on peut se reporter au matériel de bureautique.

L'usage du gaz reste courant en ce qui concerne les appareils de cuisson, ce qui n'est pas le cas pour le reste du gros électroménager qui utilise de l'énergie électrique. La consommation de ces appareils dépend de leur capacité, des températures de travail, des vitesses de rotation, etc...

### 2.9.2. Réfrigérateur

C'est l'un des appareils électroménagers qui consomme le plus d'électricité. Bien que sa puissance ne soit pas très élevée (de l'ordre de 200W), son fonctionnement durant une grande partie de temps en fait un grand consommateur.

Pour diminuer la consommation de cet appareil, on peut:

-  Choisir un appareil de classe A ou supérieure, et de capacité adaptée.
-  Placer l'appareil dans une zone fraîche et ventilée, éloignée des sources de chaleur.
-  Eliminer la glace ou le givre à l'intérieur qui empêche un bon refroidissement.
-  Vérifier la fermeture hermétique des portes afin d'éviter les pertes de froid.
-  Ajuster le thermostat pour maintenir une température de 5°C dans le réfrigérateur, et de -18°C dans le congélateur.

### 2.9.3. Machine à laver

Cet appareil représente souvent un gros poste de consommation dans les foyers, il est utilisé en moyenne entre 3 et 5 fois par semaine. La plus grande part de l'énergie consommée (de l'ordre de 80-85%) sert à chauffer l'eau.

Le lavage fait intervenir trois actions: chimique, mécanique et thermique. De ces deux dernières dépend la consommation énergétique.

Pour limiter la consommation d'une machine à laver, on peut:

-  Choisir un appareil de classe A ou supérieure, et l'utiliser de préférence à capacité maximale (remplir la machine).

-  Sélectionner tant que possible des programmes de lavage à basse température.
-  Essorer à plus grande vitesse permet d'économiser sur la consommation éventuelle d'un sèche-linge.
-  Si l'on dispose d'une tarification horaire, on peut choisir d'utiliser la machine de préférence durant les heures creuses.

### 2.9.4. Lave-vaisselle

La consommation de ces appareils sert à 90% à chauffer l'eau. Diverses études ont démontré qu'il est plus économe d'utiliser ces appareils que de laver à la main, autant pour la consommation d'énergie que pour la consommation d'eau.

Les modèles actuels sont très évolués, et entrent quasiment tous dans la classe de consommation énergétique A. Il existe aussi des lave-vaisselle à double alimentation qui permettent une alimentation directe en eau chaude sanitaire (provenant par exemple d'un chauffe-eau solaire).

Pour diminuer la consommation de cet appareil, on peut:

-  Choisir un appareil de classe A ou supérieure et ne le mettre en route que lorsqu'il est plein.
-  Choisir de préférence les programmes de lavage ECO ou à basse température.
-  Réaliser un bon entretien (vérifier et changer les filtres).

-  Maintenir les niveaux de sel et de produit de rinçage limite les consommations respectivement lors du lavage et lors du séchage.

### 2.9.5. Sèche-linge

C'est l'un des appareils qui consomme le plus. Son usage est de plus en plus répandu, car il est pratique. Cependant, il est recommandé de ne l'utiliser qu'en cas de nécessité lorsqu'il n'est pas possible de sécher le linge à l'extérieur.

Le processus de séchage peut se réaliser essentiellement de deux manières:

-  Extraction. L'air chaud et humide est expulsé à l'extérieur et remplacé par de l'air frais chauffé (**peu efficace**).
-  Condensation. L'air chaud et humide est recyclé et traverse un circuit où l'humidité est condensée et évacuée sous forme liquide (**efficace**).

Pour diminuer la consommation du sèche-linge, on peut:

-  Choisir un appareil de classe A ou supérieure et ne le faire travailler que lorsqu'il est plein.
-  Bien essorer le linge avant de le mettre à sécher.
-  Mettre à sécher des tissu de même type, ils termineront de sécher en même temps.

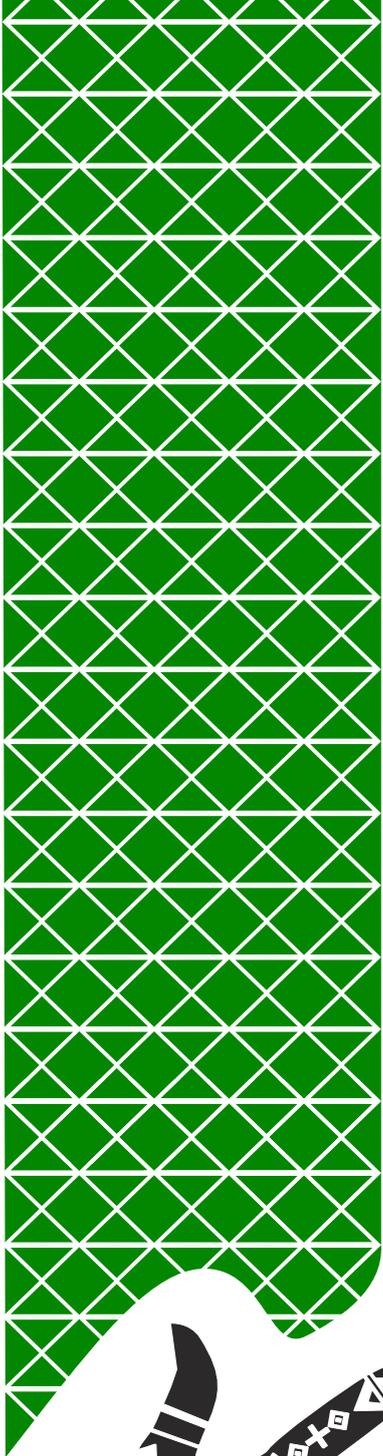
-  Un sèche linge à capteur d'humidité s'arrêtera dès que le linge est sec et ne gaspillera pas d'électricité.

### 2.9.6. Four

Il existe actuellement deux types de fours: ceux à gaz et les fours électriques, les premiers étant les plus économiques, bien que les fours électriques soient très répandus.

Pour diminuer la consommation de cet appareil, on peut:

-  Choisir tant que possible un four à gaz ou sinon un four électrique de classe A.
-  Lors de la cuisson, éviter d'ouvrir la porte du four, car à chaque fois, c'est environ 20% de l'énergie accumulée à l'intérieur qui est perdue.
-  Essayer de remplir le four à chaque utilisation.
-  Eteindre le four un peu avant la fin de la cuisson car la chaleur résiduelle peut suffire à terminer la cuisson.



## CHAPITRE III: ENERGIE EOLIENNE

## Chapitre III: ENERGIE EOLIENNE

**OBJET:** Ce bloc développe en détail les aspects les plus importants de l'énergie éolienne, depuis les bases physiques jusqu'aux technologies utilisées, les applications, le calcul de la production, etc..

L'étudiant devra être en mesure d'évaluer et d'exploiter la ressource éolienne disponible.

Des exercices théoriques et pratiques sont proposés pour renforcer les concepts expliqués.

### 1. HISTORIQUE

L'utilisation de l'énergie éolienne date d'au moins 5.000 ans, lorsque les égyptiens ont construit les premiers navires à voile, pour naviguer d'abord sur le Nil, puis plus tard sur la mer Méditerranée.

L'évolution de l'énergie éolienne à partir de cette époque peut se résumer ainsi:



**XVIII<sup>e</sup> SIECLE.** Les premiers moulins à vent apparaissent: ce sont les moulins typiques de La Mancha (ceux de Don Quichotte), utilisés principalement pour moulinier du grain, ou encore leur variante hollandaise qui servait à pomper de l'eau.



**XX<sup>e</sup> SIECLE.** Le moulin à vent évolue vers le modèle américain multipale, utilisé pour pomper de l'eau à faible profondeur



**1945. La seconde guerre mondiale** marque le temps du boom pétrolier et des moteurs thermiques, au détriment des autres formes d'énergie.



Source: Freedigitalphotos.net



**1970. La première crise pétrolière** amène à repenser le modèle énergétique, entraînant la prolifération des éoliennes multipales américaines.



**1980 – 1990.** La pollution de l'environnement commence à être considérée, et l'Europe et les Etats-Unis commencent à promouvoir l'énergie éolienne.



**1990 – 2000.** La production d'électricité d'origine éolienne à grande échelle est devenue une réalité, et la pénurie de pétrole résultant de la guerre du Golfe favorise en grande partie la recherche et le développement de cette technologie.

## 2. ORIGINE DU VENT

On estime qu'environ 1% à 2% de l'énergie provenant du soleil est transformée en énergie éolienne.

### 2.1. ORIGINE DU VENT

L'apparition du vent est une conséquence de l'échauffement inégal de diverses zones de la surface et de l'atmosphère terrestre, qui induit la mise en déplacement de masses d'air. Ce réchauffement différentiel est dû à divers facteurs comme les saisons, les cycles jour-nuit, la répartition des continents et des océans, etc...

L'air chaud étant plus léger (de densité inférieure due à l'agitation des molécules), il a tendance à s'élever et à laisser la place à de l'air plus frais. Ces mouvements verticaux dits de convection génèrent des courants d'air horizontaux à plus ou moins grande échelle sur le globe terrestre.



Formation des cellules convectives sur la planète  
Source: windpower.org

A grande échelle, il existe une série de vents dominants qui circulent en dessous de la couche stratosphérique. Cette **circulation atmosphérique** résulte des variations de température et de pression, mais aussi d'autres facteurs, comme la force de Coriolis et l'humidité.

*Les vents de l'hémisphère Nord tournent dans le sens des aiguilles d'une montre autour des zones de hautes pressions (anticyclones), et dans le sens inverse autour des zones de basse pression (dépressions). Ces sens de rotation sont inversés dans l'hémisphère Sud.*

Dans chaque hémisphère on trouve deux ceintures de vents prédominants. Celle des **alizés** aux basses latitudes les vents alizés, et une autre dans les latitudes supérieures à 40°.

Le soleil réchauffe plus l'équateur que le reste de la planète, et engendre des différences de température qui initient la circulation des masses d'air (de l'équateur aux pôles en surface). Les **vents géostrophiques** en résultent, à l'échelle planétaire (ou synoptique), au-dessus de la zone de frottement qui est de l'ordre de 1000m d'épaisseur.

L'équateur est une zone de faible circulation horizontale de l'air, appelée *pot au noir* par les marins.

### 2.2. VENTS A L'ECHELLE LOCALE

En outre, à proximité de la surface terrestre, des vents plus spécifiques soufflent localement, influencés par le relief ou d'autres caractéristiques du terrain. On parle alors de **vents locaux**, ou de surface, pour des altitudes en dessous de 100 mètres.

Ces vents dépendent en particulier des facteurs suivants:

-  La différence d'échauffement selon le type de surface est à l'origine des brises de mer, de vallée, de montagne, etc...
-  Les obstacles géographiques modifient la circulation et sont à l'origine de l'apparition de vents régionaux ou locaux.
-  Sur les côtes, le contraste thermique surface terrestre-plan d'eau peut générer des brises de mer (ou de lac) et de terre.
-  Les détroits entre différentes mers sont des goulets d'étranglement où les vents confluent et se renforcent.
-  Les vallées profondes orientent les déplacements de l'air selon l'axe de la vallée.

### 2.3. INTERACTION DU VENT AVEC LA SURFACE

A proximité immédiate de la surface, le vent est freiné, et sa trajectoire est modifiée par l'interaction avec le terrain et les obstacles.

**La rugosité** du terrain engendre un frottement qui freine le vent. Ceci est à l'origine de la variation de la vitesse du vent avec l'altitude.

Par ailleurs, la présence d'obstacles génère des turbulences qui gênent l'exploitation du vent dans leur sillage.

-  Les surfaces très rugueuses, comme les villes ou les forêts, causent de nombreuses turbulences et freinent fortement le vent. Des surfaces lisses comme celle de la mer freinent moins le déplacement de l'air, et les vents y sont plus forts et réguliers.

La formule suivante donne une valeur approchée de la vitesse du vent en fonction de la hauteur au-dessus du sol:

$$V(h) = V_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha$$

V(h) = Vitesse du vent à la hauteur h au-dessus du sol

V<sub>0</sub> = Vitesse du vent connue à la hauteur h<sub>0</sub>

h = Hauteur à laquelle on veut estimer la vent

h<sub>0</sub> = hauteur de référence

α = valeur qui représente la rugosité du site



#### Valeur approchée de α pour différents types de paysage

Lisse (mer, neige, sable)	0,10 – 0,13
Rugosité modérée (herbe, prés, cultures)	0,13 – 0,20
Rugueux (forêts, zones construites)	0,20 – 0,27
Très rugueux (villes, immeubles)	0,27 – 0,40

### 3. MESURE DU VENT

Pour caractériser le vent sur un site donné, il faudra s'intéresser à la fois aux vents géostrophiques et aux vents locaux, l'un ou l'autre pouvant prédominer suivant les circonstances.

Les valeurs mesurables qui caractérisent le vent à un endroit donné sont l'intensité (la vitesse) et la direction.



On mesure la vitesse du vent avec un **anémomètre**. Il en existe de différents types, utilisant des principes de mesure physique différents.

- ✓ Rotatifs: à coupelles, à hélices, ou à gouttière.
- ✓ De pression: tube de Pitot, à dépression, etc...
- ✓ Autres: à fil chaud, ultrasons, ballons sonde, etc...

Les plus courants sont les anémomètres à coupelles.



Source: Wikipedia



Pour la mesure de la direction du vent, on utilise des girouettes, qui s'orientent en permanence en fonction de la direction de celui-ci.



Source: Wikipedia.

Les mesures de l'anémomètre ou de la girouette, peuvent être transmises de manière mécanique ou électrique à un panneau indicateur, ou à un enregistreur, etc... pour visualisation et exploitation des données.

**La précision des mesures est primordiale,** une erreur de mesure de 10% sur la vitesse du vent, correspond à une erreur de l'ordre de 30% sur la production d'énergie.

L'exploitation des variables enregistrées permet d'élaborer les résultats suivants:



La vitesse moyenne du vent, et sa répartition de probabilité.



La répartition de probabilité de sa direction.



La variation du vent en fonction de l'altitude et de l'emplacement, les statistiques concernant les rafales et les vents extrêmes.

## TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES

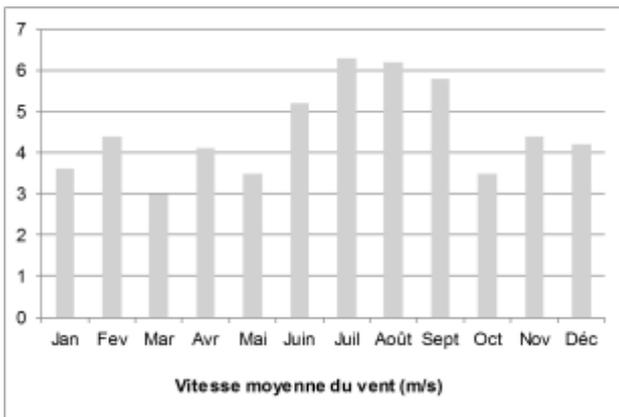
Les données contenues dans les enregistrements peuvent être soumises à une étude statistique qui améliore l'analyse et la compréhension du comportement du vent sur le site étudié.

Citons ci-dessous les outils les plus couramment utilisés:



### Distributions temporelles.

Elles représentent l'évolution de la valeur de la vitesse moyenne du vent sur un intervalle de temps spécifique. Cet intervalle peut aller de 24 heures (représentant les moyennes horaires), à un an (représentant les moyennes mensuelles).



Distribution temporelle des moyennes mensuelles de vitesse du vent. Source personnelle



### Histogramme de vitesses du vent.

Ce type de diagramme représente le pourcentage de temps pendant lequel la vitesse du vent se trouve dans un intervalle donné, pour des enregistrements effectués sur une période donnée, qui peut être mensuelle, annuelle, etc...

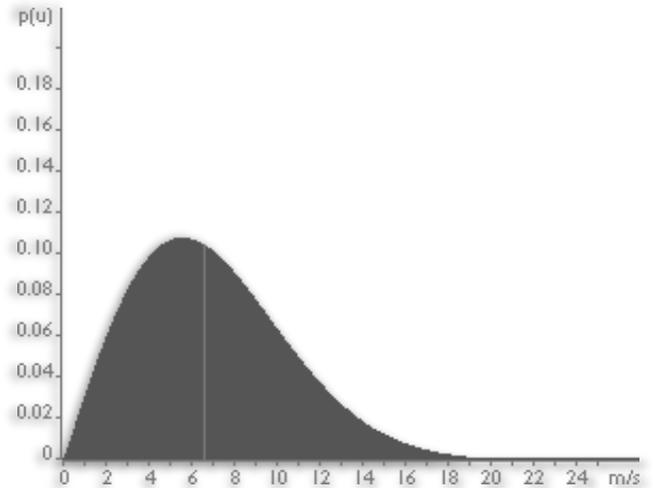


### Courbe de densité de probabilité.

Habituellement, sur un site donné, les tempêtes de vent extrêmes sont peu fréquentes, alors que les vents moyens et faibles sont fréquents.

La **loi de Weibull** est couramment utilisée pour représenter par une courbe continue la densité de probabilité de la vitesse du vent. Cette courbe théorique représente en général assez bien la forme de l'histogramme précédent, lorsque les intervalles de vitesses de vent deviennent très fins.

L'aspect des courbes de densité de probabilité n'est en général pas symétrique. Le pic qu'elles présentent est d'autant plus étroit que le vent sur le site souffle de manière régulière et constante. Au contraire, il s'élargit pour des sites où le vent souffle avec plus de variabilité.

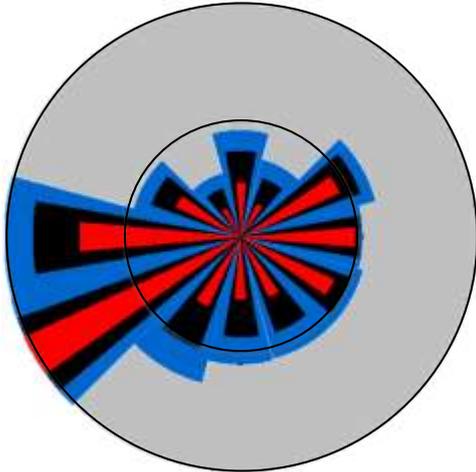


Distribution type de Weibull  
Source personnelle



## Rose des vents.

La représentation graphique de la distribution des directions et des vitesses de vent correspondantes peut se faire sur une rose des vents.



