

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



Université Salah Bounider Constantine 3
Institut Gestion des Techniques Urbaines

POLYCOPIE DES COURS
GESTION ENERGETIQUE

NIVEAU MASTER 2 :
Gestion des changements environnementaux
En Méditerranée (MEHmed).

Enseignante : Dr BENHARKAT Sarah

TABLE DES MATIERES

Avant-propos	01
Cours 1 : Notions sur l'énergie	02
1-Définition d'énergie	02
2-Unités de mesure de l'énergie	02
3-Déclinaisons de l'énergie :	02
3.1-Energie primaire	02
3.2-Energie secondaire	03
3.3-Energie finale	03
3.4-Energie utile	03
4-Les formes d'énergie :	04
4.1-Energie mécanique	04
4.2-Energie thermique ou calorifique	04
4.3-Energie chimique	04
4.4-Energie rayonnante	04
4.5-Energie électrique	04
4.6-Energie nucléaire	05
4.7-Energie hydraulique	05
5-Les sources d'énergie :	05
5.1-Les énergies fossiles :	05
5.1.1. Le pétrole	06
5.1.2- Le gaz	06
5.1.3- Le charbon	06
5.2-Les énergies fissiles	06
5.3-Les énergies renouvelables	07
6- Le Bouquet ou Mix énergétique	07
7-L'empreinte carbone	07
8-Le pouvoir calorifique :	08
Cours 2 : Les énergies renouvelables	10
1-Définition des énergies renouvelables	10
2-L'énergie solaire :	11
2.1-L'énergie solaire thermique	11
2.2-L'énergie solaire photovoltaïque	12

2.3- L'énergie solaire thermodynamique :	13
2.4-Inconvénients de l'énergie solaire	14
3-L'énergie éolienne :	14
3.1-Définition	14
3.2-Composants d'une éolienne	14
3.3-Capacité de production	15
3.4-Règles d'implantation	16
3.5-Inconvénients de l'énergie éolienne	16
4-La biomasse :	16
4.1-Définition :	16
4.2-Types de biomasse :	17
4.3-Application :	18
4.4-Les avantages de l'énergie biomasse :	18
4.5-Les inconvénients de l'énergie biomasse :	19
5-La géothermie :	20
5.1-Définition :	20
5.2-Types de géothermie :	20
5.2.1-La géothermie très basse énergie : ($T < 30^{\circ}\text{C}$)	20
5.2.2- La géothermie basse énergie ($30^{\circ}\text{C} < T < 90^{\circ}\text{C}$) :	20
5.2.3-La géothermie moyenne énergie ($90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$):	20
5.2.4-La géothermie haute énergie :	20
5.3-Application :	21
5.4-Avantages de la géothermie :	21
5.5-Inconvénients de la géothermie :	22
6-L'énergie hydraulique :	22
6.1-Définition :	22
6.2-Technologie :	22
6.3-Types de centrales hydroélectriques :	23
6.3.1-Centrale hydroélectrique de haute chute	23
6.3.2-Centrale hydroélectrique de moyenne chute	23
6.3.3-Centrale hydroélectrique de basse chute	23
6.3.4-Station de transfert d'énergie par pompage (STEP)	23
6.4-Avantages de l'énergie hydraulique	23

6.5-Inconvénients de l'énergie hydraulique	24
Cours 03 : Transition énergétique	25
1-Définition de la transition énergétique	25
2-Aperçu historique sur la transition énergétique	25
3-Les enjeux de la transition énergétique	26
4-Aperçu sur le contexte énergétique mondiale	27
5-Aperçu sur le contexte énergétique dans le bassin méditerranéen	28
6-Aperçu sur le contexte énergétique nationale	29
6.1-Production d'énergie :	29
6.2-Consommation d'énergie :	30
7-La transition énergétique en Algérie :	31
7.1-Le programme national des énergies renouvelables :	31
7.1.1-Potentiel solaire :	32
7.1.2-Potentiel éolien :	33
7.1.3-Potentiel géothermique :	33
7.1.4-Potentiel en biomasse :	33
7.2- Le programme national d'efficacité énergétique :	35
7.3-la stratégie nationale de développement de l'hydrogène	36
Cours 4 : L'efficacité énergétique dans le bâtiment	38
1-Définition de l'efficacité énergétique :	38
2-Avantages de l'efficacité énergétique :	38
3-Les leviers de l'efficacité énergétique :	39
4-L'efficacité énergétique passive :	40
4.1-Implantation et orientation du bâtiment	40
4.2-Organisation spatiale intérieure du bâtiment	41
4.3 -L'enveloppe du bâtiment :	41
4.3.1-Le choix des matériaux	42
4.3.2-L'isolation thermique :	43
4.3.3-L'enveloppe végétalisée :	43
4.3.4-Les Fenêtres	44

4.4-L'éclairage naturel	45
5-L'efficacité énergétique active :	45
Cours 5 : Certification énergétique des bâtiments	48
1-Certificat de Performance Énergétique	48
2-Certification BREEAM	50
3-Certification LEED	51
4-Le label Haute Qualité Environnementale HQE	53
Cours 6 : Bâtiments intelligents	56
1-Définition du bâtiment intelligent :	56
2-Caractéristiques du bâtiment intelligent :	56
3-Fonctions du bâtiment intelligent :	57
4-Objectifs du bâtiment intelligent	58
5-Les technologies du bâtiment intelligent :	58
5.1-La Domotique	58
5.2-L'immutique	59
5.2.1-Définition :	59
5.2.2-Principe de l'immutique :	59
5.2.2-Les différents types d'immutique :	60
a) La Gestion Technique Centralisée (GTC)	60
b) La Gestion Technique de Bâtiment (GTB)	60
6-Les étapes d'un projet de bâtiment intelligent :	62
7-Les réseaux électriques intelligents « smart grids »	63
7.1-Définition du réseau électrique intelligent :	63
7.2-Caractéristiques du réseau électrique intelligent :	64
7.3-Les composantes du réseau électrique intelligent :	64
7.4-Les clés de fonctionnement des réseaux électriques intelligents :	65
7.5-Exemple de réseau électrique intelligent :	67
Cours 7 : Efficacité énergétique des installations industrielles	68
1-Enjeux de Efficacité Énergétique en industrie :	68
2-Les catégories d'industries selon la consommation énergétique :	69
3-Les outils/instruments de l'efficacité énergétique en industrie :	69

3.1-Système de Management de l'Energie : SME	69
3.1.1-Définition du SME:	69
3.1.2-Rôles du SME:	70
3.1.3-Objectifs du SME:	70
3.1.4-Cadre règlementaire du SME:	70
3.1.5-Le cycle PDCA dans le système de management de l'énergie :	72
3.1.6-Les indicateurs de performance énergétique en industrie :	74
3.1.7-Stratégies opérationnelles du SME:	75
3.2-AUDIT ENERGETIQUE	76
3.2.1-Définitions :	76
3.2.2-Cadre règlementaire :	76
3.2.3-Bénéfices de l'audit énergétique :	77
3.2.4-Objectifs de l'audit énergétique :	78
3.2.5-Portée de l'audit énergétique :	78
3.2.6-Etablissements concernés par l'audit énergétique :	78
3.2.7-Le métier d'auditeur énergétique :	79
3.2.8-Principes du succès de l'audit énergétique :	79
3.2.9-Types d'audit énergétique :	80
3.2.10-Procédure d'audit énergétique	83
3.3- Exemples de mesures d'efficacité énergétique en industrie :	86
Bibliographie	94

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Les déclinaisons de l'énergie	03
Figure 1.2: Les différentes formes d'énergie et leur conversion	05
Figure 1.3: Avantages des énergies fossiles	06
Figure 1.4: Mix énergétique mondiale en 2021	07
Figure 1.5: Empreinte carbone de différentes sources d'énergie primaire	08
Figure 2.1 : Les cinq familles des énergies renouvelables	10
Figure 2.2: Procédés d'utilisation directe de l'énergie solaire thermique.	11
Figure 2.3 : Composantes d'un panneau solaire thermique type « plan vitré ».	12
Figure 2.4 : Composantes d'un panneau solaire photovoltaïque.	13
Figure 2.5 : Centrale solaire thermodynamique Noor à Ouarzazate –Maroc.	14
Figure 2.6 : Composantes d'une éolienne en hélice.	15
Figure 2.7 : Types d'éoliennes.	15
Figure 2.8 : Les différentes filières de valorisation énergétique de la biomasse	18
Figure 2.9 : Types de géothermie.	21
Figure 2.10 : Composantes d'une centrale hydroélectrique	22
Figure 3.1 : Evolution de la demande mondiale en énergie primaire	27
Figure 3.2 : Evolution de la consommation d'énergie primaire en méditerranée	28
Figure 3.3 : Production d'énergie primaire par pays en méditerranée	29
Figure 3.4 : Consommation d'énergie primaire par pays en méditerranée	29
Figure 3.5: Structure de la production d'énergie primaire et secondaire en Algérie	30
Figure 3.6: Structure de la consommation par forme d'énergie et par produit en Algérie	30
Figure 3.7 : Structure de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité en Algérie	31
Figure 3.8: Potentiels en énergies renouvelables en Algérie	34
Figure 3.9: Centrale solaire d'Oued N'chou (à gauche) et centrale éolienne de Kebertène (à droite)	34
Figure 4.1 : Utilisation de l'énergie par un système	38
Figure 4.2 : les trois leviers de l'efficacité énergétique	39
Figure 4.3 : Implantation et orientation optimales du bâtiment.	40

Figure 4.4 : Les sources de déperdition de chaleur de l'enveloppe du bâtiment	41
Figure 4.5 : Exemples de matériaux biosourcés	42
Figure 4.6 : Les types d'isolants thermiques	43
Figure 4.7 : Les murs (à gauche) et les toitures (à droite) végétalisés	44
Figure 4.8 : Valeurs U_w de différents types de vitrage.	44
Figure 5.1: Etiquettes énergétique et environnementale d'un bâtiment.	49
Figure 5.2: Les familles de critères de la certification BREEAM.	50
Figure 5.3 : Le bâtiment Kampusareena en Finlande certifié « BREEAM Very good »	51
Figure 5.4 : Les familles de critères de la certification LEED.	52
Figure 5.5 : The Crystal Building à Londres certifié LEED platine.	53
Figure 5.6: Les 14 cibles de la démarche HQE.	54
Figure 5.7 : Ecole Daniel Pennac (France) –bâtiment HQE	55
Figure 6.1 : Les trois fonctions du bâtiment intelligent	57
Figure 6.2 : Exemples d'application de la domotique	59
Figure 6.3 : système de Gestion Technique du Bâtiment	61
Figure 6.4 : Les composantes du réseau électrique intelligent	65
Figure 6.5 : Le projet de IssyGrid (Issy-les-Moulineaux -France)	67
Figure 7.1: Famille ISO 50000	71
Figure 7.2 : Contenu de la norme ISO 50001	71
Figure 7.3 : Le cycle PDCA dans la norme ISO 50001	73
Figure 7.4 : vue générale sur le système de management de l'énergie	76
Figure 7.5: Les trois types d'audit énergétique selon ISO 50002	81
Figure 7.6 : Les étapes de l'audit énergétique selon ISO 50002	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Les valeurs des pouvoirs calorifiques et les facteurs d'émission carbone de différents combustibles	09
Tableau 2.1 : Principales biomasses utilisées pour la production d'énergie	17
Tableau 3.1: Objectifs du programme national des énergies renouvelables	32
Tableau 4.1 : Les différentes classes des systèmes d'éclairage.	47
Tableau 4.2 : les différentes classes des systèmes de ventilation	47
Tableau 5.1 : Comparaison entre les certificats BREEAM, LEED et HQE.	55
Tableau 6.1 : comparaison entre un réseau électrique traditionnel et un réseau intelligent	65
Tableau 7.1 : Exemples d'indicateurs de performance énergétique (IPE) en industrie	75
Tableau 7.2: Etablissements GCE concernés par l'audit énergétique en Algérie	79
Tableau 7.3: Etablissements concernés par l'audit énergétique dans différents pays	79
Tableau 7.4: Exemples de mesures d'efficacité énergétique en industrie	86

Avant-Propos

Les énergies fossiles qui constituent jusqu'à présent la plus grande part du mix énergétique mondial, sont de loin les plus grands contributeurs au changement climatique mondial ; ils sont responsables de plus de 75 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre et de près de 90 % de toutes les émissions de dioxyde de carbone CO₂.