Exemple de rose des vents.  
Source personnelle

L'exemple de rose des vents ci-dessus a été tracé de la manière suivante:

- ✓ Le disque est ici divisé en 12 secteurs de 30° (bien qu'en général on choisisse plutôt 8 ou 16 secteurs).
- ✓ Le secteur externe de couleur bleue nous indique la fréquence (en %) avec laquelle le vent souffle dans cette direction.
- ✓ Le 2ème secteur de couleur noire, indique la contribution de cette direction à la vitesse moyenne.
- ✓ Le secteur interne, de couleur rouge, nous donne l'information de la contribution de cette direction à l'énergie contenue par le vent. C'est cette information qui est la plus intéressante.

Pour élaborer une telle rose des vents, il faut disposer de données météorologiques enregistrées sur au moins une année.

Malgré cela, il peut y avoir des variations d'une année à l'autre, entre autres sur le contenu énergétique du vent. C'est pourquoi il est conseillé d'utiliser des enregistrements météorologiques sur des périodes de plusieurs années.

### Tous les vents n'ont pas le potentiel suffisant pour générer facilement de l'énergie.

Normalement, pour qu'un aérogénérateur puisse fournir de l'énergie, les vents doivent être dans une fourchette habituellement comprise entre 4 m/s et 25m/s.



Source personnelle

## 4. ENERGIE DISPONIBLE DANS LE VENT

L'air en mouvement contient de l'énergie cinétique, qu'une éolienne transforme en énergie mécanique. L'aérogénérateur est un cas particulier d'éolienne qui transforme cette énergie mécanique en énergie électrique.



Le vent, par la force qu'il génère sur les pales d'un rotor, et le mouvement de ce dernier, génère un travail mécanique sur l'axe de rotation. Cet axe entraîne à son tour un générateur électrique qui transformera le travail mécanique en énergie électrique.

La puissance que pourrait développer le vent en passant à travers la surface balayée par un rotor d'éolienne dépend de trois paramètres

### 4.1. LA VITESSE DU VENT INCIDENT

Il s'agit du facteur principal: la puissance cinétique du vent augmente proportionnellement au cube de sa vitesse.

### 4.2. LA DENSITE DE L'AIR

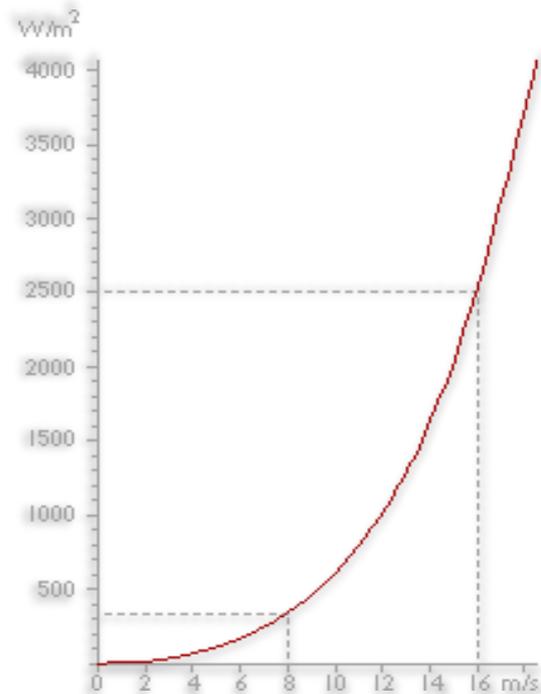
La puissance que l'on peut extraire du vent augmente de manière proportionnelle avec la densité de l'air, laquelle dépend principalement de la température et de la pression atmosphérique:



Toutes conditions égales par ailleurs, lorsque l'air se refroidit, il devient plus dense, et transfère plus de puissance à l'aérogénérateur.



Au contraire, lorsque l'air s'échauffe, ou encore à une altitude plus élevée, l'air est moins dense et la puissance récupérable sera moindre.



Représentation de la puissance cinétique contenue dans le vent en fonction de la vitesse

### 4.3. LA SURFACE BALAYEE PAR LE ROTOR

Une éolienne plus grande sera capable de capturer plus d'air en mouvement et donc d'énergie cinétique.

Sachant que la surface du rotor augmente avec le carré de son diamètre, une éolienne deux fois plus grande recevra une puissance  $2^2 = 2 \times 2 =$  quatre fois plus forte (ceci sera développé plus tard).

#### 4.4. EFFET DE SILLAGE

L'effet de sillage résulte de l'interaction de l'air avec les pales de l'éolienne. Logiquement, l'air contient moins d'énergie après avoir traversé l'éolienne qu'auparavant, une partie de celle-ci ayant été utilisée pour produire de l'électricité. (N'oublions pas la loi de conservation de l'énergie):

*“L'énergie ne se perd pas, elle ne se crée pas, elle se transforme”*

Sous le vent (à l'arrière) d'une éolienne, se trouve le sillage de celle-ci, qui est une zone allongée dans laquelle on trouvera un vent à la fois ralenti et turbulent en comparaison avec l'air qui arrive sur le rotor.

Lors de la création de ce sillage, le débit d'air qui abandonne l'éolienne devant être le même que celui qui entre, et l'air se comportant à ces vitesses comme un fluide incompressible, la seule solution pour que la vitesse diminue à la sortie de l'éolienne

est que la section de l'air sortant augmente par rapport à la section de l'air entrant.

Dans tous les cas, la formule suivante doit être vérifiée:  $V_1 * S_1 = V_2 * S_2$



Représentation de l'augmentation de section de l'air qui traverse une éolienne. Source: windpower.org

Cette augmentation de la section du flux d'air, ajouté au mouvement de rotation induit par les pales, participent à la création de turbulences sous le vent de l'éolienne.



Visualisation par condensation des sillages dans un parc éolien offshore. Source: Wikipedia

#### 4.5. LIMITATIONS DU RENDEMENT

L'énergie cinétique contenue par le vent est importante, mais ne peut pas être récupérée à 100% par les aérogénérateurs:



Tout d'abord, la récupération totale de l'énergie cinétique impliquerait que l'air soit complètement arrêté par l'éolienne, ce qui empêcherait le vent de la traverser et donc de l'actionner. Un calcul théorique montre que la transformation maximale de l'énergie cinétique en énergie mécanique est de  $16/27$ , soit environ 59%, ceci constitue la **limite de Betz**.



D'autre part, chaque transformation implique des pertes. Le rendement global résulte des pertes de transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique pour un aérogénérateur.

#### Pertes

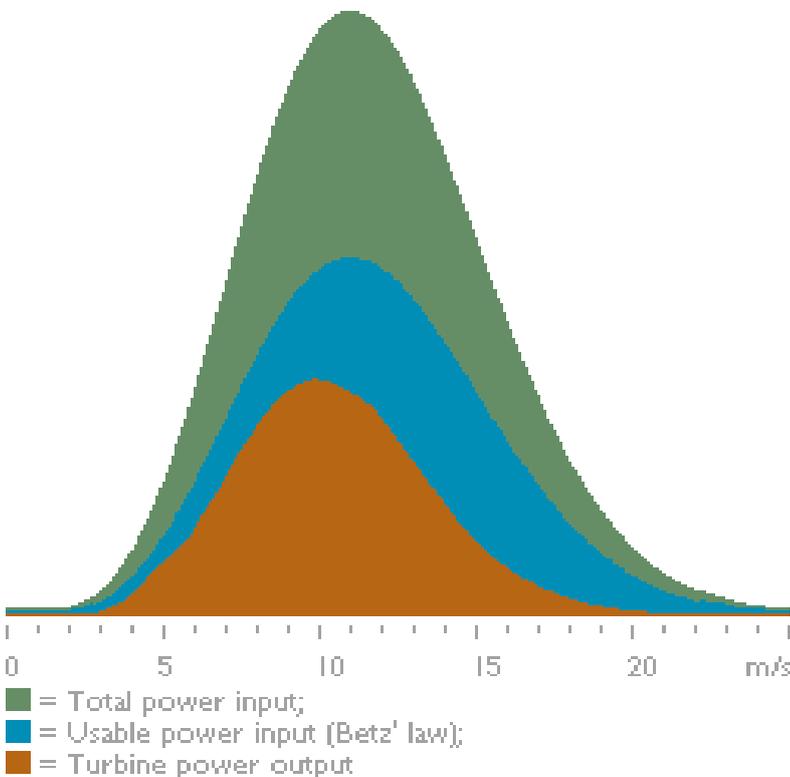
Avec les technologies actuelles, l'énergie récupérable par un aérogénérateur est de l'ordre de 40% de l'énergie incidente.

Ce rendement est élevé (comparé à celui de centrales thermiques), et montre que l'on peut extraire une bonne partie de l'énergie du vent, cependant, on se rapproche de la limite de Betz.



Enfin, la majeure partie de l'énergie du vent correspond à des vitesses supérieures à sa vitesse moyenne (nous avons vu comment la puissance incidente augmente avec le cube de la vitesse –c'est à dire beaucoup plus rapidement-).

En dessous de la **vitesse de démarrage** d'un aérogénérateur, celui-ci ne pourra pas extraire le peu d'énergie disponible. De la même manière, il y a une **vitesse de coupure**, de l'ordre de 25m/s, au-dessus de laquelle l'aérogénérateur doit être arrêté sous peine de dégâts. Dans tous les cas, l'énergie non récupérée reste faible si l'aérogénérateur est bien dimensionné



Représentation de l'énergie disponible en fonction de la vitesse du vent faisant apparaître la limite de Betz et la puissance électrique de sortie d'une machine actuelle.  
Source personnelle



L'un des obstacles principaux de l'énergie éolienne est lié à sa variabilité. Ceci complique l'intégration au réseau électrique de puissances d'origine éolienne importantes. Les fluctuations de production peuvent en effet affecter le maintien de l'équilibre offre/demande, et mettre en péril la stabilité et la qualité de fourniture du réseau.

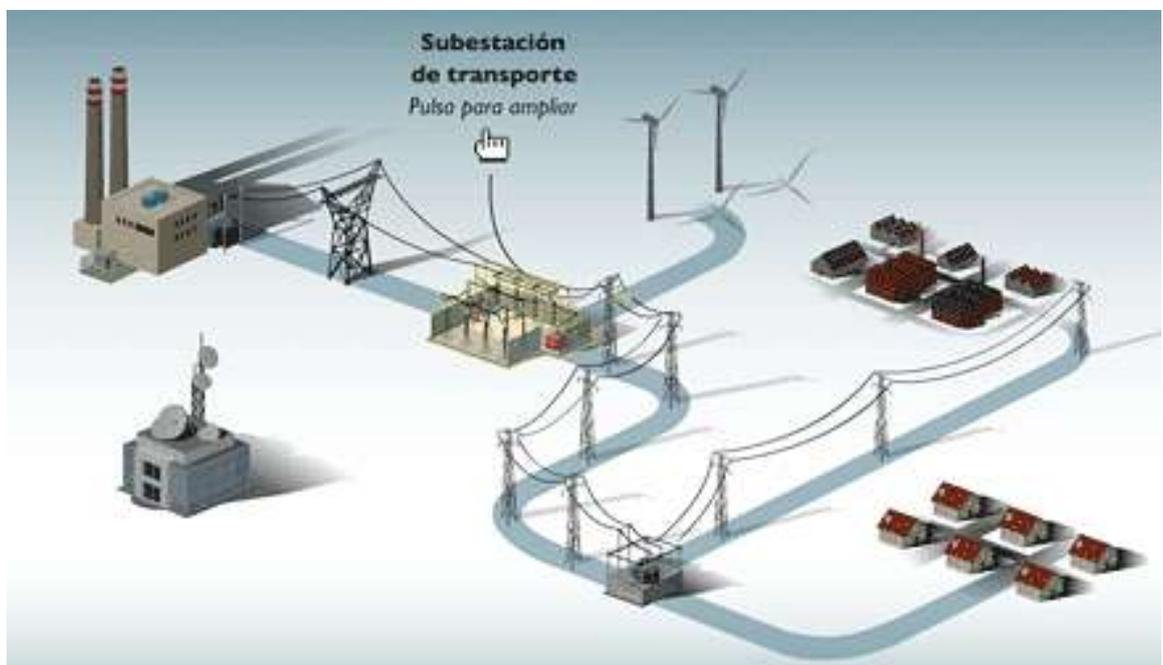
Les méthodes de contrôle font appel essentiellement à la prévision météorologique, et aux centres de contrôle associés aux parcs éoliens. De cette manière, la prévision de production à court terme peut être connue pour aider au besoin à gérer les excédents.

Le centre de contrôle permet de réduire, ou même d'arrêter la puissance de production d'un parc éolien. Dans le futur, avec des infrastructures adéquates, il pourra rediriger ces excédents vers des systèmes de stockage de l'énergie.

#### Fonctionnement d'un réseau électrique:

Dans tout réseau électrique, il faut maintenir en permanence une puissance de production proche de la demande de consommation. Cette condition est primordiale pour garantir la fourniture d'électricité.

En conséquence, les sources d'énergie renouvelables, dont la puissance de production est difficilement gérable, ne peuvent représenter une proportion trop forte du système de production. Ce facteur est encore plus limitant dans le cas d'un réseau isolé ou de petite taille.



Représentation du réseau électrique. Source: Red Eléctrica de España.  
(Subestación de transporte – Poste de transformation)

## 5. CARACTERISATION ET CHOIX D'UN AEROGENERATEUR

Les graphiques suivants montrent les valeurs correspondantes de la courbe de puissance et du coefficient de puissance  $C_p$  d'un aérogénérateur typique. Les paramètres suivants correspondent aux caractéristiques de celui-ci:



**Vitesse de démarrage.** Cet aérogénérateur commence à produire pour une vitesse de vent de 3m/s. Il fournit alors une puissance de 18kW pour un  $C_p$  de 0,27.



**Rendement maximum.** Le rendement maximum est obtenu pour une vitesse de vent de 9m/s. Il génère alors 892 kW avec un  $C_p$  de 0,50.



**Fourchette de puissance nominale.** C'est la gamme de vitesses de vent dans laquelle est générée la puissance maximale. Entre 16 m/s et 24 m/s, la puissance générée est de 2310 kW, avec des valeurs de  $C_p$  allant de 0,23 à 0,07.



**Vitesse maximum.** C'est la vitesse maximum de vent à laquelle peut opérer l'aérogénérateur. Au delà de cette vitesse, les systèmes de protection entrent en jeu pour l'arrêter.

**Important:** Bien que le  $C_p$  maximum (0,50) soit obtenu à 9 m/s, cette vitesse de vent est inférieure à celle de la puissance nominale. La conception de l'aérogénérateur fait que son rendement diminue progressivement au delà de 9 m/s. Néanmoins, la puissance de l'aérogénérateur continue à augmenter avec la vitesse du vent, jusqu'à sa puissance maximale, et c'est ce qui nous intéresse.

La puissance nominale est souvent utilisée pour classer des aérogénérateurs, mais ceci est de peu d'utilité si nous voulons comparer des éoliennes de puissance similaires, car ceci ne donne aucune information sur la puissance recueillie pour la

### Caractérisation d'un aérogénérateur.

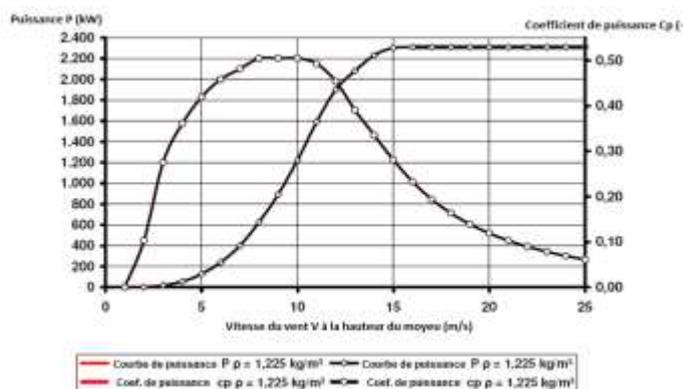
Le **coefficient de puissance** ( $C_p$ ) nous renseigne sur le rendement de l'aérogénérateur. C'est le rapport de la puissance électrique disponible par la puissance éolienne incidente.

- ✓ Sa valeur maximale théorique est donnée par la limite de Betz, 59%, et dépend des rendements de tous les éléments de la chaîne de conversion énergétique de l'aérogénérateur.

La **courbe de puissance** nous donne la puissance électrique de sortie en fonction de

gamme de vitesses de vent envisagée. **Nous utiliserons dans tous les cas la courbe de puissance.**

Densité standard de l'air, $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$		
Vitesse du vent (m/s)	Puissance P (kW)	Coef. De puissance $C_p$
1	0,0	0,00
2	2,0	0,10
3	18,0	0,27
4	56,0	0,36
5	127,0	0,42
6	240,0	0,46
7	400,0	0,48
8	626,0	0,50
9	892,0	0,50
10	1223,0	0,50
11	1590,0	0,49
12	1900,0	0,45
13	2080,0	0,39
14	2230,0	0,34
15	2300,0	0,28
16	2310,0	0,23
17	2310,0	0,19
18	2310,0	0,16
19	2310,0	0,14
20	2310,0	0,12
21	2310,0	0,10
22	2310,0	0,09
23	2310,0	0,08
24	2310,0	0,07
25	2310,0	0,06



Représentation de la courbe de puissance et du coefficient de puissance d'un aérogénérateur. Source personnelle



On calculera ensuite pour chaque vitesse de vent la puissance extraite pour chaque modèle, en utilisant leur courbe caractéristique de puissance.



Enfin, il restera à en déduire l'énergie extraite sur une période donnée (mois ou année) en sommant pour l'ensemble des vitesses de vent possibles l'énergie correspondante: cela revient à multiplier la puissance obtenue pour chacune des vitesses de vent, par le nombre d'heures où souffle ce vent pendant cette période, puis à sommer toutes les énergies correspondantes.

Pour une étude plus fine, on peut utiliser des programmes qui permettent d'exploiter les données en réalisant les calculs pour des tranches de vitesse de vent de 0,1 m/s.

Pour choisir un aérogénérateur, il est essentiel de connaître suffisamment les caractéristiques du vent sur le site d'implantation. L'objectif est de récupérer le maximum d'énergie possible compte tenu de la distribution des vitesses de vent sur ce site. Soit, en simplifiant:



Tout d'abord, on analysera les données mensuelles du site, en intensité et en direction (rose des vents). Ceci revient à calculer le potentiel éolien pour chaque mois, et pour chacune des directions principales. On s'intéressera particulièrement aux mois qui présentent le meilleur potentiel, et à l'orientation des vents correspondants.