L'objectif de ce cours consiste à comprendre cette relation énergie-changement climatique qui permettrait d'envisager des solutions d'atténuation des changements climatiques. La transition vers des énergies renouvelables décarbonées fait partie de ces principales solutions.

Il s'agit également de discuter l'intérêt de la diversification des sources d'énergies et les potentialités de l'Algérie dans le domaine.

Le cours vise également à présenter aux étudiants des données relatives à la transition énergétique et l'efficacité énergétique dans les différents domaines (bâtiment et industrie) ainsi que les différents outils qui permettraient d'atteindre cette performance tels que l'audit énergétique, la certification énergétique et le système de management de l'énergie.

Le cours est destiné plus particulièrement aux étudiants du master international ERASMUS + sur la « gestion du changement environnemental en Méditerranée » de la filière « gestion technique urbaine et gestion des villes » et peut s'appliquer à toutes les autres spécialités.

Cours 1 : Notions sur l'énergie

1-Définition de l'énergie :

Etymologiquement, le mot Energie est tiré du grec Energia qui signifie « force en action ».

En physique, l'énergie est une grandeur mesurant la capacité d'un système à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction (Larousse, 2016).

2-Unités de mesure de l'énergie :

-En physique, l'unité de mesure de l'énergie dans le système international est le **Joule (J)**.

-En électricité, on utilise le **Wattheure** et le **kilowattheure** qui est une unité commerciale d'énergie électrique. C'est l'énergie produite (ou consommée) en une heure par un générateur (ou un récepteur) de puissance moyenne égale à 1 kW. Symbole : kWh

-En médecine, on utilise **la calorie** qui fait référence à la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 gramme d'eau pour augmenter sa température de 14,5 à 15,5°C.

-Dans le contexte économique, l'énergie est souvent exprimée en **tonne équivalent pétrole (tep)** ; équivalence **1 tep = 11 630 kWh = 41,8 GJ**

1 tep correspond à l'énergie produite par combustion d'une tonne de pétrole brut standard :

-Un baril de pétrole standard (159 litres) fournit environ 0,14 tep ou 1 700 kWh (**le baril** est également une unité d'énergie).

-la combustion d'une tonne de bois de chauffage fournit une quantité d'énergie comprise entre 0,3 et 0,5 tep.

Dans le cas du charbon, on utilise également **la tonne équivalent charbon [tec]** :

$$1 \text{ tec} = 8\,140 \text{ kWh}$$

3-Déclinaisons de l'énergie :

3.1-Energie primaire :

Elle correspond à l'ensemble des produits énergétiques issus de phénomènes naturels non transformés, exploités directement ou importés. On citera comme exemple le pétrole brut et le gaz naturel.

3.2-Energie secondaire :

Il s'agit de l'énergie obtenue par transformation (ou conversion) d'une énergie primaire. Dans le cas d'une centrale nucléaire par exemple, il s'agit de l'énergie électrique produite par transformation d'énergie thermique. On citera également les carburants, le propane, le butane et l'hydrogène.

3.3-Energie finale :

L'énergie finale est celle qui est transportée et qui arrive au point de consommation et affichée sur le compteur. Elle subit des pertes de 1 à 3% (notamment lorsque l'électricité est produite de façon centralisée et doit être transportée sur de longues distances), exemple: électricité domestique, gaz de réseau ou en bouteille, essence à la pompe.

3.4-Energie utile :

L'énergie utile est celle qui procure le service énergétique recherché (chauffage, éclairage, eau chaude sanitaire ECS.....). Il s'agit de l'énergie finale pondérée par le coefficient de performance de l'appareil.

Par exemple, l'énergie finale requise pour le fonctionnement d'une ampoule à incandescence pendant une heure est de 100 Wh, mais l'énergie utile correspondant à la production de lumière est seulement de 5 Wh (les 95 Wh restants sont dégagés sous forme de chaleur).(Glatigny D, SD)

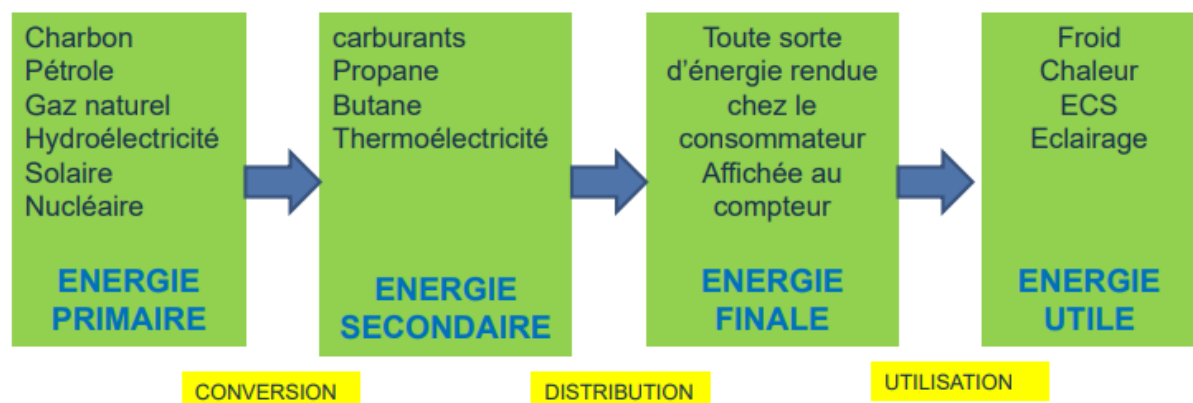


Figure 1.1: Les déclinaisons de l'énergie

4-Les formes d'énergie :

Il existe sept formes principales de l'énergie : l'énergie mécanique, l'énergie thermique ou calorifique, l'énergie chimique, l'énergie rayonnante, l'énergie électrique, l'énergie nucléaire et l'énergie hydraulique.

4.1-Energie mécanique :

L'énergie mécanique est la somme de l'énergie cinétique et l'énergie potentielle qui sont associées aux objets :

- L'énergie cinétique est l'énergie des objets en mouvement.

- L'énergie potentielle est l'énergie stockée dans les objets immobiles.

4.2-Energie thermique ou calorifique :

L'énergie thermique dégagée par un corps résulte d'une agitation désordonnée de ses molécules et de ses atomes : Il s'agit d'une partie de l'énergie interne d'un corps. Les transferts thermiques se font par trois modes : conduction, convection et rayonnement.

4.3-Energie chimique :

Certaines réactions chimiques, comme la combustion, sont capables de briser les liaisons entre les atomes constituant les molécules, ce qui libère de l'énergie.

4.4-Energie rayonnante :

L'énergie rayonnante correspond aux rayonnements reçus. Les rayonnements sont de natures différentes suivant leur longueur d'onde (ondes radio, rayonnement visible, rayons Ultra-Violets, rayons X, etc.) mais ont en commun de pouvoir se déplacer même dans le vide et ceci à la vitesse de la lumière.

4.5-Energie électrique :

L'énergie électrique naît du déplacement des électrons dans un conducteur. Sa production est issue de la consommation d'autres formes d'énergie, donc il s'agit d'une énergie secondaire.

4.6-Energie nucléaire :

L'énergie nucléaire est l'énergie stockée au cœur des atomes, plus précisément dans les liaisons entre les particules (protons et neutrons) qui constituent leur noyau. En transformant les noyaux atomiques, les réactions nucléaires s'accompagnent d'un dégagement de chaleur.

4.7-Energie hydraulique :

L'énergie hydraulique exploite les mouvements de l'eau actionnés par le soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées (énergie marémotrice), les vagues (énergie houlomotrice) et les courants marins.

(<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie>)

Utiliser et générer de l'énergie signifie toujours convertir une forme d'énergie en une autre. Les conversions d'énergie peuvent se produire d'une forme d'énergie vers pratiquement n'importe quelle autre comme le montre la figure 1.2.

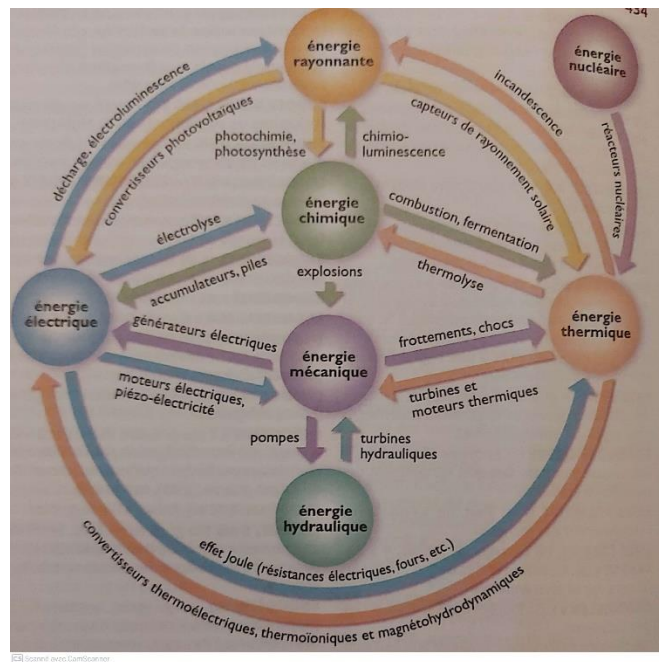


Figure 1.2: Les différentes formes d'énergie et leur conversion (Larousse, 2016)

5-Les sources d'énergie :

5.1-Les énergies fossiles : Les énergies fossiles se définissent par des énergies issues de la méthanisation de matières organiques enfouies dans le sol depuis des millions d'années. Les différents types d'énergies fossiles sont :

5.1.1. Le pétrole : Cette énergie est issue de la sédimentation en milieu marin de matière organique telles que les algues ou le plancton. Ces matières se retrouvent par la suite transformées en kérogène avant de devenir du pétrole. Il s'agit d'une énergie énormément utilisée car elle est facile à transporter. ;

5.1.2- Le gaz : De la même manière que le pétrole, le gaz naturel est généré à partir de la sédimentation de matières organiques en milieu marin et de la transformation en kérogène. Les températures et les pressions sont en revanche plus élevées : c'est ce qui permet d'obtenir du gaz naturel. Cette énergie est relativement complexe à transporter étant donné son état gazeux et hautement inflammable.

5.1.3- Le charbon : Le charbon est directement issu d'un kérogène formé à partir de biomasse végétale. Par la suite, c'est la pyrolyse du kérogène végétal qui permet d'obtenir le charbon. Très énergétique, le charbon permet de produire de l'électricité et de la chaleur à moindre coût mais il est très polluant.

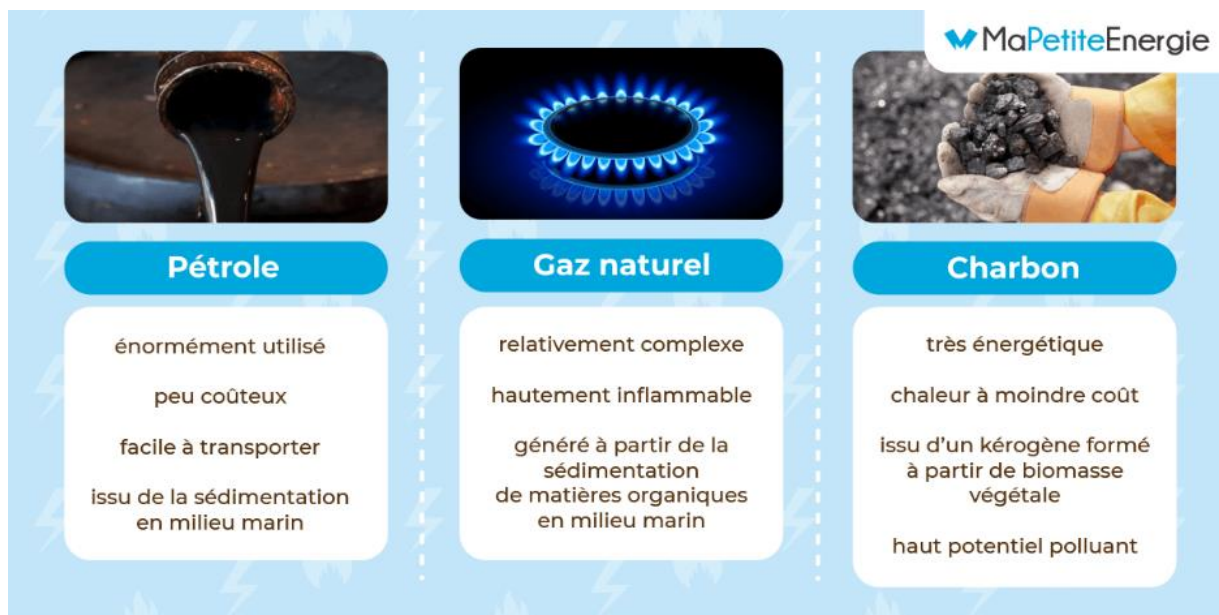


Figure 1.3: Avantages des énergies fossiles

Source : <https://www.mapetiteenergie.com/aides/energies-fossiles>

5.2-Les énergies fissiles :

L'énergie fissile est obtenue par un procédé de fission de matériaux radioactifs, tels que l'uranium ou le plutonium. L'uranium est largement utilisé pour produire de l'électricité et de la chaleur.

5.3-Les énergies renouvelables : cette partie fera l'objet du cours 02

6-Bouquet ou Mix énergétique :

Le bouquet (ou mix) énergétique se définit comme la répartition des énergies primaires (hydrocarbures, gaz, éolien, hydraulique, solaire, nucléaire, biomasse...) dans la production d'énergies directement utilisables comme l'électricité, la chaleur, etc., et ceci quelle que soit l'échelle. Sa composition résulte principalement de la disponibilité des ressources, de leurs coûts d'exploitation et des retours en termes de services rendus, de minimisation des risques et des impacts environnementaux (émission de gaz à effet de serre notamment) et de gains économiques, et ce à une période donnée. (Brault et Dollet, 2013) (exemple figure 1.4).

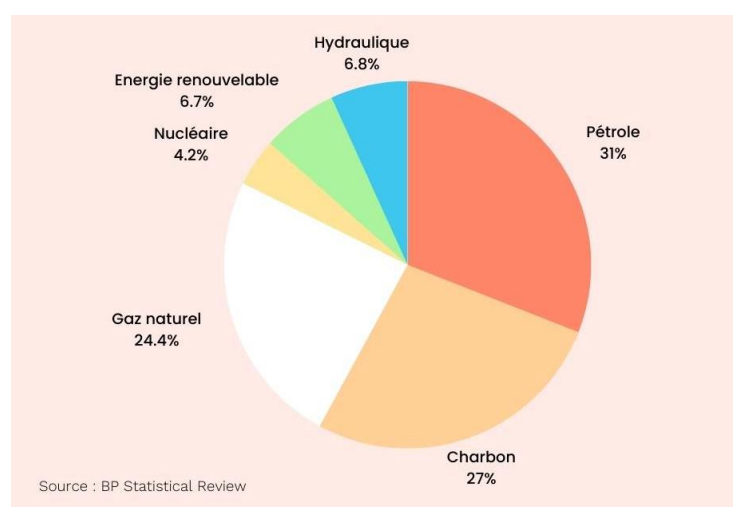


Figure 1.4: Mix énergétique mondiale en 2021

7-L'empreinte carbone :

Selon le dictionnaire de l'environnement, l'empreinte carbone est la mesure du volume de dioxyde de carbone (CO₂ qui est le principal gaz à effet de serre) émis par combustion d'énergies fossiles, par les entreprises ou les êtres vivants. La figure 1.5 indique la quantité d'émission de carbone de différentes sources. A gauche, on retrouve les énergies fossiles qui sont responsables des plus grandes émissions de CO₂, à leur tête le coke de lignite avec 1233 kg équivalent carbone par tep, alors que le gaz naturel affiche la valeur la plus basse 651 kg équivalent carbone par tep.

A droite, il y a les énergies renouvelables : l'énergie solaire photovoltaïque affiche une empreinte carbone plus élevée par rapport aux autres énergies renouvelables avec 316 kg équivalent carbone par tep.

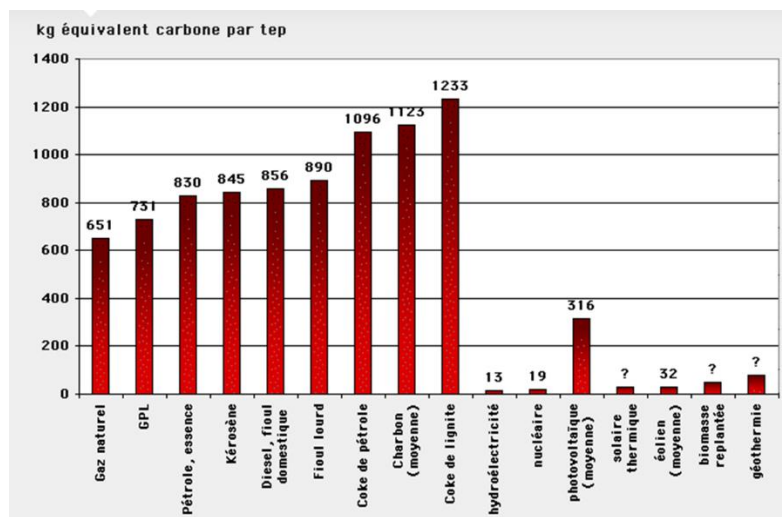


Figure 1.5: Empreinte carbone de différentes sources d'énergie
(Source: ADEME, 2003)

8-Le pouvoir calorifique :

Tous les combustibles fossiles, qu'il s'agisse de charbon, de pétrole ou de gaz naturel, contiennent des quantités variables de carbone et d'hydrogène. Lorsqu'ils brûlent, ils produisent du dioxyde de carbone (CO₂), de l'eau sous forme de vapeur, et dégagent de la chaleur. On appelle «pouvoir calorifique» la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de 1 kg de combustible solide ou liquide ou de 1 m³ de combustible gazeux (Brault et Dollet, 2013). Plus le pouvoir calorifique est élevé, plus le combustible est efficace.

Le tableau 1.1 présentent les valeurs des pouvoirs calorifiques et les facteurs d'émission carbone de différents combustibles.

Tableau 1.1 : les valeurs des pouvoirs calorifiques et les facteurs d'émission carbone de différents combustibles (Ministère de l'énergie et des mines-Algérie)

Désignation	<i>facteur d'émission TE-CO₂/TJ</i>	<i>PCI (tep/tonne)</i>
charbon à coke ou à vapeur	95	0,725
coke de houille	107	0,677
fuel domestique	75	1,017
gasoil	74,1	1,025
essence normale	69,3	1,054
essence super	69,3	1,057
GPL	63,1	1,084
gaz de cokerie	47	0,660
charbon sous bitumineux	94,6	0,600
lignite	101,2	0,300
coke de lignite	108,2	0,405
fuel lourd	77,4	0,998
kerosene et carburéacteur	71,9	1,035
gaz naturel	56,1	0,00009
gaz de raffinerie	56	0,762
gaz de haut fourneau	268	0,762

Cours 2 : Les énergies renouvelables

Introduction :

Après une révolution industrielle reposant sur les énergies fossiles, le retour à l'utilisation des énergies renouvelables à la fin du 20ème siècle fut motivé par les raisons suivantes :

- Les deux chocs pétroliers de 1973 et 1979 et la flambée des prix du pétrole à l'échelle mondiale.
- Les impacts climatiques et sanitaires recensés par les scientifiques et les chercheurs causés par l'utilisation des énergies fossiles.
- Les accidents nucléaires notamment celui de Tchernobyl en 1986.
- La question des déchets nucléaires et leur impact sur la planète et la santé des populations.

1-Définitions des énergies renouvelables :

Selon l'article 3 de la Loi 04-09 du 14 aout 2004 relative à la promotion des Energies Renouvelables dans le cadre du développement durable, sont qualifiées d'énergies renouvelables :

-Les formes d'énergies électriques, mécaniques, thermiques ou gazeuses obtenues à partir de la transformation du rayonnement solaire, de l'énergie du vent, de la géothermie, des déchets organiques, de l'énergie hydraulique et des techniques d'utilisation de la biomasse.

-L'ensemble des procédés permettant des économies d'énergies significatives par le recours à des techniques de construction relevant de l'architecture bioclimatique.

Ainsi, on peut identifier cinq familles des énergies renouvelables (voir figure 2.1).

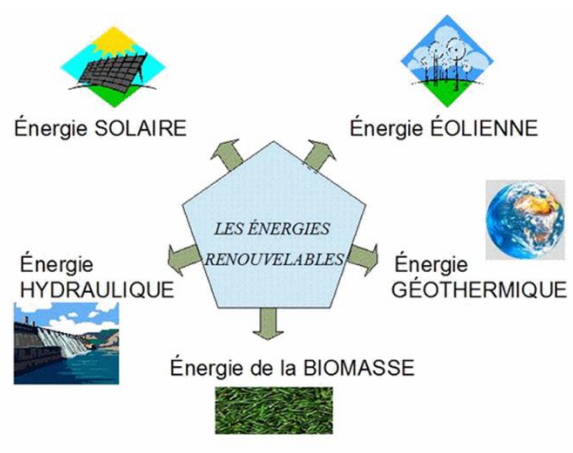


Figure 2.1 : Les cinq familles des énergies renouvelables

2-L'énergie solaire :

L'utilisation de l'énergie solaire s'est développée au début des années 2000. Les trois grandes familles d'utilisation sont : l'énergie solaire thermique, l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie solaire thermodynamique.

2.1-L'énergie solaire thermique :

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur transmise par le rayonnement solaire soit directement ou indirectement.

L'utilisation direct (figure 2.2) consiste à : chauffer des locaux par des procédés passifs tels que la serre, la cheminée solaire, mur trombe..... ; produire de l'eau chaude sanitaire par les chauffe-eau solaires ainsi que cuire les aliments (cuiseur solaire).



a) Cheminée solaire



b) Serre bioclimatique



c) Chauffe-eau solaire



d) Cuiseur solaire

Figure 2.2: Procédés d'utilisation directe de l'énergie solaire thermique.

Les panneaux solaires thermiques (figure 2.3) sont des équipements utilisés pour capter le rayonnement, ils sont constitués généralement de trois parties :

- une face arrière opaque en aluminium ou polymère ;
- un isolant thermique sur le dos et les côtés de type laine de verre ou de roche ;
- une face côté soleil en verre trempé sous laquelle se trouvent des capteurs thermiques solaires sous forme de tuyaux remplis d'eau ou de fluide caloporteur. (Filloux A., 2014)



Figure 2.3 : Composantes d'un panneau solaire thermique type « plan vitré ».

<http://www.leguידeduchauffage.com/technologie.html>

2.2-L'énergie solaire photovoltaïque :

Il s'agit de convertir les ondes électromagnétiques du rayonnement solaire en électricité par l'effet photoélectrique en utilisant des panneaux solaires photovoltaïques.

Le panneau solaire photovoltaïque (figure 2.5) est un assemblage de cellules qui produisent l'électricité dans un matériau semi-conducteur : le silicium. Il existe deux types de cellules à base de silicium :

- Les cellules monocristallines : elles possèdent le meilleur rendement au mètre carré (entre 11-16%).
- Les cellules polycristallines : elles sont moins chères mais présentent un rendement plus faible (entre 10-14%).