Pour la gamme d'aérogénérateurs initialement présélectionnée, nous étudierons les vitesses de vents disponibles à hauteur du rotor de chacun d'entre eux. Ce calcul sera fait pour chaque mois et chacune des hauteurs de rotor.

Ce serait une **ERREUR** de considérer que l'on peut s'affranchir de la distribution des vitesses de vent (courbe de Weibull), en se basant seulement sur les vitesses moyennes pour faire les calculs de puissance, puis d'énergie.

**Il faut absolument considérer la puissance que nous donne chaque vitesse de vent pour l'aérogénérateur donné, et le pondérer par la probabilité d'occurrence de ce vent**



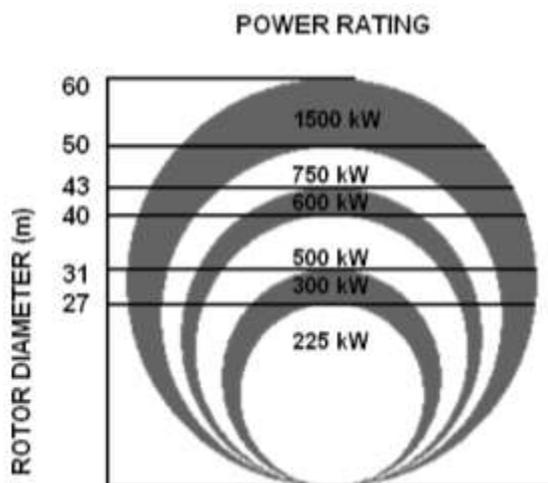
Bien que ceci nous permette d'ores et déjà de savoir quel est l'aérogénérateur le plus productif sur notre site, ceci n'est encore qu'une partie de l'étude, car il nous reste à analyser les aspects économiques, liés essentiellement au coût de chaque aérogénérateur.

Le meilleur choix ne sera pas nécessairement la machine qui offre la meilleure production annuelle, sinon celle qui offrira le meilleur rapport kWh/prix.

## 6. DIMENSIONS DE L'AÉROGÉNÉRATEUR

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 4 en étudiant la puissance disponible dans le vent, l'un des facteurs essentiels est la surface balayée par le rotor, qui dépend de la taille de l'aérogénérateur. La puissance disponible est directement proportionnelle à la surface balayée, mais l'augmentation de l'altitude du rotor permet aussi d'atteindre des vents plus forts et moins turbulents.

Le graphique suivant présente les puissances en fonction du diamètre du rotor.



Evolution de la puissance en fonction du diamètre du rotor.  
(Rotor Diameter - Diamètre du Rotor ;  
Power Rating – Puissance Nominale)  
Source personnelle.

Cependant, on ne sélectionnera pas toujours la machine la plus grande. Citons ci-dessous certains aspects qui peuvent influencer sur les critères de choix.



En faveur des grands aérogénérateurs.

- ✓ Les économies d'échelle rendent les grandes machines plus rentables, avec un coût de l'électricité produite plus faible. En effet, les coûts des travaux de terrassement et de fondations, d'ouverture des pistes d'accès, de connexion au réseau et d'autres composants augmentent

moins vite avec la taille que l'énergie générée.

- ✓ En ce qui concerne les projets offshore (parcs éoliens en mer), et pour les mêmes raisons, en plus de leur hauteur qui les met mieux à l'abri des vagues et embruns, les machines de plus grande taille sont également préférables.
- ✓ Lorsqu'il est difficile de trouver des emplacements qui présentent un bon potentiel éolien, la meilleure manière d'en exploiter au maximum les possibilités est d'y installer de grandes machines.



En faveur de petits aérogénérateurs

- ✓ Le réseau électrique local est parfois trop faible pour supporter la puissance d'une grande machine. Ce cas peut se présenter pour des sites éloignés et isolés, avec de faibles consommations.
- ✓ De la même manière, la stabilité d'un réseau électrique peut être particulièrement affectée par des variations importantes de production. Ce cas aura moins de chances de se produire (que ce soit à cause des fluctuations du vent, d'un arrêt ou d'une panne), si l'on utilise des petites machines.
- ✓ Selon les sites, le transport et le montage de grands éléments peut devenir économiquement prohibitif, voire techniquement impossible.

Enfin, les aspects esthétiques (impact visuel), pourront jouer en faveur de machines plus ou moins grandes.

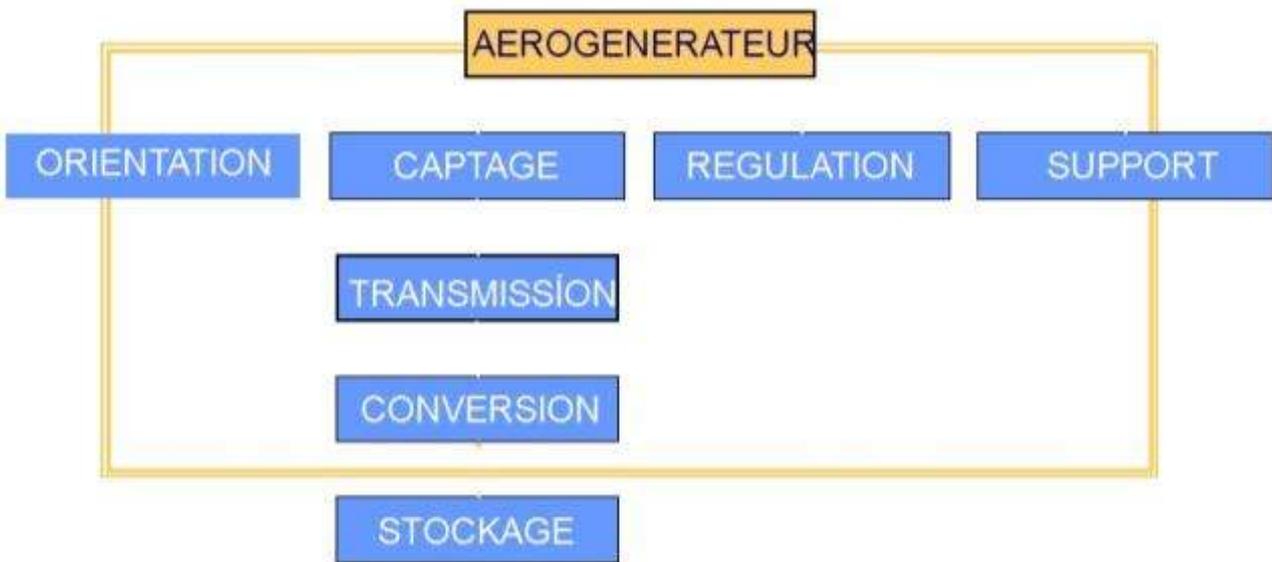
## 7. LES AEROGENERATEURS ACTUELS

L'évolution actuelle des aérogénérateurs peut être caractérisée par les aspects suivants:

- ☞ La tendance générale est d'augmenter les puissances. Les nouvelles machines sont de plus en plus grandes, et atteignent 7MW pour des machines terrestres.
- ☞ L'intérêt pour la technologie offshore se développe, et la technologie correspondante continue à s'améliorer.

- ☞ Utilisation de matériaux plus modernes et performants pour les différentes pièces.
- ☞ Systèmes électroniques de contrôle plus évolués.
- ☞ Réduction des coûts de fabrication et d'exploitation.

Le schéma suivant résume les fonctions principales que doit présenter un aérogénérateur.

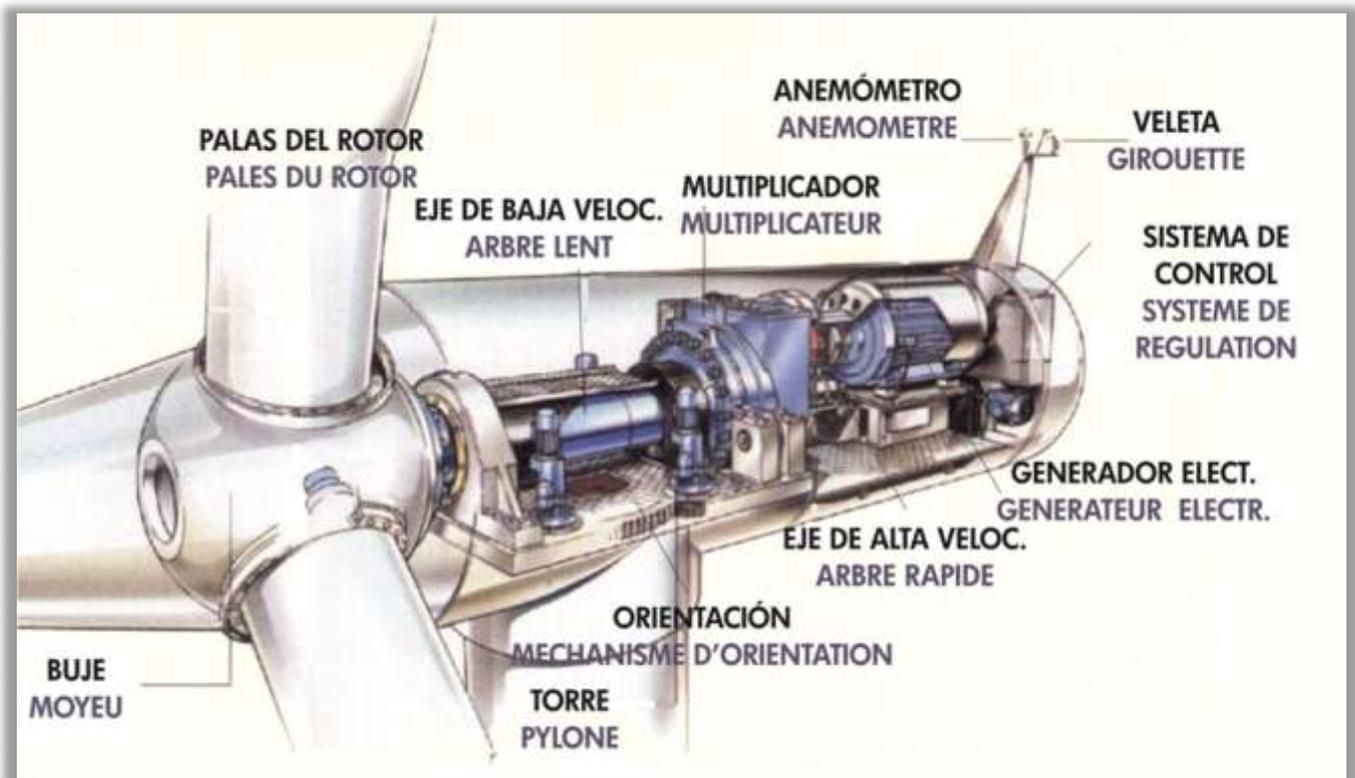


Source personnelle.

Nous définissons ici les composants principaux d'un aérogénérateur pour le type le plus répandu, qui est celui à axe horizontal. Ceux-ci sont:

- ☞ le rotor: les pales et le moyeu.
- ☞ la nacelle.
- ☞ le multiplicateur.

- ☞ le générateur électrique.
- ☞ le système de contrôle-commande, incluant la mesure du vent.
- ☞ le système d'orientation.
- ☞ le pylône support.



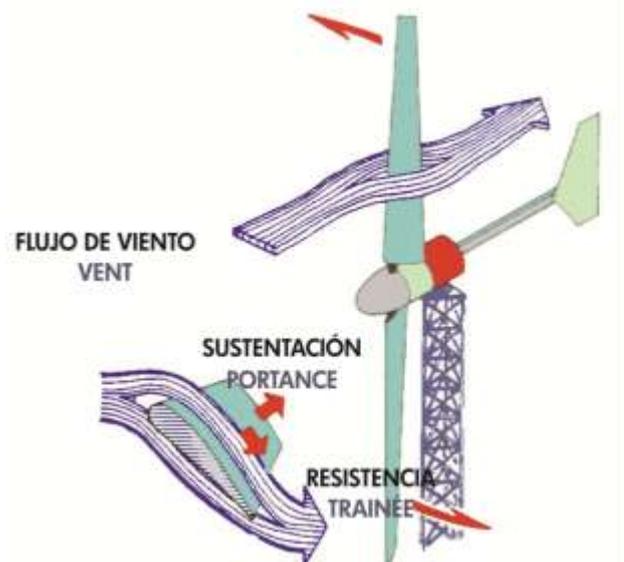
Composants d'un aérogénérateur.  
Source personnelle.

### 7.1. ROTOR: PALES ET MOYEU

Le rotor d'une éolienne est constitué par les pales, ainsi que le moyeu sur lequel elles sont fixées. Les dimensions déterminent la surface balayée, qui est directement proportionnelle à l'énergie que l'on peut capter.

Les pales des aérogénérateurs fonctionnent selon les principes de l'aérodynamique utilisés en aviation. Elles font appel à la portance et à la traînée d'un profil, non seulement pour extraire l'énergie maximale du vent, mais aussi pour contrôler le fonctionnement de la machine.

La courbe de puissance de l'aérogénérateur dépend en grande partie des caractéristiques du rotor. En particulier, suivant la possibilité ou non de régler l'angle des pales, nous aurons deux types principaux de rotor:



Action du vent sur les pales d'une éolienne.  
Source personnelle.

### 7.1.1. Pas fixe

Dans ce cas, la position des pales est fixe par rapport au moyeu, et ne peut être modifiée.

### 7.1.2. Pas variable

Dans ce cas, on peut orienter les pales en les faisant tourner par rapport au moyeu sur leur grand axe grâce à un mécanisme situé dans le moyeu, et régler ainsi l'angle d'attaque du profil aérodynamique. Ce système à pas variable fournit une possibilité supplémentaire de s'adapter à la vitesse du vent, et permet en conséquence, d'améliorer la production d'énergie.

Par exemple, à vitesse de vent faible, on pourra régler les pales pour qu'elles fournissent une force plus élevée permettant le démarrage du rotor. De même, lorsque le vent devient trop fort, on pourra modifier l'angle pour diminuer les efforts, vers la position "en drapeau", où elles présentent le minimum de résistance au vent et ne génèrent plus de force de rotation, arrêtant ainsi le rotor.

Il est important de souligner, que dans tous les cas, pas fixe ou variable, la conception doit permettre de contrôler l'aérogénérateur, et en particulier, de pouvoir freiner et stopper la rotation en cas de

vitesse de vent trop élevées, afin de protéger la machine.

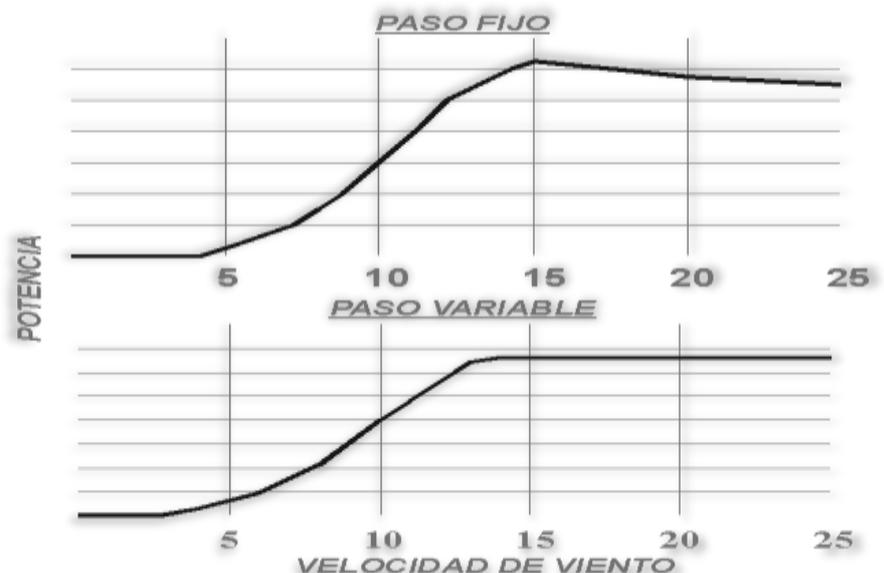
Dans le cas du pas variable, ceci s'obtient en mettant les pales en drapeau. Dans le cas du pas fixe, le rendement du profil est conçu de manière à limiter la puissance par décrochage aérodynamique de l'écoulement de l'air. On pourra aussi utiliser des systèmes du genre aérofrein.

Le graphique suivant permet de comparer les courbes de puissance typiques des aérogénérateurs à pas fixe et à pas variable. Dans le cas du pas variables, on remarquera que:

-  La courbe est plus régulière, avec moins de fluctuations.
-  La vitesse de démarrage est plus faible.
-  La puissance nominale est atteinte pour des vitesses de vent plus faibles.
-  Au delà de la vitesse de vent nominale, le pas variable permet de maintenir constante la puissance générée au fur et à mesure qu'augmente la vitesse du vent. Le pas fixe, lui ne permet pas une telle régulation, et la puissance générée passe par un maximum avant de commencer à décroître.

Comparaison des courbes de puissance d'un aérogénérateur à pas fixe et d'un aérogénérateur à pas variable. (PASO FIJO – PAS FIXE; PASO VARIABLE – PAS VARIABLE; VELOCIDAD DE VIENTO – VITESSE DU VENT; POTENCIA – PUISSANCE)

Source personnelle.

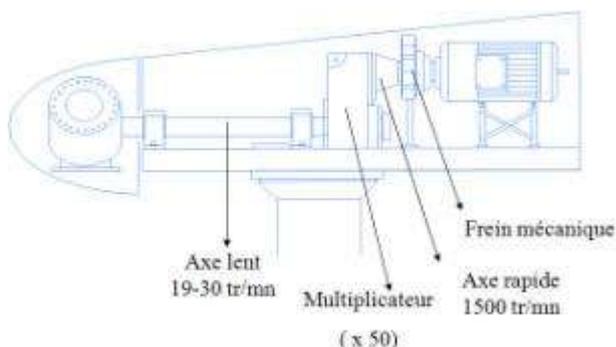


## 7.2. NACELLE

Il s'agit de l'ensemble formé par la structure qui supporte la machinerie de l'aérogénérateur (hormis le rotor et le pylône), et la carcasse qui protège celle-ci des intempéries.

## 7.3. LE MULTIPLICATEUR

Sa fonction est d'adapter la faible vitesse de rotation de l'axe du rotor à celle du générateur électrique, qui est en général beaucoup plus élevée.



Représentation d'un multiplicateur et de ses éléments.  
Source personnelle.

Selon le type de générateur, les vitesses de rotation nécessaires peuvent être différentes. Par exemple, un générateur à 4 pôles doit tourner à 1500 tr/mn pour générer de l'électricité à la fréquence du réseau de 50 Hz.