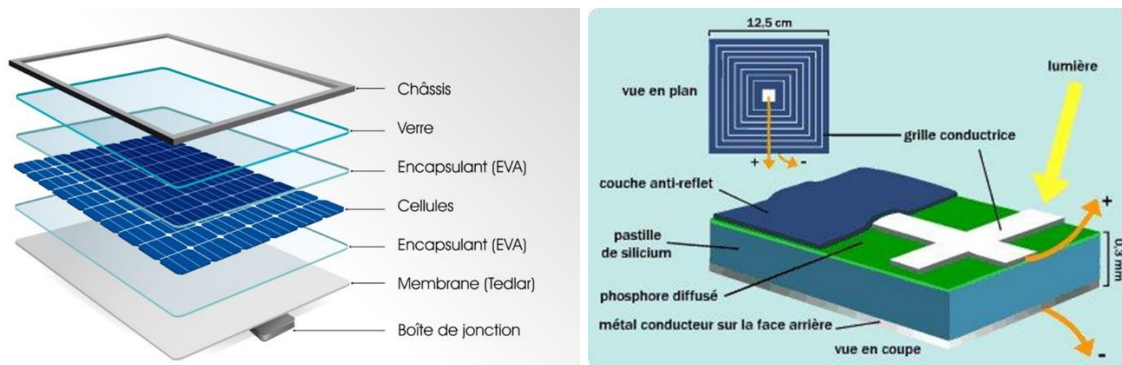


Figure 2.4 : Composantes d'un panneau solaire photovoltaïque.

Applications :

-Lorsque les panneaux photovoltaïques chargent une batterie pour stocker l'énergie électrique et l'utiliser à convenance, le système solaire photovoltaïque est dit « **autonomes** ».

-Lorsque l'énergie électrique est utilisée directement par le récepteur, le système est dit « **au fil du soleil** ».

-Enfin, si l'énergie produite est injectée dans le réseau de distribution électrique, il s'agit d'une **installation raccordée au réseau**. (Filloux, 2014)

Les panneaux photovoltaïques sont également utilisés pour la production d'électricité à grande échelle sous forme de parcs solaires terrestres (on shore) ou bien flottant (offshore).

2.3- L'énergie solaire thermodynamique :

L'énergie solaire thermodynamique (en anglais CSP pour Concentrating Solar Power Plant) consiste à produire de la vapeur à partir d'un fluide caloporteur pour entraîner des turbines et ainsi, obtenir une énergie électrique.

On distingue différents types de centrales solaires thermodynamiques selon le mode de focalisation du rayonnement solaire : la focalisation des rayons solaires sur un point telles que les centrales à tours et les centrales à disques paraboliques ; et la focalisation des rayons sur une ligne comme les centrales à capteurs cylindro-paraboliques (Acket C., Vaillant J., 2011).

La figure 2.5 montre la centrale solaire thermodynamique Noor située à Ouarzazate –Maroc et mise en service entre 2016-2020. Sa capacité de 582 MW alimente 1 million de foyers.

Elle est dotée de 500.000 miroirs courbes cylindro-paraboliques qui concentrent les rayons solaires sur des tubes, installés sur l'équivalent de 35 terrains de foot (surface de la ville de Rabat) ainsi qu'une tour solaire au centre.



Figure 2.5 : Centrale solaire thermodynamique Noor à Ouarzazate –Maroc.

2.4-Inconvénients de l'énergie solaire :

- Energie variable dans le temps (Intermittence) car elle dépend des saisons et des conditions climatiques.
- Consommation des sols.
- Cout de l'installation et sa mise en œuvre.
- Durée de vie limitée (25 ans).
- L'esthétique des systèmes dans les bâtiments et leur intégration architecturale.

3-L'énergie éolienne :

3.1-Définition :

L'énergie éolienne est une énergie d'origine solaire : 2% de l'énergie solaire est transformée en énergie cinétique des vents. 35 % de l'énergie de ces vents sont disponibles dans les couches 0 à 1 km au-dessus du sol. Des aérogénérateurs (éoliennes) transforment l'énergie cinétique des vents en énergie électrique. (Filloux,2014)

3.2-Composants d'une éolienne :

Une éolienne est composée principalement d'un rotor, une nacelle équipée d'un générateur, un mat, un transformateur relié à des câbles électriques et une base (figure

2.6). Il existe cependant plusieurs modèles d'éoliennes classés en deux catégories : éoliennes à axe horizontal et éoliennes à axe vertical (figure 2.7).

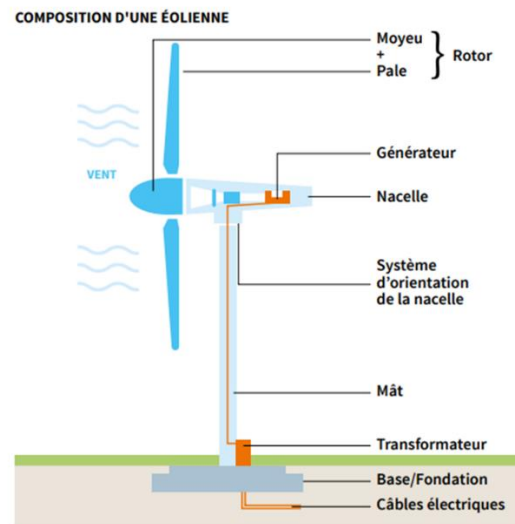


Figure 2.6 : Composantes d'une éolienne en hélice.

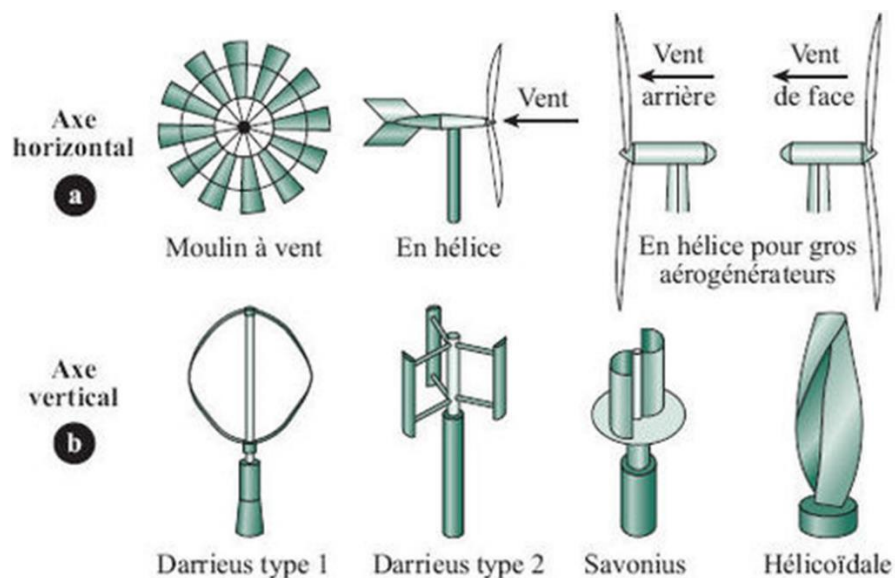


Figure 2.7 : Types d'éoliennes.

3.3-Capacité de production :

Une éolienne terrestre peut produire entre 1 et 2.6 Mégawatt d'électricité alors que les modèles offshore produisent entre 3 et 20 Mégawatt car la vitesse moyenne du vent y est plus élevée qu'à terre, plus régulière et pouvant assurer un facteur de charge nettement plus intéressant (45% au lieu de 25% pour le terrestre).

3.4-Règles d'implantation :

Une réglementation régit l'implantation des parcs éoliens sur terre. La réglementation française par exemple exige que : les éoliennes doivent se situer à au moins 500 m des habitations et des zones destinées à l'habitation ; la distance entre éoliennes doit être de 400 m environ dans une direction perpendiculaire aux vents dominants ; leur emprise au sol (fondations, aire de retournement, postes de transformation, routes) est d'environ 3 % de la superficie du parc ; les 97 % restants sont disponibles pour un usage agricole. (ADEME, 2012)

3.5-Inconvénients de l'énergie éolienne :

- Polluants contenus dans les alternateurs
- Impact sonore
- Impact visuel
- Impact sur les oiseaux
- Encombrement des sols
- Artificialisation des sols
- Impact sur le réchauffement des sols

4-La biomasse :

4.1-Définition :

La biomasse désigne la « masse totale de l'ensemble des êtres vivants », mais également « la partie biodégradable des déchets et résidus agricoles, industriels et ménagers, utilisable comme énergie (Larousse, 2016).

Du point de vue du génie énergétique, la définition de la biomasse est restreinte à l'« ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie ». Ces matières organiques qui proviennent principalement des plantes, sont une forme de stockage de l'énergie solaire, captée et utilisée par les plantes grâce à la chlorophylle. Ainsi la biomasse est donc constituée de polymères complexes principalement composés de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, créés par l'activité métabolique des organismes vivants (Acket C., Vaillant J., 2011). Les matières organiques d'origine animale (cadavres et déchets d'animaux) sont également utilisées.

4.2-Types de biomasse :

Les biomasses les plus utilisées à des fins énergétiques sont :

-Les résidus issus des activités de productions agricoles (telles que les fumiers, lisiers, fientes, pailles, balles de riz, etc.) et forestières (telles que les rémanents forestiers : parties des arbres ou taillis non exploitable en scierie)

-Les résidus issus de la transformation des productions agricoles et forestières : chutes de scieries, coproduits des industries agroalimentaires, etc.

Dans ces deux cas, la biomasse provient de coproduits générés par un produit qui n'est pas destiné à la production d'énergie.

-Certaines cultures sont uniquement dédiées à des fins énergétiques, comme le colza pour les biocarburants. Dans ce cas, il ne s'agit plus de la valorisation d'un produit connexe mais de **cultures énergétiques**. On parle alors d'agrocarburants.

-Les déchets de l'activité humaine qui sont de plus en plus utilisés pour la production d'énergie : boues de stations d'épuration, fraction organique des déchets ménagers, tontes de pelouse, etc. Ce type de biomasse est particulièrement abondant dans les villes et grands centres urbains (IBGE, 2009).

Tableau 2.1 : Principales biomasses utilisées pour la production d'énergie .(IBGE, 2009)

	Productions agricoles	Productions forestières
Résidus des activités de <u>production</u>	▪ Pailles de céréales, anas de lin, balles de riz, rafles de maïs, grains déclassés, etc. ▪ Effluents d'élevage : lisiers, fumiers, purins, fientes, etc.	▪ Rémanents forestiers : houppiers, souches, etc.
Résidus des industries de <u>transformation</u>	▪ Effluents d'industries agroalimentaires	▪ Coproduits de scieries, de menuiseries, etc. (dosses, sciures, copeaux, chutes diverses, etc.)
Cultures dédiées (« cultures énergétiques »)	▪ Agrocarburants : betteraves, colza, canne à sucre, etc.	▪ Taillis à très courte rotation (TTCR) de saules, de peupliers, etc. ▪ Taillis pour bois de chauffe, miscanthus
Autres biomasses (résidus d'activités humaines)	▪ Fraction organique des déchets ménagers ▪ Boues de stations d'épuration ▪ Tontes de pelouses ▪ Huiles de friture ▪ Bois de démolitions ou de « parcs à conteneurs »	

4.3-Application :

La biomasse est utilisée pour la production de la chaleur et/ou l'électricité, les biocarburants et les biomatériaux.

La valorisation énergétique est principalement assurée par la transformation **thermochimique**, qui représente probablement plus de 95% de cette valorisation à l'heure actuelle. Les trois principales méthodes de conversion thermochimique de la biomasse sont la combustion, la pyrolyse et la gazéification.

Il y a aussi les conversions **biochimiques** qui sont des processus naturels de décomposition par action des bactéries tels que : la fermentation et la digestion anaérobie (figure 2.8).

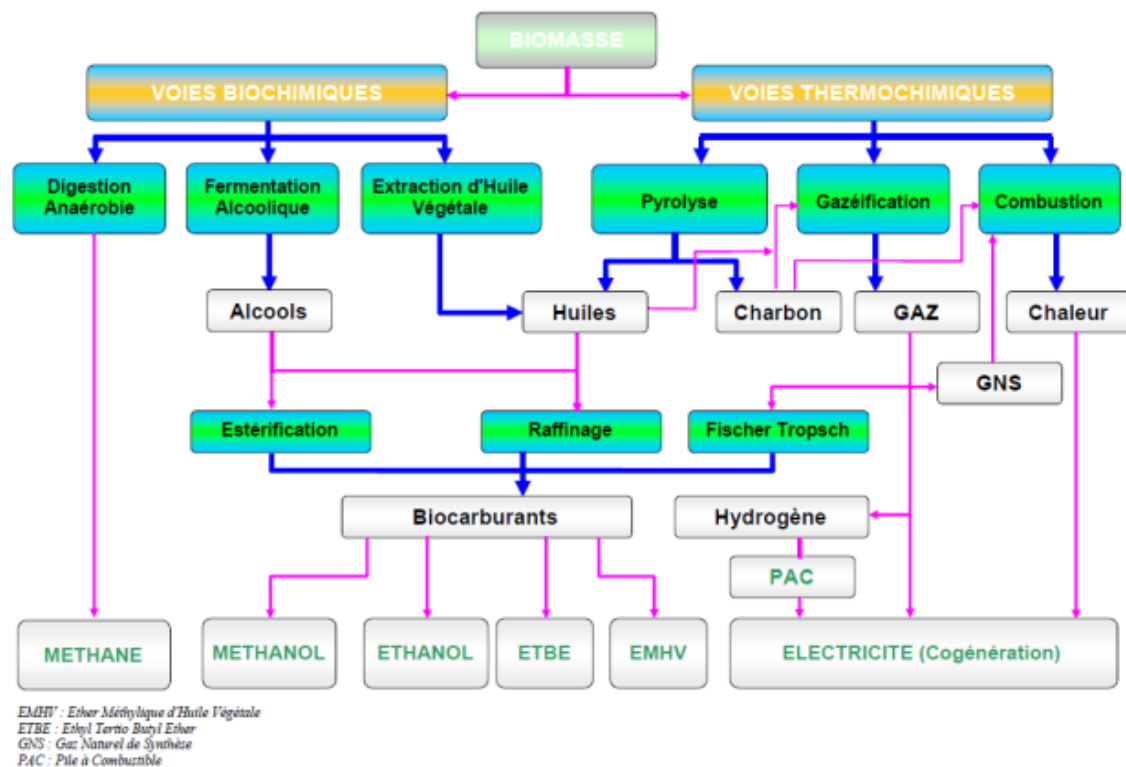


Figure 2.8 : Les différentes filières de valorisation énergétique de la biomasse

4.4-Les avantages de l'énergie biomasse :

- À l'échelle planétaire, la biomasse végétale est extrêmement abondante, bien que très inégalement répartie.
- Sur le plan écologique, la biomasse absorbe autant de CO₂ par la photosynthèse qu'elle en rejette par la combustion, rendant son bilan carbone neutre.

- La biomasse est biodégradable, ne laissant aucun déchet organique à court ou moyen terme. Les composants minéraux (métaux) peuvent aussi être récupérés à des fins agronomiques.
- Économiquement, la biomasse peut être entièrement valorisée. Selon le principe de cascade, l'ensemble de la plante (fruits, tiges, feuilles, troncs, écorce) peut être transformé sur le lieu de production, sans nécessiter de transport et avec création d'emplois locaux.
- Les ressources issues de la biomasse sont stockables.
- La production de bioénergies est également écologique car ses processus de transformation se déroulent à basse température, comme la méthanisation ou la production de bioéthanol.
- Les bioénergies issues de cette biomasse sont très diversifiées. Elles peuvent se présenter sous forme de combustibles solides (pellets), gazeux ou liquides, et sont facilement distribuables sous diverses formes : vrac, sacs, réseaux de chaleur, réservoirs de gaz ou à la pompe.
- La combustion des biogaz, qui contiennent peu de carbone, est beaucoup moins polluante en particules fines que celle des hydrocarbures liquides.

4.5-Les inconvénients de l'énergie biomasse :

- La difficulté d'accès aux ressources, notamment dans les zones à faible densité végétale et dans les forêts de montagne, ainsi que les problèmes de transport de matières lourdes comme les grumes ou de matières de faible densité comme les taillis ou les plantes herbacées.
- Les surcoûts d'exploitation dus à la complexité économique d'extraire les matières énergétiques des végétaux humides et des matières organiques imbibées d'eau (déjections animales, boues).
- Le fait que tous les processus de combustion émettent des gaz à effet de serre (GES), même si leur cycle du carbone est neutre sur une période de quelques années, permettant la repousse des plantes.
- Les risques de pénurie ou de déséquilibre des marchés, notamment alimentaires, dus à la concurrence des usages.
- En ce qui concerne les biocarburants, éthanol ou biodiesel, tous les moteurs ne sont pas encore capables de les utiliser à 100%. (Sourisse, 2018)

5-La géothermie :

5.1-Définition :

La géothermie consiste à capter la chaleur de la croûte terrestre pour produire du chauffage et de l'électricité. L'énergie géothermique est fournie par la chaleur interne de la terre produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre, sachant qu'à mesure que l'on s'enfonce sous terre, la température augmente d'environ 3.3°C tous les 100m. (Filloux, 2014)

5.2-Types de géothermie :

La géothermie est classée en quatre principaux types en fonction de la température de la source thermique :

5.2.1-La géothermie très basse énergie : ($T < 30^{\circ}\text{C}$)

Elle concerne l'exploitation de la chaleur du sous-sol de 0 à 600 m de profondeur, dont la température est inférieure à 30 °C. Elle est principalement utilisée pour le chauffage/climatisation. La technique se base sur l'ajout **d'une pompe à chaleur** PAC et le puit canadien. Elle peut être utilisée partout dans le monde notamment en Algérie.

5.2.2- La géothermie basse énergie ($30^{\circ}\text{C} < T < 90^{\circ}\text{C}$) :

Elle concerne l'exploitation des gisements situés dans des bassins sédimentaires entre 1500 et 2500 mètres de profondeur, dont la température varie entre 30 et 90 °C. Elle est utilisée dans le chauffage d'habitations et certaines applications industrielles.

5.2.3-La géothermie moyenne énergie ($90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$):

Elle concerne l'exploitation des gisements profonds situés dans des régions continentales stables entre 2000 et 4000 mètres ou actives à 1000 mètres, dont la température varie entre 90 et 150 °C. Elle est utilisée dans des applications directes (le chauffage de locaux, le séchage de produits alimentaires, pisciculture, etc.), ou pour la production d'électricité. Elle peut être utilisée dans les zones thermales du nord.

5.2.4-La géothermie haute énergie :

Concerne l'exploitation des gisements profonds situés entre 1500 et 3000 mètres de profondeur, dont la température est supérieure à 150 °C. Elle est rencontrée dans les régions géologiquement actives (zones volcaniques ou sismiques). Le fluide géothermique (vapeur

sèche ou humide) est pompé du réservoir géothermique profond vers la surface pour être exploité dans la production d'électricité. Ce type de géothermie n'existe pas en Algérie (Ouali, 2019).

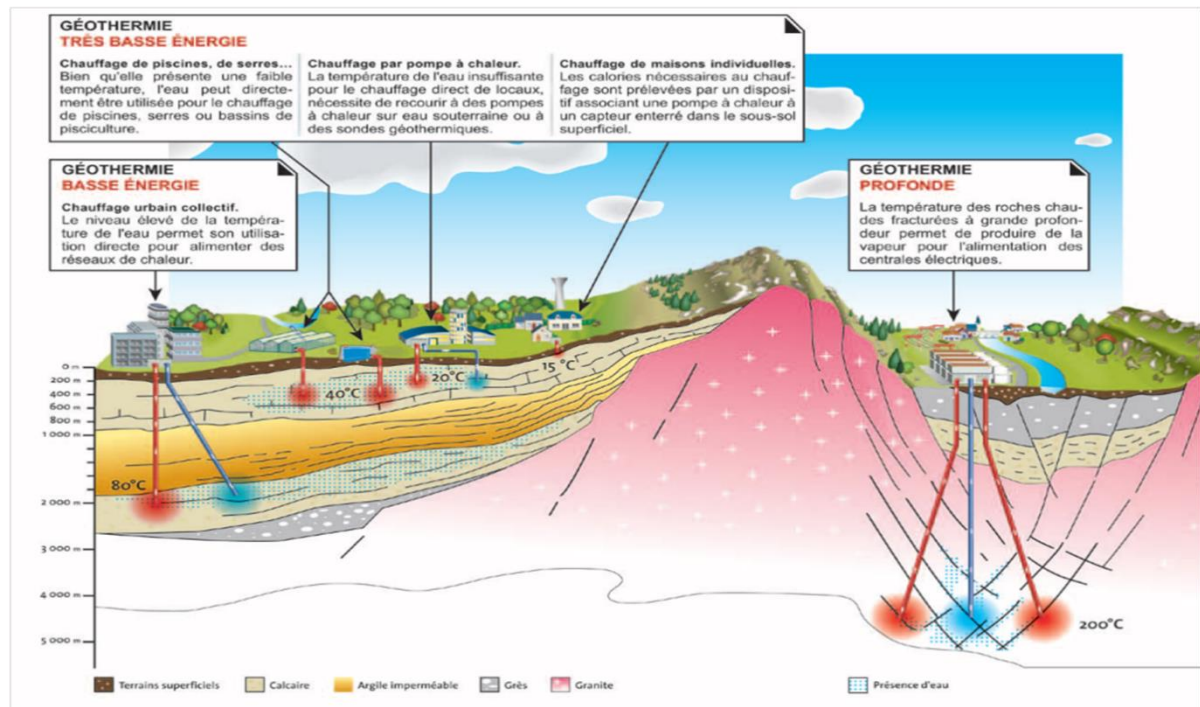


Figure 2.9 : Types de géothermie.

https://uved.univ-perp.fr/module2/co/3-differents_types_geothermie.html

5.3-Application :

Les utilisations de la géothermie sont très nombreuses :

- Chauffage urbain collectif par réseau de chaleur ;
- Chauffage de logements individuels, de piscines, de serres,...ect
- Chauffage par pompe à chaleur (PAC),
- Production d'électricité.

5.4-Avantages de la géothermie :

Les avantages de la géothermie résident dans sa disponibilité et son respect pour l'environnement :

- C'est un mode de chauffage économique car la chaleur du sous-sol est disponible en continu.

- Il est performant car il y a peu de perte d'énergie constatée entre les capteurs et la PAC.
- Il fonctionne partout dans le monde, même si les zones volcaniques produisent plus de chaleur. Elle est peu influencée par la météo du lieu.
- La production de chaleur génère peu de gaz à effet de serre.

5.5-Inconvénients de la géothermie :

- Certains terrains trop rocaillieux ne sont pas éligibles à la géothermie.
- Le coût des installations nécessaires au chauffage géothermique est élevé.
- La rentabilité du dispositif ne se constate qu'à partir de la 5^e année.
- La géothermie horizontale nécessite un grand terrain tandis que le captage vertical de l'énergie a besoin de forage profond. (Acket et Vaillant, 2011)

6-L'énergie hydraulique :

6.1-Définition :

L'énergie hydraulique est l'énergie potentielle que représente une masse d'eau stockée en altitude, dans un champ de pesanteur. La baisse d'altitude transformera ce potentiel en énergie cinétique de cette même masse d'eau, qui se transformera en énergie électrique (Acket et Vaillant, 2011)

6.2-Technologie :

La transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique se fait par l'intermédiaire d'une turbine hydraulique couplée à un générateur électrique (figure 2.10).

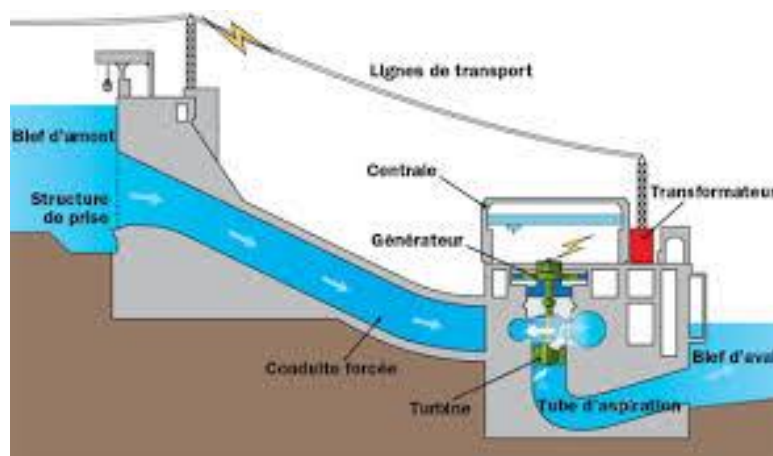


Figure 2.10 : Composantes d'une centrale hydroélectrique.