☞ Certaines machines ont des générateurs à grand nombre de pôles (96 pôles par exemple). Ceux-ci peuvent être entraînés directement, et ne nécessitent pas de multiplicateur.

☞ Plus la machine est grande, plus la vitesse de rotation du rotor est faible.

En utilisant un générateur classique directement connecté au réseau (triphase 50Hz), et avec deux, quatre ou six pôles, il nous faudrait un rotor capable de tourner à entre 3000 et 1000 tr/mn. *Pour un rotor de 43 mètres de diamètre, capable de résister à de telles vitesses de rotation, cela nous donnerait une vitesse en bout de pale de plus du double de la*

*vitesse du son, ce qui nous oblige à abandonner cette solution.*

## 7.4. LE GENERATEUR ELECTRIQUE

Ce composant convertit l'énergie mécanique en provenance de la transmission en électricité, qui pourra ensuite être injectée sur le réseau ou alimenter des consommateurs.

☞ Ils fonctionnent sur le principe inverse des moteurs électriques: selon la loi de Faraday, un circuit soumis à une variation de champ magnétique, fait apparaître une tension électrique.

C'est l'élément principal du système électrique de l'aérogénérateur, à partir duquel seront dimensionnés les autres composants électriques, ainsi que le système de contrôle et de supervision.

Il peut être à courant continu (CC) ou à courant alternatif (CA). On choisit habituellement un générateur à courant alternatif, plus simple mécaniquement, donc plus léger, moins coûteux, etc...

Les générateurs sont le plus souvent de type synchrone ou asynchrone, et nous décrivons ci-dessous les caractéristiques principales de chacun d'entre eux:

### 7.4.1. Synchrone

☞ C'est le type le plus souvent utilisé dans les aérogénérateurs modernes.

☞ Ils peuvent être à grand nombre de pôles, et dans ce cas, éviter la nécessité de l'emploi d'un multiplicateur.

☞ L'excitation est indépendante, en courant continu réglable, ou à aimants permanents.

☞ L'utilisation à vitesse variable nécessite l'utilisation d'un convertisseur de fréquence.

### 7.4.2. Asynchrone.



Utilisé dans les aérogénérateurs classiques.



Le principe de fonctionnement se base sur une rotation à vitesse légèrement supérieure à celle du synchronisme, correspondant au champ magnétique tournant généré par le réseau.



La connexion se fait au réseau directement, ou à travers un simple transformateur.

Les avantages du générateur asynchrone sont son coût peu élevé, sa robustesse, sa simplicité, et sa facilité de connexion au réseau. Cependant, il présente l'inconvénient de nécessiter une compensation d'énergie réactive, et son rendement est légèrement inférieur.

### 7.5. LE SYSTEME DE CONTROLE

Dans le système de contrôle, il faut distinguer entre la partie **régulation**, qui est chargée de réguler la vitesse de rotation et autres paramètres, et la partie **commande**, qui permet de démarrer et arrêter la machine, et assure aussi les tâches de sécurité: arrêt automatique en cas de défaut, etc...

Voici les fonctions généralement implantées:



Régulation de la machine dans le but d'en optimiser le rendement.



Suivi des divers paramètres: vitesse et direction du vent, températures, etc...



Démarrage ou arrêt automatique de la machine en fonction de la vitesse du vent.



Enregistrement de données telles nombre d'heures de fonctionnement, énergie produite, énergie consommée, etc...

### 7.6. SYSTEME D'ORIENTATION

Le système d'orientation a pour but d'orienter constamment la machine par rapport au vent durant son fonctionnement, en général face au vent. La correction de l'orientation est décidée et commandée par le système de contrôle, à partir des mesures de la girouette.



Quasiment tous les aérogénérateurs à axe horizontal, sont orientés de manière "forcée" par des moteurs et réducteurs, pour maintenir la position du rotor face au vent.



Les câbles électriques qui descendent de la nacelle à l'intérieur du pylône suivent l'orientation de la nacelle, ils sont soumis à une torsion qui les stresse et doit rester limitée.

Pour cela, les aérogénérateurs disposent d'un système qui détecte la torsion supportée par les câbles, et peut demander au besoin au système de contrôle de "dérouler" ceux-ci. On pourra alors voir l'éolienne tourner sur elle-même pour récupérer une position plus adaptée.

### 7.7. LE PYLONE

Il supporte la nacelle et le rotor, permet leur orientation, et les surélève à une hauteur qui permet la libre rotation du rotor et l'exploitation de vents plus forts.

Le pylône est en général conique (c.à.d. avec un diamètre décroissant vers le haut), afin d'augmenter sa résistance tout en économisant de la matière. Il peut être tubulaire ou en treillis.



L'avantage principal des pylônes en treillis est leur prix. Cependant, pour des raisons esthétiques et de protection des oiseaux, elles ont pratiquement disparu sur les aérogénérateurs modernes.



Pour les petites éoliennes, on utilise souvent des mâts haubanés, qui permettent un montage sans nécessité de grue.



Les grandes éoliennes utilisent des pylônes coniques, en acier ou en béton armé, qui ne génèrent que peu de turbulences

## 8. LE PARC EOLIEN

C'est une installation de production d'électricité alimentée par le vent et qui peut être constituée d'un ou plusieurs aérogénérateurs.

La **puissance installée** du parc correspond à la somme des puissances nominales des aérogénérateurs qui le composent.

La quantité d'aérogénérateurs sur un parc éolien dépend de nombreux facteurs, comme le terrain disponible, la connexion (ou non) au réseau électrique, la législation locale, etc...

### 8.1. TYPES DE CONNEXION D'UN PARC EOLIEN

On peut distinguer les types de connexion suivants:

#### 8.1.1. Parcs éoliens connectés au réseau

Dans ce cas, toute l'énergie produite est injectée sur le réseau.

Les parcs éoliens **offshore** (qui sont installés en mer) appartiennent à cette catégorie, car ils sont connectés à un réseau électrique marin spécifique qui amène l'énergie sur la terre ferme pour l'injecter au réseau électrique terrestre.



Parc éolien de l'Institut Technologique et des Energies Renouvelables de Tenerife (ITER). Source personnelle.

#### 8.1.2. Parcs éoliens en régime d'autoconsommation

Dans ce cas le parc est aussi connecté sur le réseau électrique, mais la majeure partie de l'énergie produite est consommée sur place dans une installation associée, ou encore par un groupe de consommateurs, qui peut aussi s'alimenter à partir du réseau en cas de vent insuffisant. Les applications de ce type de régime dépendent essentiellement de la législation.

#### 8.1.3. Parcs éoliens isolés

Dans ce cas, il s'agit d'alimenter en énergie un ou plusieurs consommateurs qui ne sont pas reliés au réseau électrique.

## 9. CONCEPTION D'UN PARC EOLIEN

Pour pouvoir maximiser la quantité d'énergie récupérée sur un site donné, il est nécessaire d'étudier certains facteurs. Les plus importants concernent les conditions de vent sur la zone, l'orographie du terrain, le type d'aérogénérateur et le choix des lieux d'implantation. Les caractéristiques du réseau électrique local, et la législation en cours sont d'autres aspects qui pourront influencer sur les caractéristiques du parc éolien.

### 9.1. LE SITE D'IMPLANTATION

Pour déterminer les meilleurs sites d'implantation, nous devons étudier les aspects suivants:



Les caractéristiques du vent sur le site: les différentes études à effectuer ont été mentionnées plus haut.



Rechercher des terrains ouverts, sans obstacles, avec la rugosité la plus basse possible.



Réaliser une étude de l'environnement local, et de l'impact du parc sur celui-ci.



Etudier les parcs éoliens à proximité, et leur possible influence sur le nôtre.



La topographie du terrain est primordiale pour le choix du lieu d'implantation exact des machines, mais conditionne aussi les infrastructures électriques et de génie civil qu'il faudra planifier. Cet aspect peut être particulièrement important car les meilleurs sites sont souvent isolés, et sans voies d'accès ni infrastructures de réseau électrique à proximité.



Parc éolien de l'Institut Technologique et des Energies Renouvelables de Tenerife (ITER).  
Source personnelle

## 9.2. LE RESEAU D'EVACUATION DE L'ENERGIE

Pour les parcs éoliens connectés au réseau électrique, qui est le cas le plus fréquent, il faudra tenir compte des caractéristiques de celui-ci, s'il s'agit d'un réseau robuste ou faible, ainsi que de la législation et des exigences requises pour s'y connecter.

Dans le cas de parc éoliens de petite puissance, il faudra en général disposer d'un accès au réseau relativement proche. Le coût de construction d'une ligne d'évacuation peut en effet rapidement devenir prohibitif pour un petit projet.

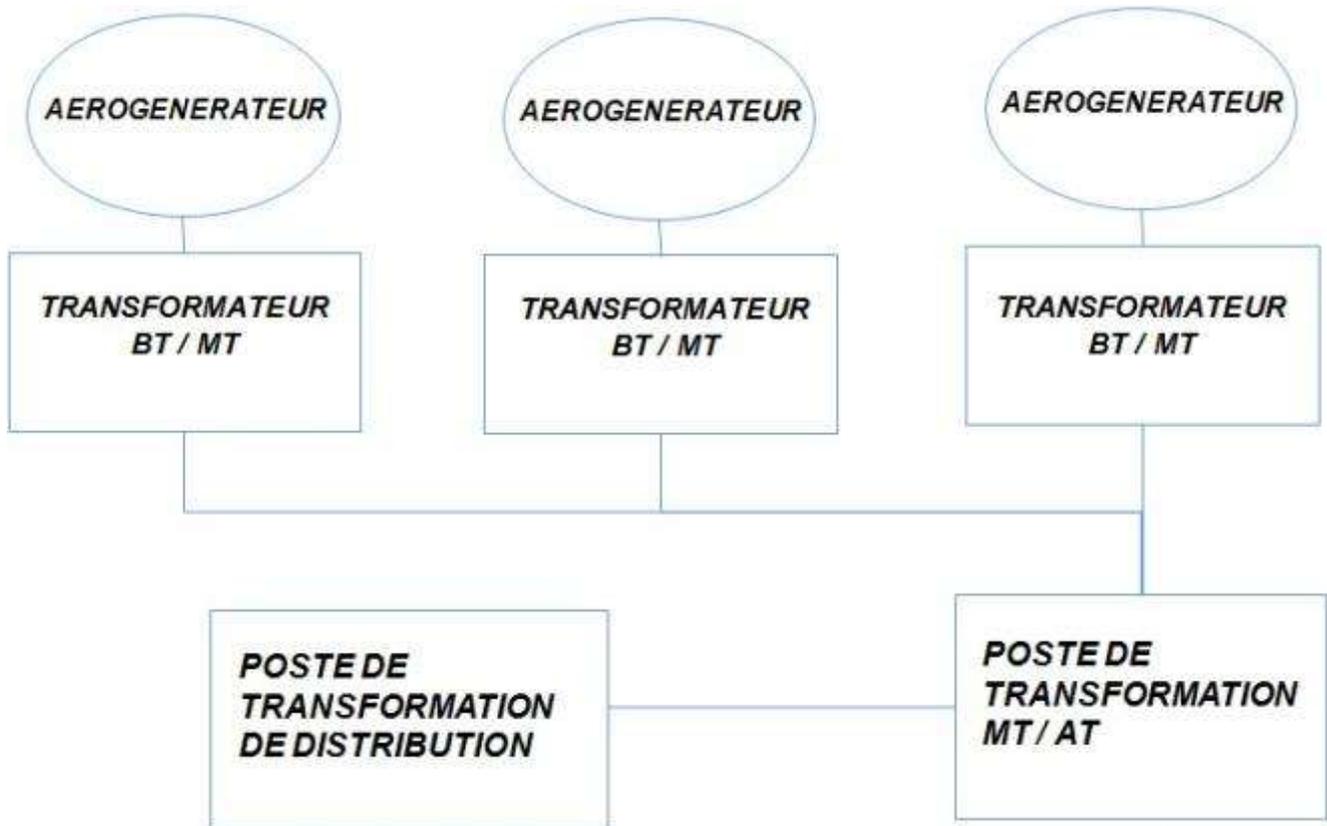


Schéma montrant les différentes étapes de transformation nécessaires pour injecter l'énergie produite par un parc d'aérogénérateurs. Source personnelle.

Les génératrices des grands aérogénérateurs produisent en général du courant à une tension de 690V. Pour chaque machine, un transformateur élèvera la tension à celle du réseau moyenne tension, entre 10 et 30kV, qui est celle qui relie les machines du parc.

Le réseau électrique local doit être capable de supporter la puissance que peut générer le parc. Si ce n'est pas le cas: réseau local saturé ou trop faible pour évacuer la puissance, le renforcement de celui-ci nécessitera un investissement supplémentaire.

### 9.3. SELECTION DES AEROGENERATEURS ET DE LEUR EMPLACEMENT

Il s'agit de choisir non seulement la dimension, la puissance et le modèle d'aérogénérateur le plus approprié pour le site, (voir paragraphe 5. ci-dessus), mais aussi de décider des lieux précis d'implantation, l'objectif étant en général de récupérer la meilleure puissance possible.



Les aérogénérateurs seront placés de préférence dans les zones où le vent a tendance à s'accélérer par effet venturi: sur les crêtes lorsque celles-ci font obstacle aux vents dominants, et de préférence au niveau des cols



Pour éviter les effets de sillage entre nos aérogénérateurs, qui peuvent avoir pour conséquence, en plus de la moindre quantité d'énergie reçue, la fatigue prématurée des matériels à cause des turbulences rencontrées, il est conseillé de maintenir les distances minimales suivantes entre les rotors.

- ✓ D'orienter les rangées d'aérogénérateurs de préférence perpendiculairement à la direction des vents dominants
- ✓ De séparer les aérogénérateurs d'une même rangée d'une distance équivalente à 1.5-3 fois le diamètre du rotor.
- ✓ De séparer les rangées entre elles d'une distance équivalente à 4-7 fois le diamètre du rotor

#### L'effet de parc

La perte d'énergie due à l'effet de parc peut être calculée en fonction des différentes directions du vent à partir des caractéristiques des rotors des éoliennes, de la rose des vents, de la distribution de Weibull, et de la rugosité.

On peut estimer ainsi l'effet de masquage du vent entre aérogénérateurs.

Cette perte d'énergie est en général d'environ 50%



#### Utilisation de la rose des vents

L'utilisation de la rose des vents peut être d'une grande utilité pour sélectionner le meilleur emplacement des aérogénérateurs. Elle permet de déterminer si le vent présente une direction prédominante, ce qui est le cas le plus favorable. Elle permet aussi de minimiser plus facilement l'influence des obstacles dans cette direction particulière.

Rappelons enfin que la distribution du vent peut varier d'une année à l'autre, ainsi que son contenu énergétique. C'est pour cela qu'il est préférable de disposer d'observations sur plusieurs années.

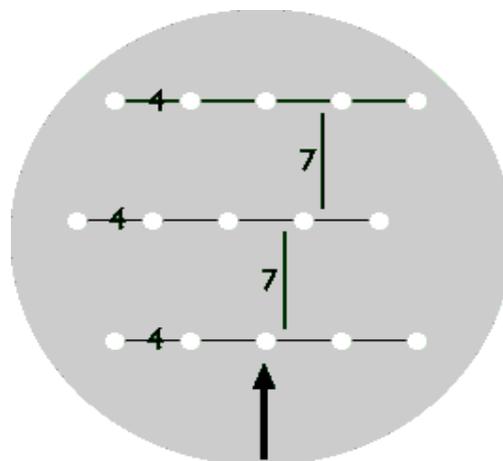


Schéma des distances de séparation entre aérogénérateurs. Source personnelle.

## 10. ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Une part importante des études préliminaires à l'implantation d'un parc éolien concerne l'étude d'impact environnementale. Cette étude peut être divisée en plusieurs étapes qui sont les suivantes:

### 10.1. IMPACT VISUEL

Il s'agit de l'aspect le plus difficilement quantifiable, et le plus subjectif. Selon des sondages effectués à niveau européen, le public préfère en général:

-  Des rotors tripales avec un pylône tubulaire de couleur neutre.
-  Quelques éoliennes de grande taille plutôt qu'un grand nombre de petites unités.
-  Des machines réparties plutôt sur une seule ligne que plusieurs, particulièrement en terrain plat.

Dans les zones sans relief, il est conseillé de répartir les éoliennes selon une distribution géométrique simple, facile à percevoir par le spectateur. Installer les machines avec un espacement régulier le long d'une seule ligne peut s'avérer être une bonne solution.

-  L'évaluation des implantations sur des pentes est moins évidente, car l'impact visuel dépend du point de vue.
-  Les couleurs neutres: blanc ou gris clair, peuvent être dégradées vers le vert vers la base dans les zones pourvues de végétation.
-  L'impact visuel dû au mouvement est plus faible pour les grandes machines, qui tournent plus lentement.



Parc éolien de l'Institut Technologique et des Energies Renouvelables de Tenerife (ITER).  
Source personnelle.

### 10.2. LE NIVEAU DE BRUIT

Durant le fonctionnement d'un parc éolien, du bruit peut être généré, principalement en provenance de deux sources. La première est d'origine mécanique, bruit du multiplicateur, ou du système d'orientation de la nacelle, la seconde est d'origine aérodynamique et liée au mouvement des pales fendant l'air.

La perception du bruit, et la gêne qu'elle peut occasionner, dépend fortement du bruit de fond ambiant et de la distance aux zones habitées.

A cet effet, la législation locale peut être déterminante en délimitant des marges de proximité:

-  Aux Canaries, la distance minimale exigée est de 150m à l'habitat et de 250m aux zones urbaines.

Le bruit des aérogénérateurs est devenu un problème secondaire, car les machines actuelles sont nettement plus silencieuses, l'extrémité des pales étant étudiée en conséquence.

### 10.3. IMPACT SUR L'AVIFAUNE

Toute éolienne présente un danger de collision avec les animaux volants, oiseaux et chauves-souris, de même que les lignes aériennes de haute et moyenne tension.



Les lignes électriques aériennes, y compris celles des parcs éoliens sont souvent plus dangereuses que les aérogénérateurs proprement dits.

Des études ont démontré qu'en réalité, une ligne d'aérogénérateurs de 1km de long cause la même quantité de collisions qu'une autoroute ou voie rapide de même longueur, tout en étant, dans certaines circonstances 90% moins dangereuse qu'une ligne haute tension de mêmes dimensions.



Les oiseaux modifient leur trajectoire avant d'arriver aux éoliennes, de manière à les contourner à une distance de sécurité suffisante.