6.3-Types de centrales hydroélectriques :

Il existe plusieurs types de centrales hydroélectriques selon le débit d'eau, la hauteur de chute et les types de turbines utilisés.

6.3.1-Centrale hydroélectrique de haute chute :

Elles sont caractérisées par un débit faible et un dénivelé très fort avec une chute supérieure à 300 m.

6.3.2-Centrale hydroélectrique de moyenne chute :

Elles sont caractérisées par un débit moyen et un dénivelé assez fort avec une chute comprise entre 30 et 300 m.

6.3.3-Centrale hydroélectrique de basse chute :

Elles sont caractérisées par un débit très fort et un dénivelé faible avec une chute de moins de 30 m. Dans ce cas, il n'y a pas de retenue d'eau et l'électricité est produite en temps réel.

6.3.4-Station de transfert d'énergie par pompage (STEP) :

Ce type de centrale possède un dispositif de pompage et deux réservoirs à des altitudes différentes : l'eau est successivement pompée du bassin inférieur vers le bassin supérieur avec les excédents d'électricité disponibles pendant les heures creuses (nuit), puis "turbinée" pendant les heures de pointe.(EDF, SD)

<https://www.edf.fr/groupe-edf/comprendre/production/hydraulique/types-de-centrales-hydrauliques>

6.4-Avantages de l'énergie hydraulique :

- Environnement : faibles émissions de gaz à effet de serre.
- Durée de vie : les ouvrages hydrauliques sont conçus pour une durée de vie qui dépasse le siècle et ils assurent des niveaux satisfaisants de performance et de sûreté.
- Rendement efficace : les centrales convertissent environ 90 % de l'énergie disponible (provenant de l'eau) en électricité. C'est bien plus efficace que toutes les autres méthodes de production d'électricité.
- Régulation : la souplesse d'arrêt et de mise en route des centrales constitue un atout précieux pour la régulation de la fourniture du courant.

6.5-Inconvénients de l'énergie hydraulique :

-L'Energie hydraulique est tributaire des apports des cours d'eau qui l'alimentent, fluctuant selon les saisons et d'une année à l'autre en fonction des précipitations.

-Déplacements de population.

-Inondations de terres arables.

-Fragmentation et modifications des écosystèmes aquatique et terrestre.

-Paysages : un barrage est une énorme masse de béton. Dans un paysage urbain, cela ne gêne guère mais dans un paysage rural ou montagnard cela gâche beaucoup le paysage.

-Emplacement : les espaces où l'homme est absent étant très peu nombreux que ce soit dans les plaines ou dans les montagnes, il faut pour construire un barrage sacrifier un ou plusieurs village (plus ou moins grands). Cela crée des déplacements de population et peut entraîner des désaccords de cette même population. Les barrages modifient également les écosystèmes des sites où ils sont implantés. (Acket et Vaillant, 2011)

Cours 03 : La transition énergétique

1-Définition de la transition énergétique :

l'IRENA (International Renewable Energy Agency) définit la transition énergétique comme : « la transformation du secteur énergétique mondial basé sur l'énergie fossile à un secteur énergétique à zéro carbone d'ici la seconde moitié de ce siècle »

Une transition énergétique signifie le passage vers un mix énergétique plus respectueux de l'environnement et plus économe en ressources fossiles épuisables. C'est l'un des aspects les plus urgents d'une transition globale vers une économie sobre en ressources naturelles et en carbone.

Le Conseil Économique, Social et Environnemental (CESE) définit **la transition énergétique** comme une réponse aux enjeux climatiques, écologiques, économiques et sociaux. Elle consiste au-delà des atouts actuels en matière d'impact carbone, à s'engager de manière volontariste dans la voie d'une société sobre en énergie et en carbone que seule une volonté politique forte permettra de construire (Tissot-Colle, Jouzel, 2013).

La transition énergétique repose sur la maîtrise d'énergie :

- Maîtrise de la demande d'énergie en mettant fin à une fuite des dépenses énergétiques ;
- Maîtrise de la production d'énergie en décidant de stopper le recours aux énergies destructrices de l'environnement et nuisibles aux humains, à savoir, les énergies fossiles et le nucléaire. (Greenpeace, 2013)

2-Aperçu historique sur la transition énergétique :

Le concept de transition énergétique, né dans les années 1980, est lié à celui de développement durable. Les étapes clés de son développement sont :

- En 1972, paraît le rapport « The Limits to Growth ». Ce rapport souligne les dangers écologiques de la croissance économique et démographique, en lien avec la pénurie des ressources énergétiques et les conséquences du développement industriel sur l'environnement. Cette étude est à l'origine du concept du développement durable.

- En 1980, le concept de **transition énergétique** a été introduit en Allemagne et en Autriche à travers un ensemble de prévisions et de propositions scientifiques élaborées par l'association allemande Öko-Institut, dans l'optique d'un abandon de la dépendance au pétrole et à l'atome. Le 16 février de la même année s'est tenu à Berlin le premier « *Congrès sur la transition énergétique, le retrait du nucléaire et la protection de l'environnement* », organisé par le Ministère de l'environnement allemand.
- En 1987, la parution du rapport Brundtland (du nom du premier ministre de Norvège) a donné naissance au concept de « développement durable » visant à concilier l'écologique, l'économique et le social, en établissant une sorte de cercle vertueux entre ces trois piliers.
- En 1995, le rapport « Facteur 4 : deux fois plus de bien-être en consommant deux fois moins de ressources » est commandé au Wuppertal Institut par le Club de Rome. Le facteur 4 correspond à un objectif de division par quatre de nos émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici à 2050, afin de contenir le réchauffement climatique à un niveau d'élévation de 2°C.
- En 2006, le mouvement des « Initiatives de Transition », naît en Angleterre, à l'initiative de Rob Hopkins. Il vise à mettre en œuvre les solutions pour que la société puisse faire face à la pénurie des ressources énergétiques et aux impacts des changements climatiques (Thiziri Hammiche, 2015).

3-Les enjeux de la transition énergétique

Les choix en matière d'orientation énergétique se situent au croisement d'enjeux qui sont à la fois économiques, écologiques, géopolitiques et sanitaires:

- **Enjeux économiques** : croissance de l'activité, dynamique de l'emploi, poids de l'industrie et compétitivité ;
- **Enjeux écologiques** : les externalités des émissions de GES dans le mix de production et la consommation énergétique affectent à moyen et long termes le développement des populations ; réduction des déchets
- **Enjeux géopolitiques** : chaque pays a la responsabilité de fournir à tous ses citoyens et entreprises la quantité d'énergie dont ils ont besoin pour mener à bien leurs missions ; tous les pays n'ont cependant pas à disposition les ressources nécessaires

- **Enjeux sanitaires:** protéger la santé des populations (Institut Montaigne, 2019)

4-Aperçu sur le contexte énergétique mondiale :

Selon l'Agence Internationale de l'Energie AIE, la demande mondiale en énergie primaire a atteint les 9.2 milliards Tep en 2020, soit 1.5 tep par habitant, et prévoit une croissance de la demande de 70% d'ici 2030 (figure 3.1).

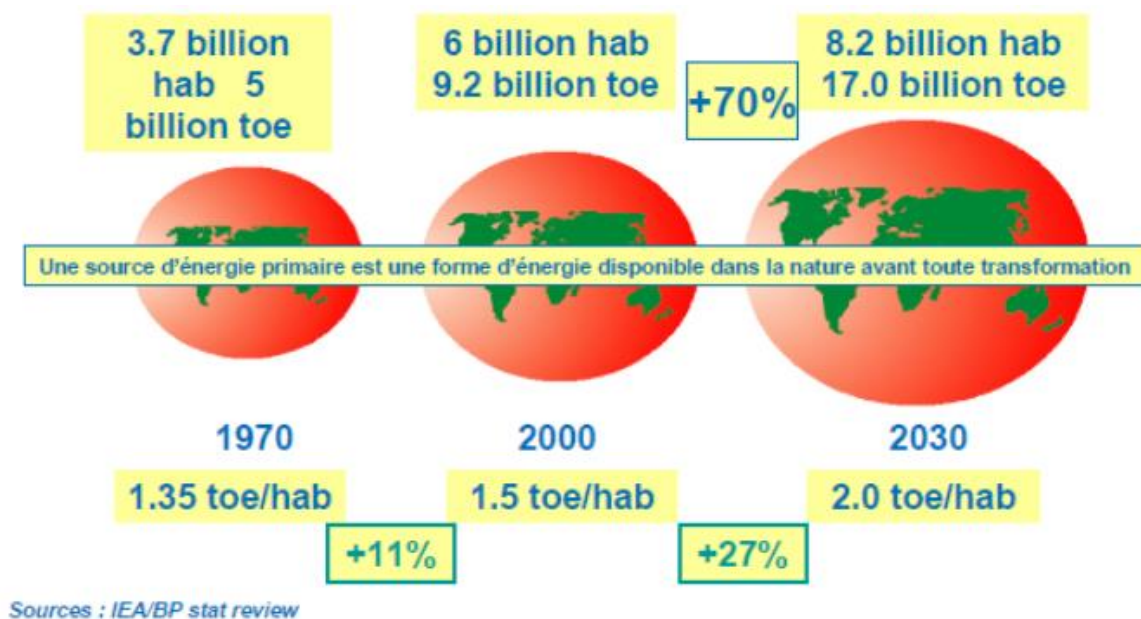


Figure 3.1 : Evolution de la demande mondiale en énergie primaire

Bien qu'en déclin relatif, les énergies fossiles dominent toujours la production mondiale d'énergie primaire. En 1970, elles représentaient 93,35 % de l'approvisionnement énergétique, mais cette proportion a progressivement diminué pour atteindre 81,80 % en 2022 (pétrole 31.7%, gaz naturel 23.3%, charbon 26.5%). Parallèlement, les sources d'énergie renouvelables ont vu leur part augmenter de manière constante. Partant de 6,26 % en 1970, elles ont plus que doublé pour atteindre les 14,21 % en 2022.

Le nucléaire, quant à lui, a connu une croissance rapide dans les années 1970 et 1980, atteignant un pic de 6,64 % en 2000, mais a légèrement décliné ensuite, stabilisant autour de 4 % dans les années récentes. [<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/production-denergie-dans-le-monde>]

5-Aperçu sur le contexte énergétique dans le bassin méditerranéen :

La région méditerranéenne dans son ensemble a connu une augmentation constante de la consommation d'énergie primaire, passant d'environ 26 exajoules (EJ) en 1980, à 34 EJ en 1995, pour atteindre les 43 EJ en 2016. Ce qui représente une croissance annuelle approximative de 1,7% comme le montre la figure 3.2.

Durant cette période, la contribution du pétrole est restée stable à 17 EJ, tandis que la consommation de charbon a connu une légère diminution progressive, passant de 4,1 à 3,7 EJ au cours des deux années de référence (1995 et 2016). La consommation d'énergie primaire du gaz naturel a doublé, passant de 6 EJ en 1995 à 12 EJ en 2016, tandis que celle du nucléaire et la contribution des énergies renouvelables est passée de 7 à 10 EJ entre 1995 et 2016 (AIE, 2019).