En ce qui concerne le bétail, aucun impact n'a pu être mis en évidence.



Freedigitalphotos.net

### 10.4. POLLUTION

L'émission de polluants est quasiment NULLE durant la phase d'opération du parc.

Le seul déchet qui est produit par les parcs éoliens correspond aux lubrifiants utilisés pour les machines. Ceux-ci doivent être manipulés et traités selon les protocoles d'opération du parc. Le suivi des règles de maintenance et d'élimination des résidus évite tout impact négatif sur l'environnement.

Un aérogénérateur de dernière génération produit en 2 ou 3 mois l'énergie nécessaire à sa fabrication.

Ce temps de récupération de l'énergie a continuellement diminué depuis les débuts de l'éolien: les premiers aérogénérateurs (1980) nécessitaient un an pour générer l'énergie qui avait été utilisée pour les fabriquer.

L'énergie investie dans les éoliennes offshore est récupérée encore plus rapidement, car dans ce cas la production est jusqu'à 50% plus élevée.



Le plus important en ce qui concerne la pollution, est de garantir le démantèlement du parc éolien à la fin de sa vie utile, la remise en état originel des terrains, et le recyclage des déchets produits



## **CHAPITRE IV: ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE**

## Chapitre IV: ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE

**OBJET:** Ce bloc développe les concepts fondamentaux de l'énergie solaire photovoltaïque, et donne à l'étudiant un aperçu de l'état actuel de la technologie. On y fournit aussi les connaissances nécessaires pour qu'il soit capable d'évaluer le potentiel solaire d'un site, ainsi que de dimensionner un système photovoltaïque relié au réseau ou en site isolé.

Jusqu'à fin des années 90, ce sont les Etats-Unis qui possédaient la plus grande puissance photovoltaïque installée dans le monde. Cependant, la croissance rapide au Japon et en Europe, en 1999 et 2002 respectivement, a permis de dépasser finalement les États-Unis.

La capacité installée d'énergie solaire photovoltaïque a connu une croissance exponentielle ces dernières années, principalement grâce aux mécanismes de stimulation de certains pays. Fin 2011, la puissance installée dans le monde était de l'ordre de 70 000 MWc, dont 71% dans l'Union européenne. Le graphique suivant montre l'évolution de la répartition mondiale de la capacité photovoltaïque pour la période 2000-2011.

### 1. INTRODUCTION



ROW: Reste du monde  
MEA: Moyen-Orient et Afrique  
APAC: Asie-Pacifique-Caraïbes

Source: EPIA. Association Européenne de l'Industrie Photovoltaïque

## 2. HISTORIQUE

L'effet photovoltaïque fut découvert en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel-Alexandre. Ses études du spectre solaire, du magnétisme, de l'électricité et de l'optique constituent le pilier scientifique de l'énergie photovoltaïque.

Depuis cette découverte, les étapes de l'évolution de l'énergie photovoltaïque ont été les suivantes:

-  **1883.** Charles Fritts, un inventeur américain, fabrique la première cellule solaire expérimentale, constituée de deux plaques de sélénium et d'une fine électrode en or.
-  **1887.** Hertz découvre que sous l'action de la lumière, les métaux peuvent émettre des charges électriques.
-  **1900.** Planck énonce l'hypothèse des photons.
-  **1902.** Einstein explique l'effet photoélectrique.
-  **1940.** Mott et Schottky énoncent la théorie des diodes.
-  **1954.** Chaplin, Fueller et Perarson fabriquent les premières cellules solaires réellement utilisables.
-  **1958.** Hoffman Electronics obtiennent des cellules qui atteignent 8% de rendement, lesquelles seront utilisées pour alimenter le premier satellite utilisant cette source d'énergie, le Vanguard I qui a fonctionné durant 8 ans.



**1960.** Hoffman Electronics obtient des cellules de 14% de rendement.

Pendant les années 1990, et au début du 21<sup>ème</sup> siècle, le prix des cellules photovoltaïques n'a cessé de décroître, en même temps que s'améliorait légèrement leur rendement.

Concernant le futur de l'énergie solaire photovoltaïque, divers facteurs incitent à l'optimisme. Il y a non seulement les multiples avancées de cette technologie, mais aussi l'appui institutionnel qu'elle reçoit de la part des deux grandes puissances commerciales et consommatrices que sont l'Union Européenne et les Etats-Unis.



Freedigitalphotos.net

### 3. LA RADIATION SOLAIRE

La quantité annuelle d'énergie que reçoit la terre du soleil est d'environ  $1,49 \times 10^8$  kWh, soit environ 16000 fois la consommation mondiale actuelle. Il s'agit d'une énergie propre et qui emploie une source inépuisable, la durée de vie estimée du soleil étant de 5 000 millions d'années.

La difficulté est de convertir efficacement l'énergie solaire en une énergie facilement utilisable. Les technologies actuelles sont de deux types: la **conversion électrique** et la **conversion thermique**.

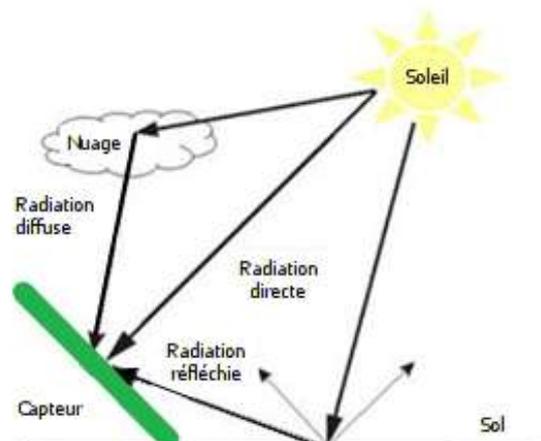
La radiation solaire est le flux énergétique que nous recevons du soleil sous forme d'ondes électromagnétiques de diverses fréquences:

-  **Infrarouge:** très abondantes, mais peu énergétiques, elle représente 46% de l'énergie reçue.
-  **Visible:** celle qui est détectée par l'œil humain, qui représente 47% de l'énergie.
-  **Ultraviolette:** peu abondante (7%), mais très énergétique.

Avant d'entrer dans l'atmosphère, le spectre solaire apporte  $1366\text{W/m}^2$  (constante solaire) sur une surface perpendiculaire aux rayons. L'atmosphère que traversent les rayons solaires avant d'atteindre le sol, modifie ce spectre, en absorbant, réfléchissant et diffusant une partie de la radiation. A l'issue, la puissance maximale au sol est finalement de l'ordre de  $1000\text{W/m}^2$  (à midi, sans nuages et par bonne visibilité)

La quantité de radiation atteignant une surface exposée sur terre, se répartit en trois composantes:

-  **La radiation directe:** celle qui provient directement du soleil. C'est la plus importante dans les applications photovoltaïques.
-  **La radiation diffuse:** celle qui a été déviée à son passage par l'atmosphère, par réflexion ou diffusion sur des nuages ou des particules en suspension (poussières, pollens, etc.).
-  **La radiation réfléchie par la surface terrestre:** l'albédo mesure la proportion de radiation incidente qui est réfléchiée par la surface terrestre.



Source personnelle

*Un jour sans nuages, avec un ciel limpide, la radiation directe est très supérieure à la radiation diffuse.*

*Un jour totalement couvert, il n'y a aucune radiation directe, et la totalité de la radiation incidente au sol est d'origine diffuse.*

## 4. L'EFFET PHOTOVOLTAIQUE

C'est la conversion directe de l'énergie transportée par les photons de la lumière dans un matériau convenablement traité, en énergie électrique récupérable dans un circuit extérieur.

Ceci est possible dans des matériaux semi-conducteurs (on utilise essentiellement le silicium), où la liaison de valence des électrons est suffisamment faible pour qu'ils puissent être arrachés en capturant l'énergie des photons incidents.

Cependant, il sera nécessaire d'empêcher les électrons arrachés de se recombiner immédiatement avec l'espace qu'ils ont laissé (trou), et d'orienter leur déplacement de manière à générer un courant électrique.

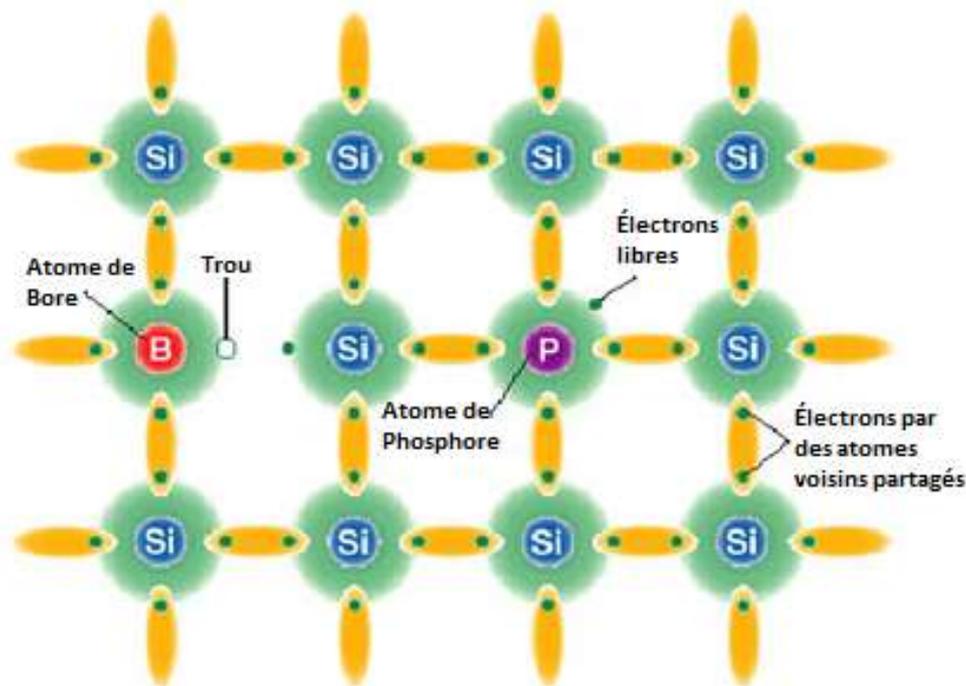
Un atome de silicium est relié aux atomes adjacents par 4 électrons de valence.



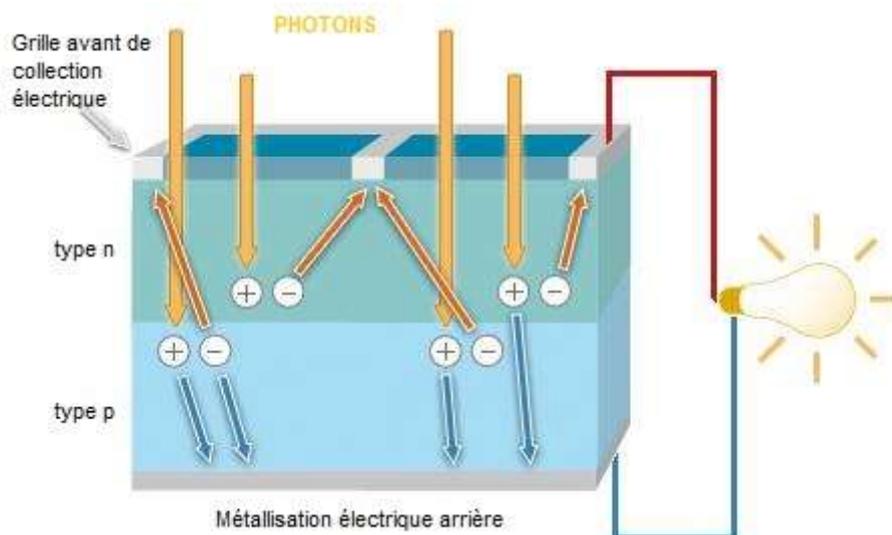
Si l'on substitue un atome de silicium par un autre ayant 3 ou 5 électrons de valence, on pourra générer localement, soit un espace sans électron (un trou), soit un électron supplémentaire, qui auront tendance à se déplacer plus facilement que les autres.



En superposant deux zones dopées différemment (l'une en électrons, l'autre en trous), on génère ce que l'on appelle une jonction P-N, qui crée un champ électrique et a tendance à ne laisser passer les électrons (le courant électrique) que dans un seul sens: c'est une diode.



Source personnelle



Représentation de la jonction P-N.  
Source personnelle

## 5. LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

C'est le composant essentiel, formé de matériaux semi-conducteurs, et doté de la jonction P-N produisant la barrière de potentiel qui permet d'exploiter l'effet photovoltaïque. Les cellules sont habituellement connectées en série, afin d'augmenter la différence de potentiel exploitable dans le circuit extérieur.

### 5.1. PROCESSUS DE FABRICATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE CRISTALLINE

On distingue différentes étapes dans le processus de fabrication d'une telle cellule photovoltaïque:

Le silicium est obtenu principalement à partir de la **silice ( $\text{SiO}_2$ )**, dont on extrait par une méthode de réduction le silicium dit de **qualité métallurgique (pureté 98%)**. Celle-ci étant insuffisante, une étape supplémentaire est nécessaire, jusqu'à obtenir la **qualité électronique (à 99,9999% de pureté)**.

Ensuite commence le processus proprement dit de fabrication, qui consiste à introduire le silicium de qualité électronique dans un creuset avec de faibles proportions de bore pour fondre le tout à une température de l'ordre de 1400°C. Le processus de **crystallisation par refroidissement** est initié par une baguette présentant à son extrémité un germe de cristal de silicium.

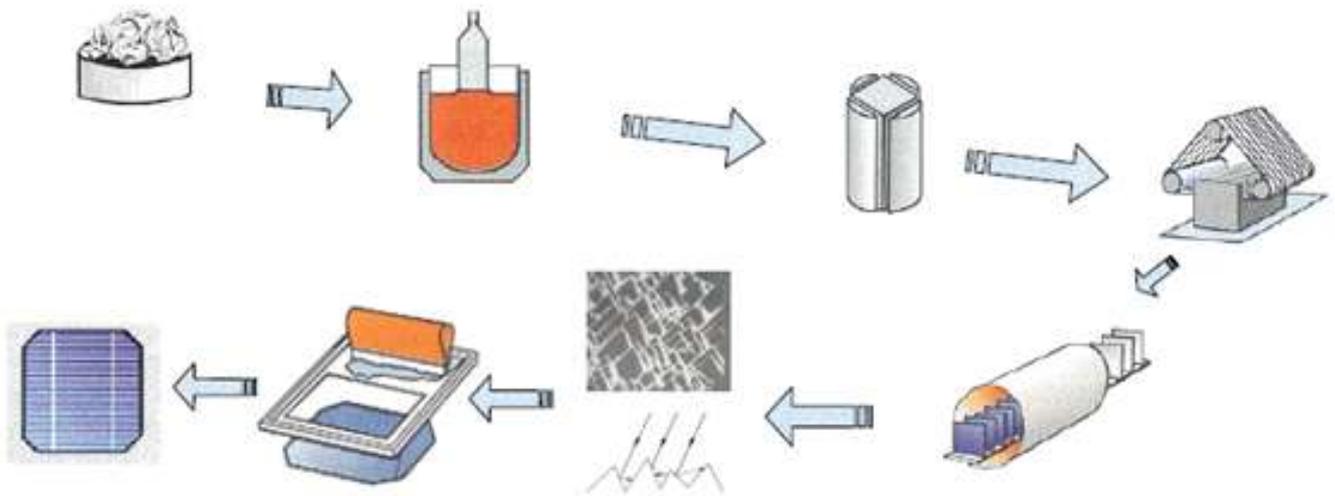
Une fois obtenu le lingot de silicium, celui-ci est **coupé en fines lamelles** qui donneront naissance aux cellules photovoltaïques. Cette découpe est réalisée par des scies extrêmement précises.

La phase suivante consiste à plonger les lamelles dans des **bains chimiques** destinés à restaurer la surface dégradée par le sciage.

Ensuite, on réalise la **jonction p-n** qui formera la cellule photovoltaïque: pour cela, les lamelles sont introduites dans des fours spéciaux, à une température comprise entre 800°C et 1000°C, durant un temps déterminé et en présence d'une atmosphère chargée en atomes de phosphore. Ces derniers diffuseront sur la surface exposée des cellules, réalisant ainsi le dopage de type n.

Etant donné qu'à ce stade, la cellule reflète environ 33% de la lumière incidente, on ajoute un traitement de surface antireflet qui en améliore le rendement.

Finalement, on dote la cellule de pistes et **contacts électriques**, qui permettent de collecter les électrons libérés par l'effet photovoltaïque.



Source personnelle

*Le processus décrit ci-dessus peut être plus ou moins complexe, et intégrer éventuellement des étapes supplémentaires, selon le type de cellule fabriqué et le rendement recherché*

## 5.2. TYPES DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES

La classification se fait suivant la nature et les caractéristiques du matériau semi-conducteur employé:

### 5.2.1. Cellules en silicium monocristallin

Obtenues à partir de silicium de haute pureté comme expliqué précédemment



En laboratoire, ces cellules atteignent un rendement de 14% à 23%, et 15% à 16% pour des modules du commerce.



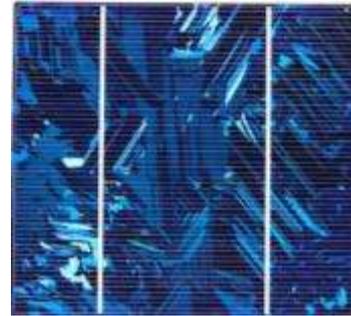
Cellule monocristalline  
Source personnelle

### 5.2.2. Cellules de silicium multi-cristallin

Elles sont fabriquées par solidification lente de la pâte de silicium fondu dans un moule rectangulaire, qui donne un lingot formé de multiples cristaux.



Leur rendement en laboratoire se situe entre 19% et 20%, et entre 12% et 14% pour des modules du commerce.



Cellule multi-cristalline  
Source personnelle

### 5.2.3. Cellules de silicium amorphe

Elles sont fabriquées avec une technique totalement différente, par dépôt de silicium en phase gazeuse. La couche mince de silicium amorphe est 50 fois moins épaisse que pour une cellule cristalline, ce qui économise du silicium. Elle se caractérise par un taux de recombinaison élevé des paires électrons-trous, mais aussi par une meilleure absorption de la lumière. Le rendement en laboratoire atteint les 16%, mais reste en dessous de 10% pour les modules du commerce. Bien que le processus de fabrication soit plus simple et moins coûteux que les précédents, le principal problème réside dans la dégradation des performances, impliquant une diminution du rendement des cellules durant leur exposition continue au soleil.



Module de silicium amorphe.  
Source personnelle

### 5.2.4. Cellules de tellurure de cadmium

Ces cellules utilisent peu de matière active, et ont un coût de fabrication relativement bas. Leurs inconvénients sont la dégradation de leurs caractéristiques au cours du temps, et l'utilisation du cadmium est polémique à cause de sa toxicité.



Le rendement obtenu en laboratoire atteint 17%, les modules du commerce sont à 11%.

### 5.2.5. Cellules à séléniure de cuivre-indium-gallium (CIGS)

Cette technologie continue à se développer avec différents procédés de fabrication. Elle reste encore coûteuse. La production de masse a démarré récemment.



Le rendement obtenu en laboratoire atteint 20%, les modules du commerce sont à 13%.

### 5.2.6. Cellules à l'arséniure de gallium

Elles utilisent des matériaux rares, ce qui les rend chères, mais permet un bon rendement avec peu de matière grâce à la forte absorption de la lumière. Elles présentent un bon vieillissement



Le rendement est de l'ordre de 27% - 28%.

### 5.2.7. Cellules multi-jonction

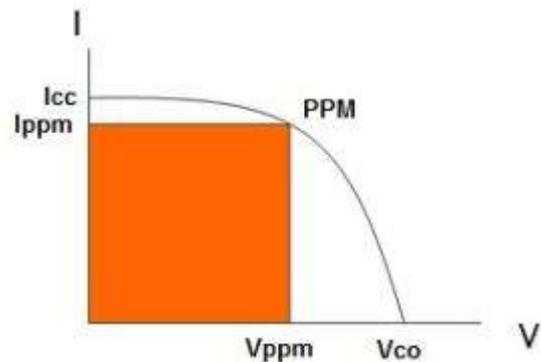
Ce sont des cellules où sont superposées différentes jonctions, qui permettent de convertir la lumière de plusieurs zones du spectre solaire, et d'atteindre un rendement élevé. Elles sont chères, ce qui réserve leur usage à des applications spécifiques.



le rendement atteint les 40%.

## 5.3. CARACTERISTIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

La courbe caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque définit son comportement, et suit une courbe de ce type, pour un éclairement donné:



Courbe I-V  
Source personnelle

### 5.3.1. Intensité de court-circuit ( $I_{cc}$ )

En court circuit, l'intensité est maximale, la tension de sortie zéro. La puissance délivrée est nulle.

### 5.3.2. Tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ )

C'est la tension maximale que donne la cellule, à intensité zéro. La puissance délivrée est nulle.

### 5.3.3. Puissance maximale ( $P_{max}$ )

Au point de puissance maximale de la courbe, caractérisé par  $I_{ppm}$  et  $V_{ppm}$ , le produit  $I \times V$  est maximum, la cellule délivre alors sa puissance crête  $P_{max}$ .

$$P_{max} = I_{ppm} \times V_{ppm}$$

### 5.3.4. Rendement de la cellule photovoltaïque $\eta$

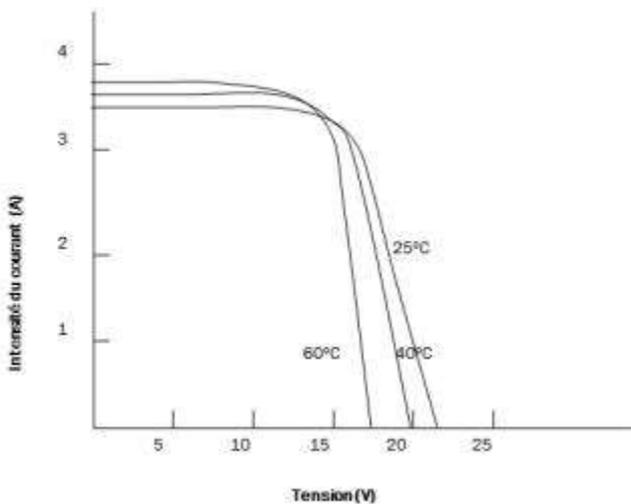
Le rendement se définit comme le rapport entre la puissance électrique maximale que peut délivrer une cellule photovoltaïque, et la puissance lumineuse incidente sur sa surface exposée. Le rendement relativement bas des cellules photovoltaïques est dû aux facteurs suivants:

-  Photons incidents trop peu énergétiques.
-  Pertes par recombinaison électrons-trous.
-  Pertes par réflexion de la lumière.
-  Pertes dans les contacts électriques.
-  Pertes par effet Joule.

$$\eta = \frac{I_{ppm} \times V_{ppm}}{S \times P_{ECL}} \times 100$$

S = surface de la cellule photovoltaïque.

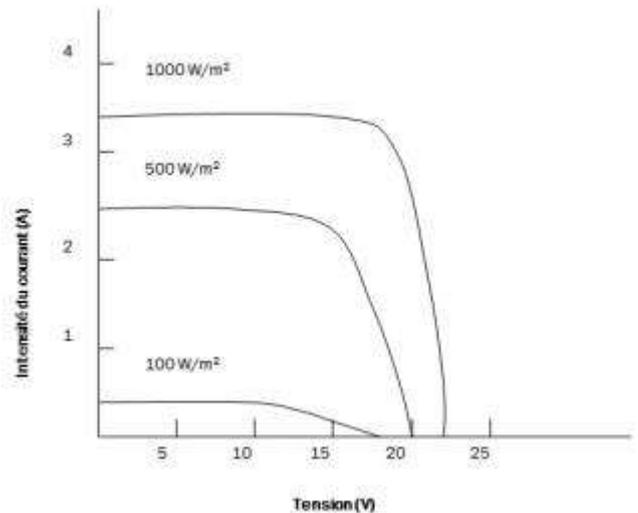
$P_{ECL}$  = puissance surfacique d'éclairement (1.000 W/m<sup>2</sup>)



Source personnelle

### 5.3.5. Variation de la courbe I-V selon l'éclairement

L'intensité augmente avec l'éclairement, la tension aussi, mais cette dernière varie peu. Cet effet influe de manière importante sur le comportement des cellules au cours de la journée et des saisons, et en fonction de la nébulosité.



Source personnelle

### 5.3.6. Variation de la courbe I-V selon la température

L'exposition au soleil chauffe les cellules photovoltaïques. Lorsque leur température augmente, la tension générée diminue; d'un autre côté, le courant augmente avec la température, mais le résultat global sur la puissance crête reste une diminution de celle-ci, de l'ordre de 0.5% par degré centigrade vers les 25°C.

C'est pourquoi, il est recommandé de monter les panneaux en leur assurant une bonne ventilation naturelle.

## 6. FABRICATION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

Un module photovoltaïque est un ensemble de cellules assemblées de telle manière à présenter des conditions optimales pour l'intégration dans des systèmes de production d'énergie.

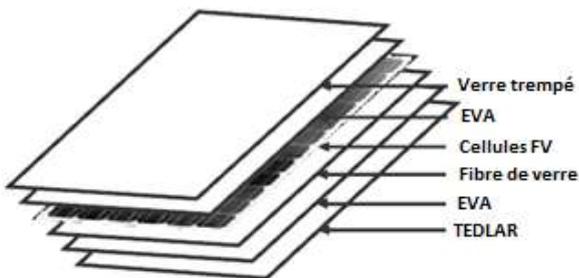
Le module photovoltaïque comprend diverses couches recouvrant les faces supérieures et inférieures des cellules, afin de leur donner une protection contre les agressions mécaniques et atmosphériques

La connexion des cellules est réalisée par des soudures spéciales qui relient la face arrière d'une cellule avec la face avant de la suivante. En général, un module photovoltaïque se compose des éléments suivants:

Après le tri et la sélection des cellules, et leur connexion électrique, la nappe de cellules est insérée entre une couche de résine transparente, l'EVA, recouverte d'un verre trempé en face avant, et une couche d'EVA plus une plaque de TEDLAR en face arrière.

Ce sandwich est introduit pour laminage dans un four où est réalisé le vide, afin d'éviter l'apparition de bulles d'air. Avec la température, la résine transparente fond, et vient envelopper totalement les cellules et leurs connexions, tout en les collant au verre et à la couche arrière, en formant un bloc étanche.

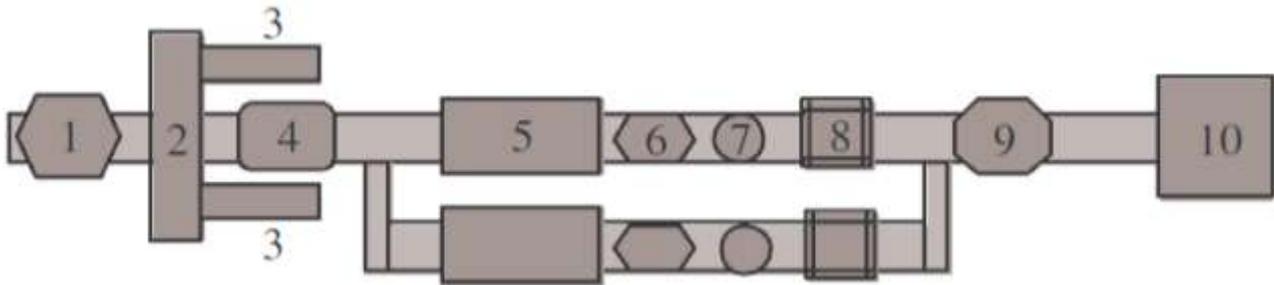
Une fois refroidi, le bloc résultant est encadré dans un profilé de support en aluminium. Un joint flexible butyle ou silicone permet la libre dilatation de l'ensemble. Le processus suivant consiste à ajouter les boîtiers de connexion, et à réaliser les essais du module, pour le classifier selon sa puissance.



Composition d'un module photovoltaïque  
Source personnelle

## 6.1. ETAPES DE FABRICATION

Les étapes de la chaîne de montage des modules photovoltaïques sont représentées sur le dessin suivant:



Chaîne de fabrication de modules photovoltaïques  
Source personnelle

1. Préparation du verre trempé.
2. Tri des cellules et positionnement des lignes qui formeront le module.
3. Positionnement et soudure des rubans de cellules.
4. Soudure des différents rubans de cellules entre eux.
5. Laminage.
6. Etape de refroidissement.
7. Ebavurage de l'EVA et du TEDLAR.
8. Montage du cadre en aluminium.
9. Montage du boîtier de connexion.
10. Flash test du module, qui permet d'obtenir ses caractéristiques dans les conditions de mesure standard (1.000W/m<sup>2</sup>, AM 1.5, 25°C).

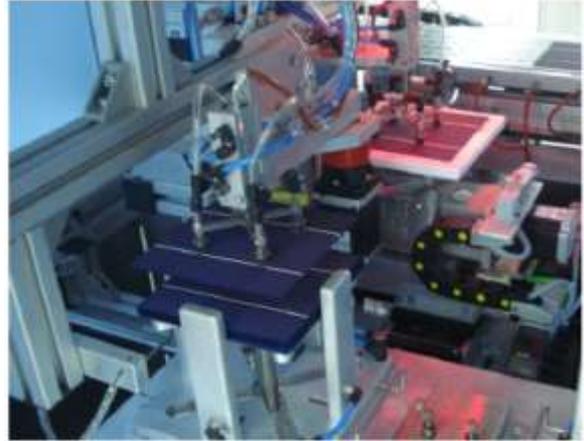
Les modules peuvent être assemblés de diverses manières. Il est possible de les connecter en série, en parallèle, ou une combinaison des deux, afin d'obtenir la tension ou le courant désiré.

La connexion en série de divers modules somme les tensions individuelles de chaque module, l'intensité qui les traverse est la même. Si la connexion se fait en parallèle, ce sont les intensités qui s'ajoutent, et la tension qui est la même.

Il est important de connecter ensemble des modules ayant la même courbe caractéristique I-V, afin d'éviter les déséquilibres.

## 6.2. PROCESSUS DE FABRICATION

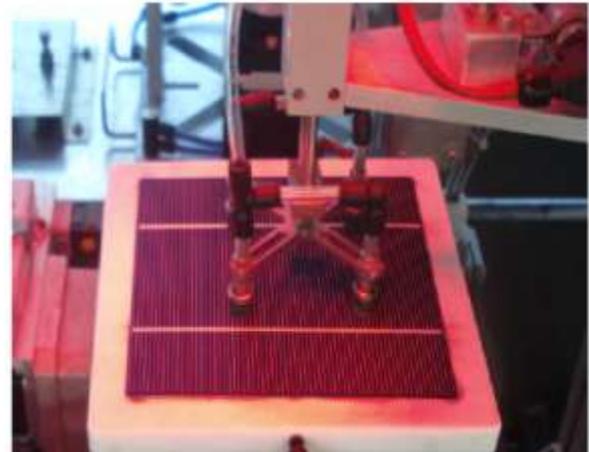
Ci-dessous sont illustrées les photos de toutes les étapes du processus de fabrication d'un module photovoltaïque. (Usine de production de Modules Photovoltaïques – de l'Institut Technologique et des Energies Renouvelables de Tenerife – ITER - Tenerife). **Source personnelle**



**3. Soudeuse**



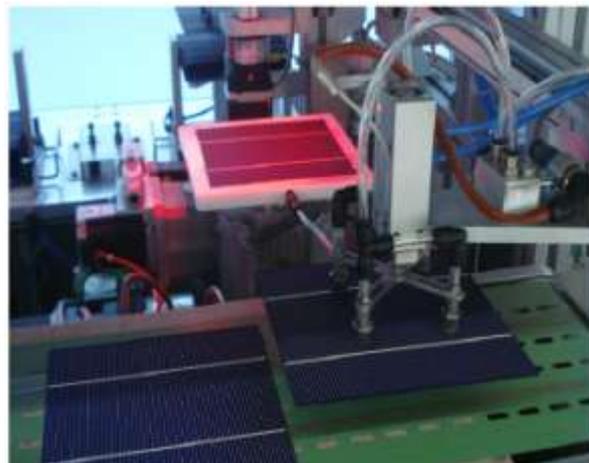
**1. Tri des cellules**



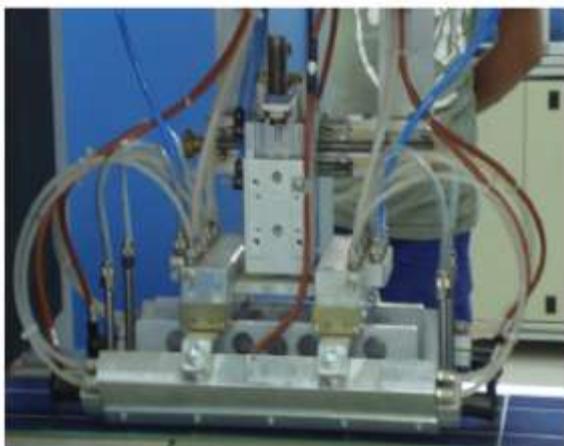
**4. Centrage des cellules**



**2. Alignement des rubans**



**5. Ligne de soudage**



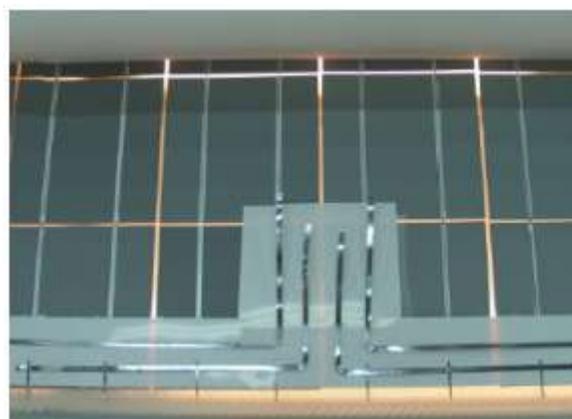
**6. Soudage par lampes infrarouges**



**9. Détail de la table lumineuse**



**7. Rotation des rubans**



**10. Connexions électriques entre cellules**



**8. Transport vers la table lumineuse**



**11. Lamineuse**



**12. Détail du panneau de contrôle**



**13. Ebavurage**



**14. Boîtiers de connexion**



**15. Simulateur solaire**



**16. Cadres en aluminium**

## 7. INSTALLATIONS PHOTOVOLTAIQUES

Une installation photovoltaïque est constituée de plusieurs modules photovoltaïques, d'une structure de support, et de divers équipements électroniques qui permettent d'adapter le courant continu fourni par les modules au réseau électrique ou aux charges qu'ils alimentent.

### 7.1. APPLICATIONS DES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAIQUES

Actuellement, il y a de nombreuses applications pour les installations photovoltaïques, les plus importantes étant:



#### Stations de mesure autonomes

- ✓ Stations météorologiques.
- ✓ Stations de mesure de pollution.
- ✓ Stations de mesure océanographiques.
- ✓ Stations de mesure sismique.
- ✓ Contrôle-commande à distance de retenues d'eau.
- ✓ Protection civile.



#### Aides à la navigation

- ✓ Radiophares.
- ✓ Radiobalises.
- ✓ Bouées.
- ✓ Plateformes.
- ✓ Embarcations.



#### Transport terrestre

- ✓ Signalisation routière et d'autoroute.
- ✓ Téléphones de secours.
- ✓ Postes de secours.
- ✓ Signalisation ferroviaire.



#### Electrification rurale

- ✓ Habitat isolé.
- ✓ Résidences secondaires.
- ✓ Refuges de montagne.



#### Eclairage public



#### Applications agricoles

- ✓ Répéteurs radio.
- ✓ Télécommande.
- ✓ Contrôle d'arrosage à distance.
- ✓ Radiotéléphonie des postes de surveillance forestière.
- ✓ Téléphonie rurale par satellite.
- ✓ Pompage.
- ✓ Electrification de hangars et serres agricoles.



#### Systemes de télécommunication



#### Intégration en toiture, façade,...



#### Transports et applications récréatives.



#### Intégration dans les écrans acoustiques.



#### Cellules à haut rendement dans les satellites.

### 7.2. CLASSIFICATION DES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAIQUES

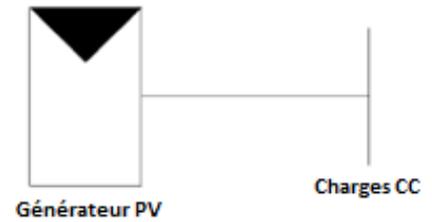
#### 7.2.1. Installations isolées du réseau

Elles sont utilisées dans des zones éloignées, qui ne disposent pas d'un accès au réseau électrique telles que des maisons, des hangars agricoles ou d'élevage, pour de l'éclairage, des équipements de télécommunications, du pompage, etc...

Les usagers de ce type d'installation doivent être conscients des limitations de celle-ci, afin de savoir gérer les problèmes d'approvisionnement et prévenir les dommages que pourraient subir certains éléments qui la composent.