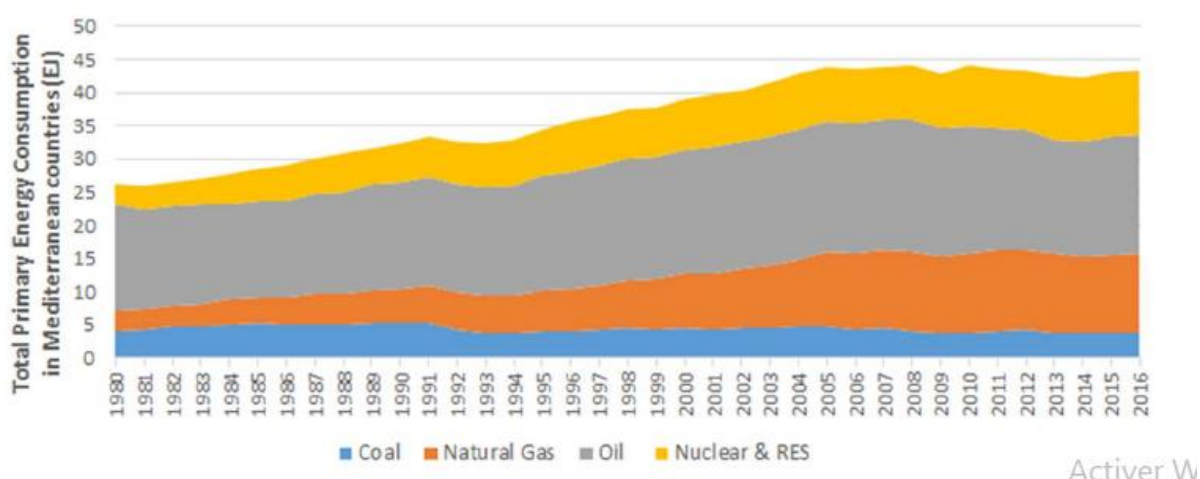


Figure 3.2 : Evolution de la consommation d'énergie primaire en méditerranée (AIE, 2019)

Les figures 3.3 et 3.4 illustrent la production et la consommation d'énergie primaire à travers différents pays de la Méditerranée en 1995 et 2016 et indiquent une forte disparité entre les pays de la rive Nord et ceux de la rive Sud.

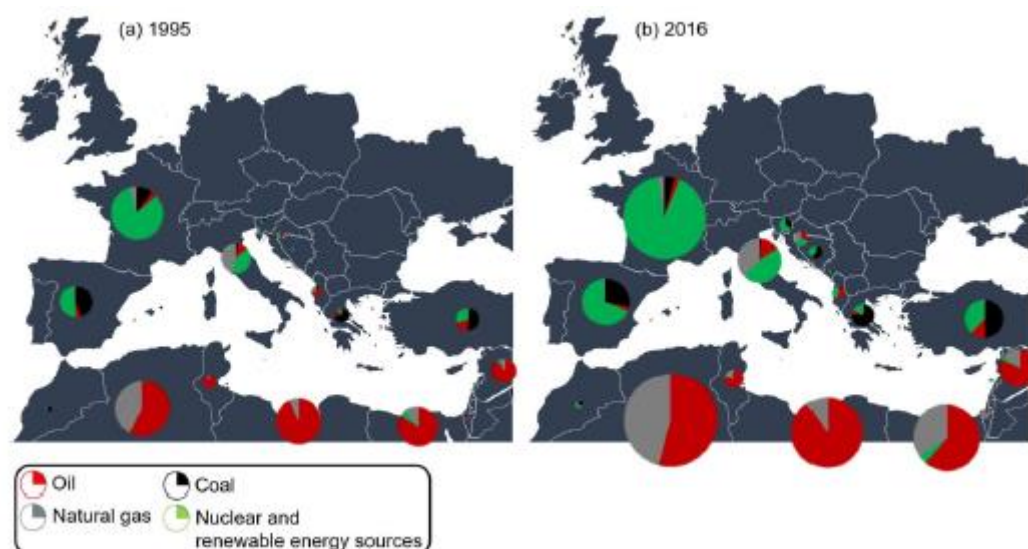


Figure 3.3 : Production d'énergie primaire par pays en méditerranée (Drobinski P et coll, 2020).

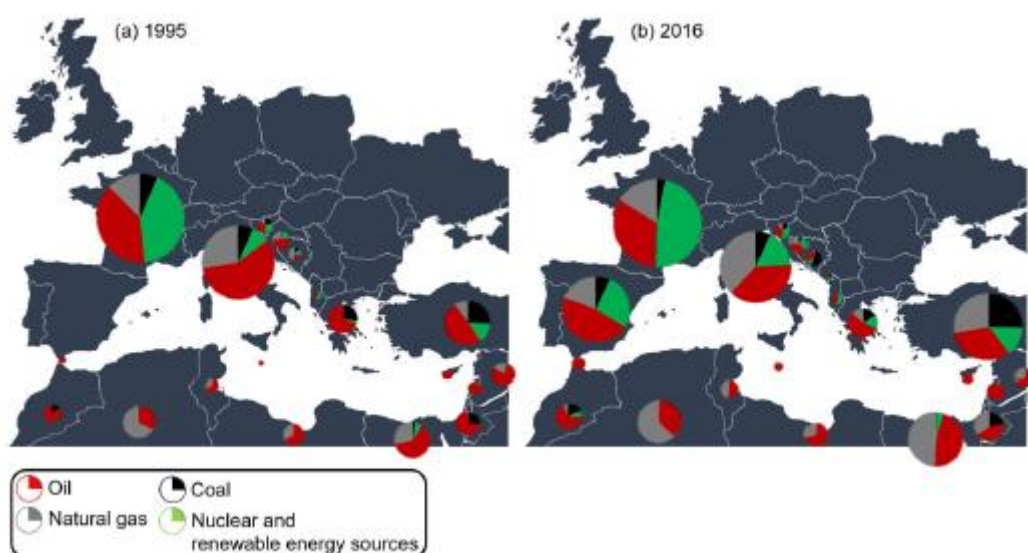


Figure 3.4 : Consommation d'énergie primaire par pays en méditerranée (Drobinski P et coll, 2020).

6-Aperçu sur le contexte énergétique nationale :

6.1-Production d'énergie :

Selon le bilan énergétique national publié par le ministère de l'énergie et des mines pour l'année 2021, la production **d'énergie primaire** a atteint 164,4 M Tep à fin 2021, contre

144,4 M Tep durant la même période de l'année 2020, reflétant une hausse importante (13,9%).

Quand à la production **d'énergie dérivée**, elle a augmenté de 8,2% comparativement aux réalisations de 2020 pour atteindre 67,2 M Tep en 2021, tirée surtout par la hausse de la production d'électricité thermique (13,1%) et du gaz naturel liquéfié GNL (14,1%).

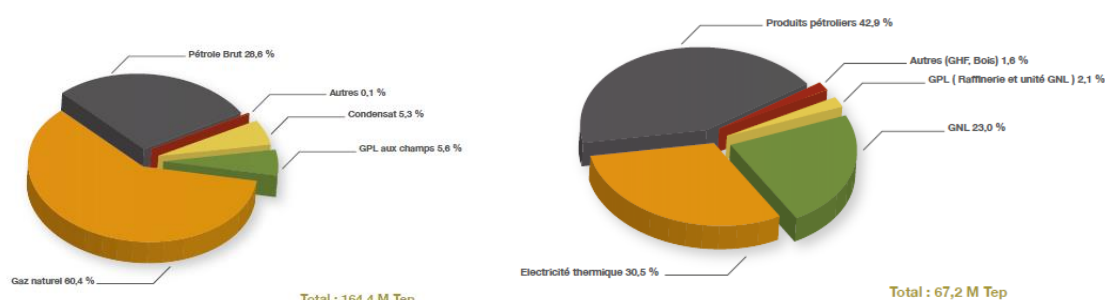


Figure 3.5: Structure de la production d'énergie primaire (à gauche) et secondaire (à droite) en Algérie (Ministère de l'énergie et des mines, 2022)

6.2-Consommation d'énergie :

La consommation nationale d'énergie a augmenté de (7,7%), passant de 62,3 M Tep à 67,2 M Tep en 2021, tirée par celle de l'électricité (11,5%) et du gaz naturel (7,8%).

De même, la consommation finale d'énergie a augmenté de 8% avec 50,2 M Tep en 2021, tirée essentiellement par le gaz naturel (+6,1%), les GPL (+9,6%), les produits pétroliers (+4,1%) et l'électricité (+2,7%).

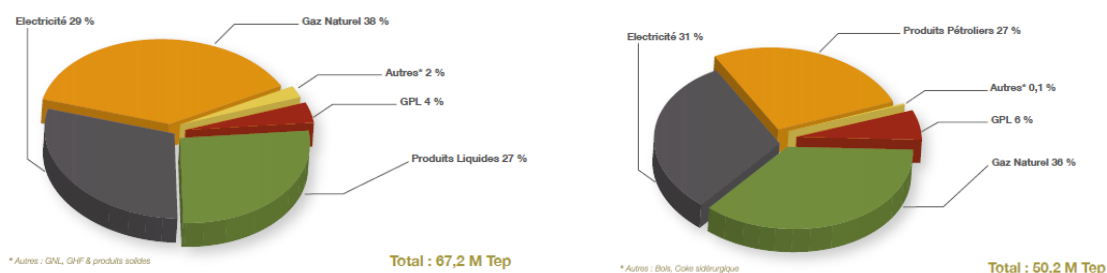


Figure 3.6: Structure de la consommation par forme d'énergie (à gauche) et par produit (à droite) en Algérie (Ministère de l'énergie et des mines, 2022)

-Par secteur d'activité, le secteur résidentiel demeure le secteur le plus énergivore avec 47% de la consommation finale, suivi par le secteur de transport avec 29% et le secteur industriel avec 24% (figure 3.7).

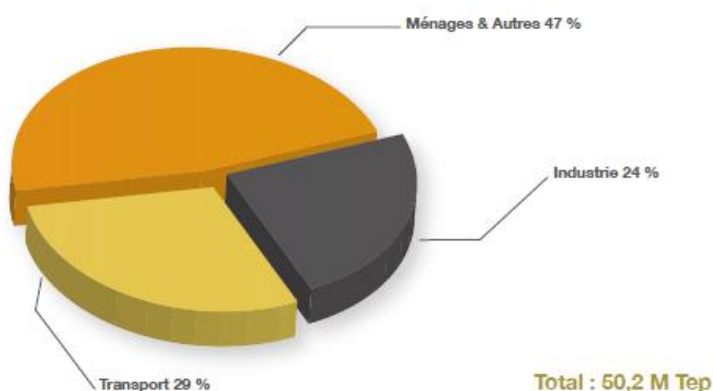


Figure 3.7 : Structure de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité en Algérie (Ministère de l'énergie et des mines, 2022)

7-La transition énergétique en Algérie :

L'Algérie a amorcé une dynamique de transition énergétique en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité énergétique en février 2011. Ce programme a été révisé en mai 2015 et placé au rang de priorité nationale en février 2016.

7.1-Le programme national des énergies renouvelables :

Le programme national des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.

Les projets de production de l'électricité à base d'énergies renouvelables dédiés au marché national sont répartis en deux étapes :

- **Première phase 2015 - 2020** : objectif la réalisation d'une puissance de 4010 MW, entre photovoltaïque et éolien, ainsi que 515 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie.
- **Deuxième phase 2021 - 2030** : Le développement de l'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar), permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Bechar et leur intégration dans le système énergétique national.

Le tableau 3.1 indique les objectifs du programme par source d'énergie.

**Tableau 3.1: Objectifs du programme national des énergies renouvelables
(CEREFEE, 2020)**

Unité : MW	1ère phase 2015-2020	2ème phase 2021-2030	TOTAL
Photovoltaïque	3 000	10 575	13 575
Eolien	1 010	4 000	5 010
CSP	-	2000	2 000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1 000
Géothermie	05	10	15
TOTAL	4 525	17 475	22 000

Pour accompagner ce programme, le Centre algérien de Développement des Energies Renouvelables CDER (2019) a évalué le potentiel solaire, éolien, géothermique et biomasse sur tout le territoire. Il ressort que :

7.1.1-Potentiel solaire :

-L'Algérie possède un gisement solaire important (figure 3.8.a): en effet, la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara.

-L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m² est de 3 KWh/m² au Nord et dépasse les 5,6 KWh/m au Grand Sud.