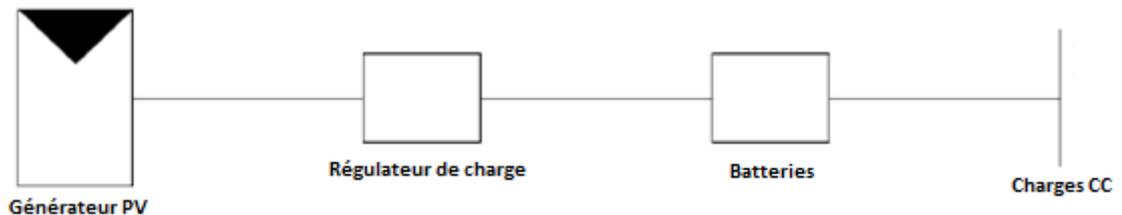
**Systèmes à courant continu sans régulation ni stockage:** ils sont utilisés pour alimenter en courant continu de petites charges durant les heures d'ensoleillement. La puissance fournie peut fluctuer fortement en fonction de l'éclairement incident. C'est le système le plus économique



Source personnelle



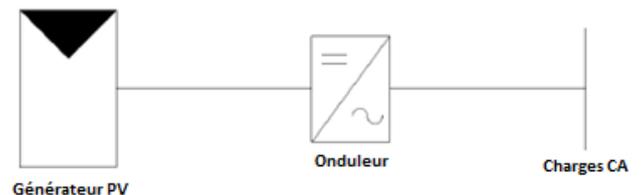
**Système à courant continu avec régulation et stockage:** Ils sont utilisés pour alimenter de petites charges en courant continu, de jour comme de nuit. Les batteries de stockage, rechargées par les modules, fournissent l'énergie à la demande, dans la limite de leur capacité.



Source personnelle



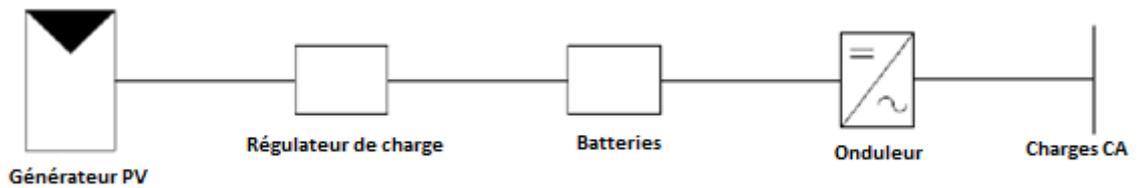
**Système à courant alternatif sans stockage:** alimente directement de petites charges en courant alternatif à travers un onduleur pendant les heures d'ensoleillement. La puissance fournie peut fluctuer en fonction de l'éclairement incident. De coût intermédiaire, il permet également d'alimenter des charges en courant continu.



Source personnelle



**Systèmes à courant alternatif avec régulation et stockage:** pour alimenter de jour comme de nuit des charges en courant alternatif. Les batteries de stockage, rechargées par les modules, alimentent dans la limite de leur capacité l'onduleur qui fournit l'énergie demandée en courant alternatif. C'est le système le plus complet et le plus sophistiqué, et donc le plus cher. Il peut aussi alimenter des charges en courant continu.



Source personnelle

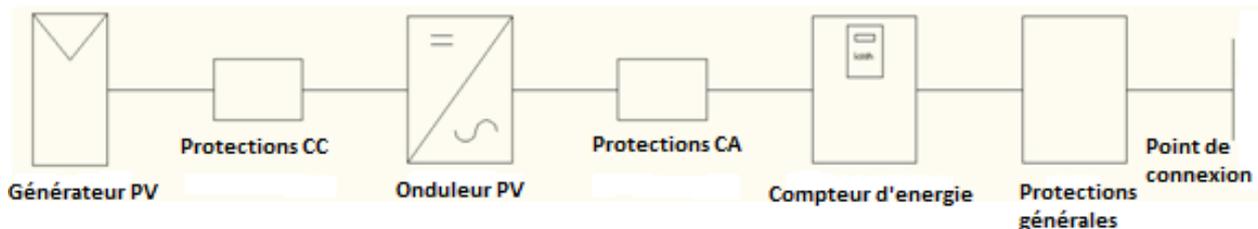
### 7.2.2. Installations connectées au réseau

Elles sont constituées d'un ensemble de modules photovoltaïques et d'un onduleur qui convertit le courant continu des modules en courant alternatif synchronisé avec le réseau, et injecte ce courant sur le réseau de distribution.

A la différence des systèmes photovoltaïques isolés, ce type d'installation est habituellement conçu pour injecter au cours de l'année le maximum d'énergie sur le réseau.

Les éléments qui composent une installation photovoltaïque connectée au réseau sont les suivants:

-  Modules photovoltaïques.
-  Structure de support.
-  Onduleur d'injection réseau.
-  Câblage et dispositifs de protection
-  Installation de raccordement au réseau (tableau de comptage et boîtier de protection générale).



Source personnelle

### 7.3. STRUCTURE DE SUPPORT

La structure de support est chargée de fixer les modules solaires, et leur donne l'orientation et l'inclinaison adéquates pour tirer le meilleur parti de l'ensoleillement. Ils doivent aussi pouvoir résister aux agents atmosphériques (efforts dus au vent, au poids de la neige, corrosion,...).

Une structure de support bien conçue facilite les travaux d'installation et de maintenance, limite la longueur du câblage et les problèmes de corrosion.

#### 7.3.1. Types de structure porteuse



##### Fixes

- ✓ Pour les installations au sol, elle est très robuste, résiste bien au vent, et facile à installer.

Ses inconvénients sont l'accès trop facile, et la plus grande probabilité d'ombres partielles.



Centrale PV SOLTEN de l'ITER. Tenerife. Source personnelle

- ✓ Sur pylône: installations placées en haut d'un mât. La surface est limitée par la résistance de ce dernier.  
Ce système s'adapte bien à l'éclairage public, aux systèmes de télécommunication, etc.



Installations de test du projet Euro-Solar de l'ITER. Tenerife

- ✓ En façade: la structure porteuse est fixée aux parois d'un bâtiment. Légère, elle proportionne une bonne sécurité en hauteur.



Maison bioclimatique avec PV - ITER - Tenerife

- ✓ En toiture: c'est l'emplacement le plus fréquemment utilisé pour une installation solaire, car il y a de fortes chances d'y trouver l'espace nécessaire, qui permette d'orienter correctement les panneaux. La fixation ne pose en général pas de problème, mais il faut veiller à rétablir une étanchéité parfaite et à empêcher toute accumulation indésirable d'eau



Bâtiment administratif avec PV - ITER - Tenerife



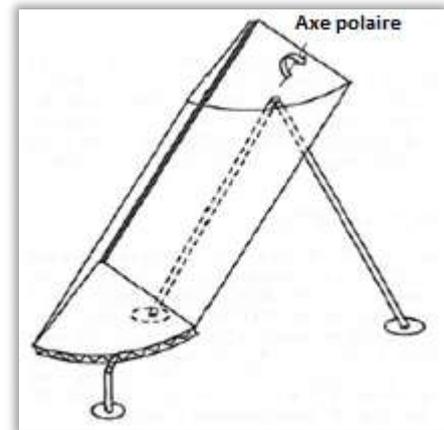
**Avec suivi.** Il s'agit d'un système de support, appelé **tracker**, qui permet de modifier l'orientation des modules au cours de la journée, pour mieux les orienter en direction du soleil et augmenter ainsi l'énergie reçue par ceux-ci.

L'augmentation d'énergie reçue par rapport à un système fixe, est de 15-20% pour un système de suivi à un seul axe, et de 30-35% pour un système à deux axes, valeur qui dépend aussi du lieu d'installation.

Les trackers peuvent être à un ou deux axes.

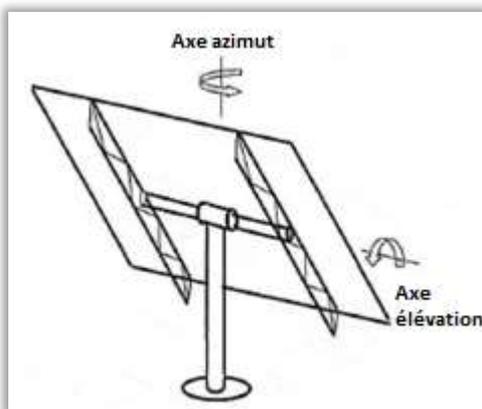
- ✓ Les trackers à un axe ne disposent que d'un seul degré de liberté de mouvement, qui est en général l'axe polaire, parallèle à celui de rotation de la terre.

### Orientation polaire



Source personnelle

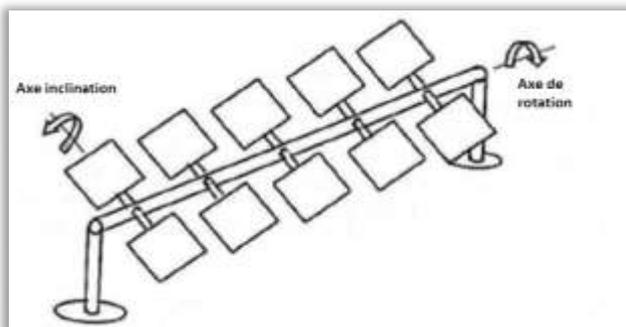
### Azimut – Elévation



Source personnelle

- ✓ les trackers à deux axes, qui disposent de deux degrés de liberté, permettent de suivre plus précisément la trajectoire du soleil. Les deux axes peuvent être disposés de manières diverses, la plus courante étant selon les axes d'azimut et d'élévation.

### Inclinaison – Rotation:



### 7.3.2.Types de matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour les structures de support dépendront du type de support, de l'environnement dans lequel ils sont placés, de la résistance mécanique nécessaire, etc... Les principaux matériaux utilisés sont les suivants:



**Aluminium:** largement utilisé pour tout type d'installation photovoltaïque, ses avantages sont la facilité pour le travailler, son faible poids, sa grande résistance, et sa maintenance nulle. Pour présenter une longue durée de vie, il est important que l'aluminium soit anodisé e.



**Acier:** ce matériau est couramment utilisé pour des installations sur pylône, qui doivent résister à des efforts mécaniques dus au vent importants. L'acier doit être galvanisé pour pouvoir résister à la corrosion.



**Acier inoxydable:** il résiste pratiquement à tous les environnements, même les plus agressifs. On l'utilise habituellement dans les installations soumises à des environnements salins. Ses inconvénients sont le coût élevé, et la difficulté pour le souder.

### 7.4. ONDULEUR D'INJECTION RESEAU

Les onduleurs sont les équipements électroniques qui transforment le courant électrique continu en courant alternatif. Ils sont équipés de composants (interrupteurs électroniques) qui "hachent" le courant continu à plus ou moins haute fréquence, en générant un signal carré. Suivant la fréquence de hachage et la forme de la tension de sortie, la qualité du courant généré sera de plus ou moins bonne qualité, allant du signal carré (le plus rudimentaire), ou pseudo-sinusoïdal (un carré amélioré), au sinusoïdal (identique à celui du réseau électrique). Enfin, ces appareils peuvent ou non incorporer un transformateur de tension pour élever la tension de sortie



Vue d'un onduleur ITER – Teide 100  
Source personnelle

Il y a quatre configurations essentielles concernant les onduleurs dans les installations photovoltaïques, qui peuvent offrir de bonnes solutions techniques adaptées aux caractéristiques du montage, à sa puissance, au climat, à la situation géographique et autres conditions locales particulières. Ces configurations sont les suivantes:



**Onduleur central:** les modules photovoltaïques sont connectés en série pour former des "strings" (branches) qui sont ensuite connectés en parallèle à un onduleur unique. Les onduleurs centraux offrent un rendement élevé, nécessitent peu de maintenance, et peuvent servir pour des centrales de puissance supérieure au MWc.

Cette configuration nécessite une tolérance serrée sur la puissance des modules, étant donné qu'il n'est pas possible de différencier les divers strings de modules photovoltaïques.

La fiabilité d'une telle installation est limitée, car elle dépend d'un inverseur unique dont un défaut entraîne l'arrêt de toute l'installation.

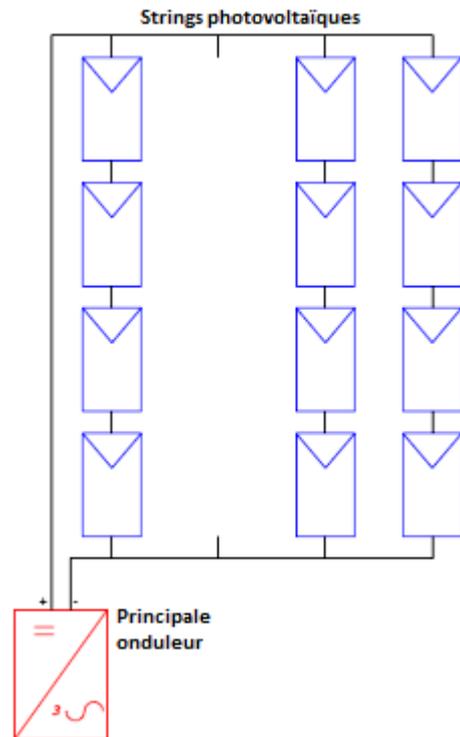


Schéma de connexion d'un onduleur central  
Source personnelle



**Onduleur de branche:** le champ photovoltaïque est réparti en différentes branches, et dans ce cas, chacune dispose de son propre onduleur. Chaque branche peut alors être optimisée séparément au point de puissance maximale. Ce type d'installation autorise des conditions d'ensoleillement différentes (inclinaison, orientation et ombrage) pour chaque string. En résulte une amélioration du rendement énergétique, de même qu'une meilleure fiabilité de l'installation.

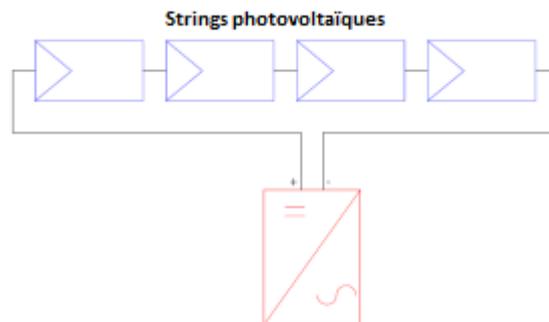


Schéma de connexion d'un onduleur de branche.  
Source personnelle



**Onduleur multi-string:** ces équipements s'apparentent à une combinaison d'onduleur central et d'onduleurs de branche. Du côté photovoltaïque, il y a plusieurs entrées de string, et du côté réseau, une seule connexion comme sur un onduleur central. Chaque string a son suivi propre de point de puissance maximal, ce qui donne à l'ensemble un rendement global de conversion meilleur que celui d'un onduleur central.

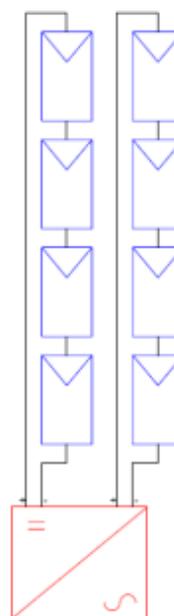


Schéma de connexion d'un onduleur multi-string.  
Source personnelle



**Onduleur intégré au module:** chaque module photovoltaïque dispose de son onduleur, ce qui élimine les pertes dues à la dispersion des caractéristiques entre les modules. Ces systèmes sont quasiment "prêts à brancher" au réseau. Ils ont pour avantage de ne pas nécessiter de câblage spécifique en courant continu. Les ombres sur un module ou la panne d'un onduleur n'affectent pas le reste de l'installation, et permettent l'emploi de modules de puissances ou caractéristiques différentes. Néanmoins, le rendement de ces onduleurs est moins élevé que celui des onduleurs plus puissants.

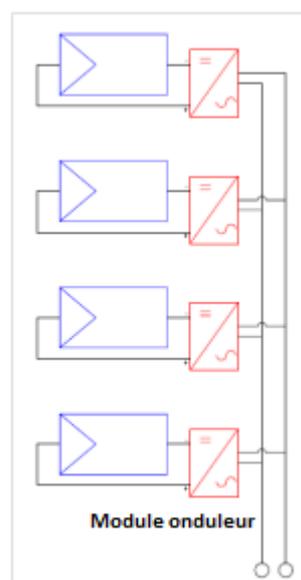


Schéma de connexion d'onduleurs intégrés.  
Source personnelle

## 7.5. ONDULEUR POUR INSTALLATION EN SITE ISOLE

Les onduleurs pour installations en site isolé (ou autonomes), sont caractérisés par les tensions d'entrée correspondant à celle des systèmes de stockage existants (12V, 24V, 36V, 48V, etc...).

Il existe actuellement des modèles chargeur-onduleur qui travaillent comme des onduleurs réversibles, c'est à dire qui sont capables non seulement d'onduler le courant continu des batteries pour générer un courant alternatif de type réseau, mais aussi de redresser le courant alternatif d'une source externe (par exemple un groupe électrogène) connectée à la sortie de l'onduleur, pour recharger la batterie.

Ceci est un avantage certain pour les installations qui disposent d'un groupe, car il est alors possible de recharger la batterie en cas de besoin sans nécessiter d'appareil supplémentaire.

## 7.6. REGULATEUR DE CHARGE

Dans les installations en site isolé, les modules photovoltaïques doivent fournir une tension supérieure à la tension nominale des batteries pour deux raisons:



La tension nominale du module photovoltaïque doit pouvoir pallier à la baisse de tension apparaissant lorsque la température augmente.

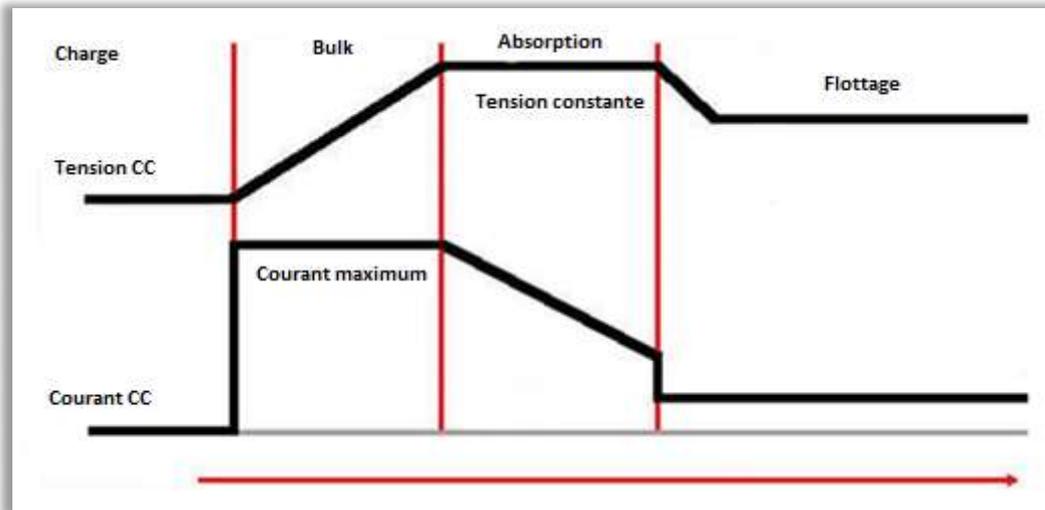


La tension en circuit ouvert du module photovoltaïque doit toujours être supérieure à la tension maximale de la batterie, de manière à pouvoir la charger correctement, ainsi dans le cas d'une batterie de 12V, il est nécessaire de pouvoir atteindre au minimum 14V .

La mission du régulateur de charge est entre autres d'éviter la surcharge de la batterie, néfaste à sa longévité, en limitant la tension fournie par les modules. Il est souvent également utilisé pour éviter une décharge trop profonde de la batterie, tout aussi préjudiciable à sa durée de vie.

Le cycle de charge peut être plus ou moins sophistiqué suivant les appareils, toujours dans le but de protéger au maximum la batterie, et d'en tirer la meilleure longévité.

Les différentes phases de la charge d'une batterie peuvent être résumées ainsi:



Etapes de charge batterie d'un régulateur de charge. Source personnelle.

#### 7.6.1. Bulk (courant constant)

La batterie est chargée à courant constant jusqu'à atteindre 80-90% de la charge totale. On passe ensuite à l'étape suivante:

#### 7.6.2. Absorption (tension constante)

La tension est maintenue constante jusqu'à la charge complète. Durant cette étape, l'intensité diminue progressivement.

#### 7.6.3. Floating (charge d'entretien)

La tension de régulation est plus faible, ainsi que le courant qui est destiné à compenser l'autodécharge de la batterie.

#### 7.6.4. Egalisation

Cette phase est utilisée uniquement dans le cas de batteries à électrolyte liquide. En appliquant une tension plus élevée que lors de l'absorption, et à courant réduit, on provoque l'apparition de bulles de gaz, qui brassent l'électrolyte en remontant à la surface, ce qui permet de l'homogénéiser, et de réduire la sulfatation des plaques.

## 7.7. SYSTEME ACCUMULATEUR

La mission principale de l'accumulateur dans un système photovoltaïque est de pouvoir fournir à tout moment la puissance demandée par la charge, indépendamment de la production électrique à ce moment précis.

Il permet une certaine autonomie du système, et peut alimenter les charges durant plusieurs jours, lorsque la production est trop faible à cause par exemple de mauvaises conditions météorologiques.

Dans un accumulateur ou batterie, l'énergie est présente sous la forme d'énergie chimique potentielle et peut-être convertie en électricité et vice-versa. La batterie se compose essentiellement de deux électrodes plongées dans un électrolyte où se produisent les réactions chimiques lors des processus de charge et de décharge.

La **capacité** d'un accumulateur se mesure en ampères-heures (Ah), pour une durée de décharge déterminée. Elle se définit comme la quantité d'électricité qui peut être obtenue lors de la décharge complète de l'accumulateur initialement chargé à 100%, produit de l'intensité de décharge par la durée de celle-ci.

Le **rendement de charge** est défini comme étant le rapport entre l'énergie électrique restituée lors de la décharge d'une batterie, et l'énergie reçue durant le processus de charge. Un rendement de 100% correspondrait à une batterie capable de restituer la totalité de l'énergie utilisée pour la charger.

Le nombre de **cycles de charge / décharge** que peut supporter une batterie dépend essentiellement de la **profondeur de décharge** de celle-ci, à plus grande profondeur de décharge correspond un

nombre de cycles plus faible, et une durée de vie utile plus courte de la batterie.

Tous les systèmes accumulateurs souffrent aussi de l'**autodécharge**, qui consiste en une perte graduelle au cours du temps de l'énergie accumulée, due à des processus internes dans la batterie qui n'ont rien à voir avec la décharge proprement dite.



Freedigitalphotos.net

Un système d'accumulateur adapté à l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque doit réunir les caractéristiques suivantes:

-  Accepter la totalité de la puissance de charge que peut fournir l'installation photovoltaïque.
-  Maintenance nulle ou minimale.
-  Transport et installation facile.
-  Faible autodécharge.
-  Rendement élevé.
-  Longue durée de vie utile.

Les batteries les plus couramment utilisées dans les applications solaires photovoltaïques, sont celles au plomb, dont les types les plus fréquents sont les suivants:

TECHNOLOGIE	AGM	GEL	LIQUIDE
Tension	6V y 12V	2V, 6V y 12V	12V
Capacité C <sub>20</sub>	33Ah – 225Ah	24Ah – 225Ah	25Ah – 170Ah
Position de montage	Toute position	Toute position	Debout seulement
Gamme de températures	-40°C a 72°C	-20°C a 50°C	-10°C a 50°C
Courant de charge	CC, toute intensité	CC, 25%-50% de la capacité de la batterie	CC, 10% de la capacité
Temps d'autodécharge (à partir de 100%)	90%de la charge restant au bout de deux ans	85%de la charge restant au bout de deux ans	35%de la charge restant au bout de huit mois
Poids	11kg – 74kg	10kg – 70kg	15kg – 80kg
Vie utile (profondeur de décharge 50%)	950 -1000 cycles	550 – 600 cycles	350 – 400 cycles
Décharge max. acceptable	100% (10,5V)	Autour de 75%	Autour de 55% - 60%
Ventilation du local	Non nécessaire	Nécessaire	Nécessaire
Possible perte d'électrolyte	Non	Possible perte de gel	Possible perte de liquide

Caractéristiques selon le type de batteries  
Source personnelle.

## 8. CALCUL DE LA PRODUCTION D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE

Lors de la conception d'une installation solaire photovoltaïque, trois facteurs principaux sont à déterminer: l'orientation, l'inclinaison, et les possibles ombres portées sur les panneaux photovoltaïques.

### 8.1. ORIENTATION ET INCLINAISON

L'orientation des modules se fera vers le Sud dans l'hémisphère Nord, et vers le Nord dans l'hémisphère Sud, cette orientation étant celle qui récupère au mieux l'énergie émise par le soleil.

Suivant la latitude du lieu d'installation, on pourra accepter une déviation par rapport à cette orientation optimale, sachant que les pertes associées augmentent en conséquence, et avec la latitude du lieu considéré.

L'inclinaison des modules photovoltaïques dépendra de l'usage de l'installation: dans le cas d'installations de vente d'électricité au réseau, l'inclinaison optimale est celle qui capte le maximum d'énergie annuelle, calculée de la manière suivante:

*Inclinaison optimale* \* = latitude du lieu - 10°  
(\* pour un pays de latitude similaire à l'Espagne)

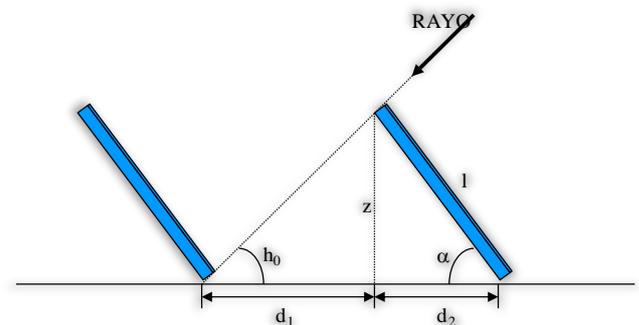
Au contraire, dans le cas où il s'agit par exemple d'alimenter des consommations constantes au cours de l'année, l'inclinaison devra en priorité capter le soleil des mois les plus défavorables, et dans ce cas l'inclinaison sera la suivante:

*Inclinaison optimale* = latitude du lieu + 10°

### 8.2. OMBRES PORTEES ENTRE RANGÉES DE MODULES

La séparation entre les rangées influe sur l'énergie produite par l'installation: plus les rangées sont séparées, moins il y a d'ombres projetées d'une rangée sur l'autre, et plus la récolte d'énergie est élevée. Néanmoins, le coût du système augmente avec la séparation, à cause de la plus grande surface occupée, et de la longueur accrue du câblage. Il faudra donc faire un choix et décider du compromis optimum entre coût d'investissement et captation d'énergie.

On recommande habituellement entre rangées de modules, ou entre une rangée et un obstacle de hauteur  $h$  susceptible de projeter une ombre, une distance ( $d$ ) moyenne horizontale qui garantisse au moins 4 heures de soleil au voisinage de midi le jour du solstice d'hiver (21 décembre).



La formule permettant le calcul de cette séparation entre rangées de modules, ou entre une rangée et le premier obstacle de hauteur  $h$ , est la suivante:

$$d = z \times k$$

Où  $k$  vaut:  $k = 1/\tan(61^\circ - \text{latitude})$

$k$  est un facteur sans dimension

### 8.3. ENERGIE REÇUE PAR LE SOLEIL

La quantité d'énergie reçue du soleil (ensoleillement) et la demande énergétique (dans le cas d'installations photovoltaïques isolées) sont les deux données principales à prendre en compte dans la conception d'un système solaire photovoltaïque.

Les données d'ensoleillement dépendent directement du lieu d'implantation du système, et des conditions météorologiques prédominantes et particulières qu'on peut y trouver.

Les valeurs d'ensoleillement trouvées dans les bases de données, sont en général le résultat de mesures effectuées sur plusieurs années. De cette manière, les moyennes tant annuelles que mensuelles de l'ensoleillement et autres variables, corrigent les effets de la variabilité météorologique, gommant ainsi les périodes prolongées de temps exceptionnel qui pourraient apparaître certaines "bonnes" ou "mauvaises" années. Les valeurs se basant sur une période d'observation et de mesures de cinq ans ou plus offrent la plupart du temps une bonne fiabilité.

Les sources de données d'ensoleillement sont variées (réseau de stations météorologiques, modèles climatiques, atlas solaires, etc...). Le choix adéquat de la base de données qu'on utilisera est d'une importance capitale, et dans tous les cas, il est conseillé de comparer les diverses sources disponibles qui concernent le site d'implantation de l'installation photovoltaïque en projet.

Les données d'ensoleillement que l'on trouvera nous fourniront les valeurs moyennes d'irradiation sur une surface horizontale, ou **Irradiation Globale Horizontale (IGH)**.

Pour pouvoir calculer les pertes dues à l'inclinaison et à l'orientation de notre installation photovoltaïque, il nous est nécessaire de connaître l'irradiation globale optimale (IGO), qui correspond à l'inclinaison qui capte le maximum d'énergie solaire au cours de l'année.

*L'angle d'inclinaison optimum qui maximise la captation de l'énergie reçue du soleil par notre système photovoltaïque, dépend de la latitude où il sera installé.*

*Inclinaison optimale\* = latitude du lieu - 10°  
(\* pour l'Espagne)*

Dans le cas de vente d'énergie au réseau, on cherche à maximiser l'énergie injectée, auquel cas on utilisera l'inclinaison optimale. Par contre, dans d'autres cas, le critère pourra être différent.

*Dans les systèmes photovoltaïques en site isolé, le meilleur angle d'inclinaison ne correspondra pas nécessairement l'inclinaison optimale.*

Dans le cas d'une installation isolée par exemple, on cherchera en priorité à couvrir les besoins énergétiques durant les mois les plus défavorables, et on utilisera alors une inclinaison plus forte qui maximisera la captation énergétique durant cette période en particulier.

Une fois calculé cet angle d'inclinaison, et en fonction de la latitude du lieu, on **multiplie l'IGH par le facteur k** sans dimension, qui dépend de la latitude du lieu, et représente l'augmentation ou la diminution de radiation solaire captée par une surface orientée de manière optimale par rapport à la radiation reçue par une surface horizontale.

Au résultat qui est l'**IGO (Irradiation Globale Optimale)**, on applique ensuite les pertes dues aux éventuelles différences d'orientation de notre installation par rapport à l'optimum, qui peuvent résulter des contraintes liées au lieu d'implantation.

On trouvera des tableaux ou diagrammes qui estiment les pertes dues à une inclinaison et orientation différentes de l'optimum, et qui permettent de corriger le calcul énergétique pour les conditions spécifiques à une installation en particulier.

Une fois décomptées de l'irradiation globale optimale les pertes en question, on obtient ladite **Irradiation Globale Incidente (IGI)**, qui estime la quantité d'énergie solaire réellement incidente sur le système.

*Le processus de calcul de l'IGI décrit ci-dessus est un exemple de méthode manuelle basée sur des tableaux et abaques, dont le but est essentiellement didactique.*

*En pratique, les professionnels utilisent plutôt des logiciels adaptés qui donnent des résultats rapidement et avec une grande précision. De nombreux logiciels gratuits ou payants sont disponibles sur le web.*

Entre la radiation solaire incidente et l'énergie électrique générée disponible pour consommation ou injection au réseau, interviennent différents processus qui sont à l'origine de pertes supplémentaires. Ces pertes sont regroupées dans le coefficient de performance, ou **Performance Ratio (PR)** en anglais.

Le **coefficient de performance** englobe les pertes suivantes:

### 8.3.1.Ombres

Les pertes peuvent être dues à des obstacles qui projettent leurs ombres sur les modules, ou aux ombres portées entre rangées de modules. Elles sont souvent de l'ordre de 2%, mais doivent être calculées au cas par cas.

### 8.3.2.Saleté des modules

Due au dépôt de poussière et autres saletés sur la surface active des modules. Elle augmente avec la proximité de terrains érodés et de voies de transit. Les pertes sont estimées aux alentours de 2% et peuvent être réduites par un nettoyage planifié.

### 8.3.3.Pertes de câblage

Ce sont les pertes par effet Joule dans les conducteurs, qui peuvent être limités par l'optimisation du câblage et le choix correct de la section. Elles sont généralement de l'ordre de 1,5%.

### 8.3.4.Dispersion des caractéristiques des modules

La puissance de modules d'un même modèle peut varier, selon les tolérances du processus industriel de fabrication. La connexion en série de ces modules présentera des caractéristiques qui dépendront du module le plus faible. On peut diminuer ces pertes (qui sont souvent de l'ordre de

3%) en utilisant des modules préalablement triés (flash report).

### 8.3.5. Température du module

La réponse en tension à l'éclairement solaire des cellules d'un module est grandement influencée par la température. Ce type de pertes dépend du mois de l'année, mais aussi de la ventilation naturelle (amélioration dans les zones ventées). Ces pertes peuvent être de l'ordre de 8%.

### 8.3.6. Rendement de l'onduleur

Ces pertes sont dues à la transformation du courant continu généré par le champ photovoltaïque, en courant alternatif nécessaire pour l'injection réseau. Il dépend en dernier ressort du choix de l'onduleur, et de sa configuration électrique. Ces pertes sont de l'ordre de 4%.

### 8.3.7. Pertes angulaires ou spectrales

Les premières correspondent aux pertes dues à un angle d'incidence non idéal (perpendiculaire) à la surface du panneau. Les secondes proviennent de la

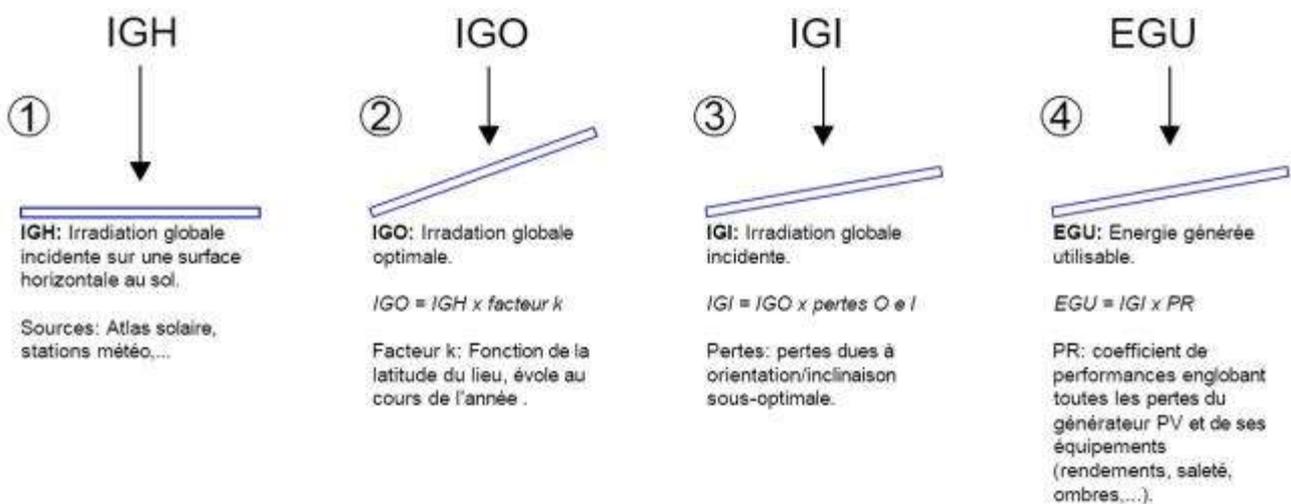
variation de courant due à un spectre de la lumière incidente différent du spectre normalisé. Ces pertes sont estimées à 2%.

Dans tous les cas, l'objectif lors de la conception d'une installation photovoltaïque, est de réduire au minimum les différentes pertes, de manière à augmenter tant que possible le rendement de l'installation photovoltaïque.

Chaque mois de l'année nous donnera un coefficient de performance **PR** différent, qui nous permettra de calculer l'énergie produite durant cette période à partir de l'irradiation globale incidente IGI sur notre installation, et d'en déduire par sommation la production énergétique annuelle.

En résumé, les étapes à suivre pour le calcul de la production d'une installation solaire photovoltaïque sont indiquées dans le diagramme suivant:

## DIAGRAMME DE LA METHODE DE CALCUL DE LA PRODUCTION PV





## PARTENAIRES



## COFINANCEMENT



## PLUS D INFORMATION

Participez aux séminaires et aux journées techniques, sur notre page web ou sur Facebook; ou envoyez-nous vos questions ou suggestions à cette adresse de courrier électronique:

@ [macsenvp@iter.es](mailto:macsenvp@iter.es)

 <http://macsen-pv.iter.es>

 [www.facebook/MacsenPV](http://www.facebook/MacsenPV)