7.1.2-Potentiel éolien :

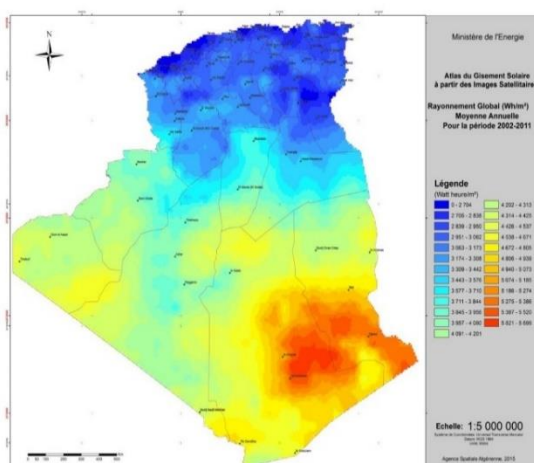
Le Sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset (In Amguel) (figure 3.8.b).

7.1.3-Potentiel géothermique :

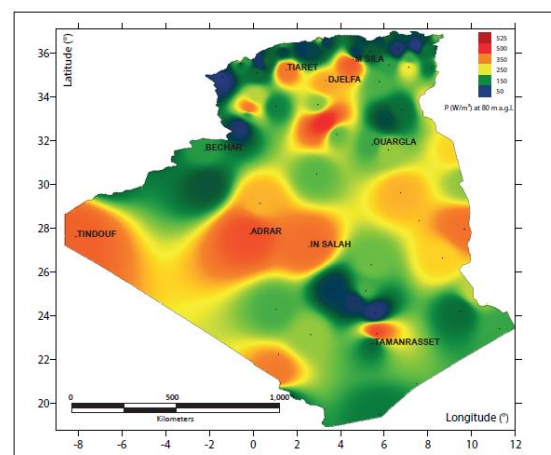
240 sources chaudes ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays (figure 3.8.c). Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C. Il existe également des sources à hautes températures pouvant atteindre les 118°C à Biskra.

7.1.4-Potentiel en biomasse :

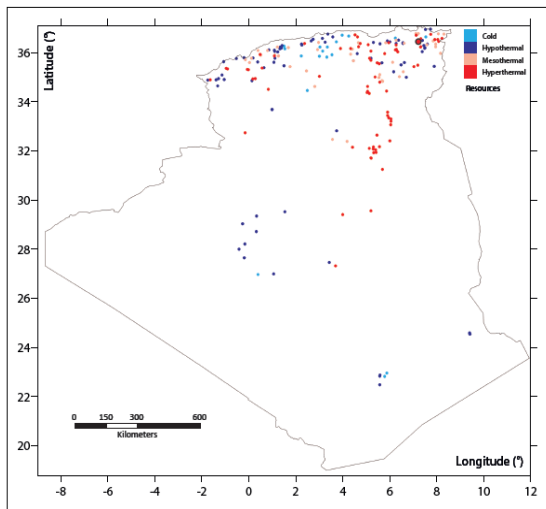
Les sources de biomasse sont très diversifiées. Le CDER s'est intéressé à la valorisation énergétique des déchets ménagers et assimilés (DMA) en Biogaz. Selon cette étude, le gisement le plus important se concentre au nord du pays, dans les régions les plus densément peuplées. Les cinq plus grandes régions (Alger, Oran, Sétif, Djelfa, Batna) comptabilisent un potentiel de plus de 168 millions de m³ de biogaz (figure 3.8.d)



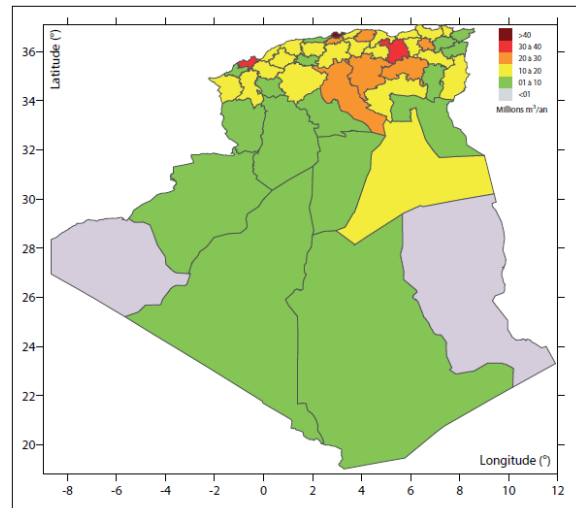
a-Potentiel solaire



b-Potentiel éolien



c-Sources géothermales



c-Potentiel biogaz

Figure 3.8: Potentiels en énergies renouvelables en Algérie (CDER , 2019)

-Sur le terrain, des centrales pilotes ont déjà été réalisées, principalement dans le sud. La première est une centrale pilote hybride solaire thermique-Gaz de 150 MW inauguré en 2011 à Hassi R'mel (à Laghouat). On citera également la centrale solaire photovoltaïque d'Oued N'Chou à Ghardaïa d'une capacité de 1.1 MWc mise en service en 2014 et la centrale éolienne de Kabertène à Adrar d'une capacité de 10.2 MWc (figure 3.9).



Figure 3.9: Centrale solaire d'Oued N'chou (à gauche) et centrale éolienne de Kebertène (à droite)

-Des installations solaires photovoltaïques autonomes (hors réseau) ont également été réalisées dans différents secteurs, notamment par le ministère de l'intérieur et des

collectivités locales ainsi que le ministère de l'agriculture et du développement rural comme le projet d'électrification de 348 écoles primaires, installation de 3350 kits solaires individuels pour les foyers dépourvus de réseau électrique, installation de 3500 points lumineux solaires ainsi que des pompes solaires dans les exploitations agricoles (CEREFÉ, 2020).

-Le bilan global dressé par le Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Energétique (CEREFÉ) montre que l'Algérie n'a réalisé qu'environ 411 MWc en comptabilisant l'ensemble des projets liés aux énergies renouvelables, qu'ils soient en mode raccordé au réseau avec environ 390 MWc, soit environ 95% du total, ou autonome avec près de 21 MWc, dont la part ne représente que 5 %.

7.2- Le programme national d'efficacité énergétique :

Le programme d'efficacité énergétique vise à réaliser des économies d'énergies à l'horizon 2030 de l'ordre de 63 millions de TEP, pour l'ensemble des secteurs (bâtiment et éclairage public, transport, industrie)

Pour le **secteur du bâtiment**, le programme prévoit d'économiser plus de 30 millions de TEP d'ici 2030 grâce aux mesures suivantes :

1- Lampe basse consommation (LBC) : Les gains en énergie escomptés, à l'horizon 2030 sont estimés à près de 20 millions de TEP ;

2-Isolation thermique des bâtiments : l'objectif est d'atteindre un gain cumulé évalué à plus de 7 millions de TEP ;

3- Chauffe -eau solaire : l'objectif est de réaliser une économie d'énergie à plus de 2 millions de TEP ;

4- Eclairage public : l'objectif est de réaliser une économie d'énergie de près de un (01) million de TEP, à l'horizon 2030 et d'alléger la facture énergétique des collectivités.

-Pour le **secteur du transport**, le programme vise à promouvoir les carburants les plus disponibles et les moins polluants, en l'occurrence, le GPLc et le GNc. L'objectif étant d'enrichir la structure de l'offre des carburants afin de réduire la part du gasoil qui reste le

carburant le plus pollueur en plus du fait qu'une grande partie est importée. Ceci devrait se traduire au final par une économie estimée à plus de 16 millions de TEP.

-Concernant le **secteur de l'industrie**, 30 millions de TEP d'économies sont visés. Dans cette optique, il est prévu :

1. La conversion au cycle combiné des centrales électriques conventionnelles à gaz quand cela est possible ;
2. La généralisation des audits énergétiques et du contrôle des procédés industriels qui devaient permettre d'identifier les gisements substantiels d'économie d'énergie et de préconiser des plans d'actions correctifs ;
3. L'encouragement à l'adoption de procédés permettant une réduction substantielle du gaspillage d'énergie dans les diverses industries et ce à travers un soutien étudié de l'Etat.(CEREFE, 2020)

7.3-la stratégie nationale de développement de l'hydrogène :

L'Algérie dispose de plusieurs atouts la plaçant en pole position pour devenir un acteur régional et international important dans le domaine de développement de l'hydrogène, notamment l'hydrogène vert qui est produit par électrolyse de l'eau en utilisant de l'électricité d'origine renouvelable. Ainsi, le gouvernement a mis au point en 2023 une stratégie nationale de développement de l'hydrogène.

L'Algérie aspire, à cet effet, de tirer profit de son potentiel technique de production d'hydrogène et de ses avantages comparatifs pour produire et exporter entre 30 à 40 TWh à l'horizon 2040 sous forme d'hydrogène gazeux, liquide et/ou ses dérivés. A cela s'ajoute environ 10 TWh d'hydrogène propre (bleu) qui seront produits pour satisfaire les besoins du marché national.

Trois étapes de base avec des jalons généraux sont définies afin de couvrir toutes les phases nécessaires au développement de l'hydrogène renouvelable et propre dans le pays : il s'agit de l'évaluation de la maturité technologique et industrielle, déploiement massif et industrialisation et exportation. Ces étapes de base sont échelonnées comme suit :

- Une première phase de démonstration à travers des projets pilotes à court terme 2023-2030 (phase d'apprentissage et d'amorçage).
- Une deuxième phase de mise à grande échelle et création de marché 2030 - 2040 (phase de déploiement).
- Une troisième phase de marché de compétition. 2040-2050 (phase d'industrialisation et d'exportation).(Ministère de l'énergie et des mines, 2023)

Cours 4 : L'efficacité énergétique dans le bâtiment

1-Définition de l'efficacité énergétique :

En physique, l'efficacité énergétique désigne le rapport entre l'énergie utile produite par un système (output) et l'énergie totale consommée (input) pour le faire fonctionner (figure 4.1).

L'objectif est d'obtenir un rendement énergétique plus élevé, tout en utilisant une faible quantité de la ressource pour recevoir le même service.

En d'autres termes, "L'efficacité énergétique est la capacité de fournir le même niveau de service énergétique (ou plus important), tel que le confort thermique, l'éclairage de haute-qualité, etc...tout en réduisant la consommation d'énergie et les coûts." (PNUE in Daganand, 2014)

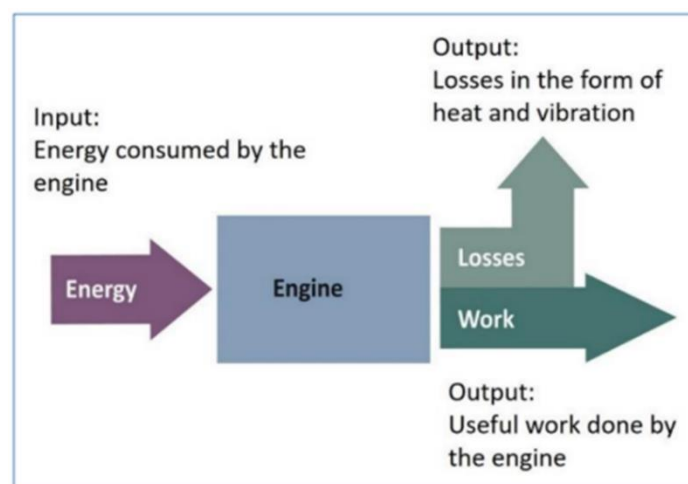


Figure 4.1 : Utilisation de l'énergie par un système.(www.renac.de)

2-Avantages de l'efficacité énergétique :

- **Sur le plan environnemental** : une efficacité accrue réduit l'empreinte écologique et les émissions de GES et autres polluants, ainsi que la consommation d'eau.
- **Sur le plan économique** : réduire la consommation énergétique et donc les factures. L'efficacité énergétique peut également stimuler l'économie locale.
- **Avantage aux systèmes de services publics** : l'efficacité énergétique réduit la charge de base et la demande de pointe (électricité, gaz...), ainsi que la nécessité de disposer d'actifs de production et de transport supplémentaires.

- **Gestion des risques** : elle constitue une couverture contre les incertitudes liées aux fluctuations des prix du carburant et à d'autres facteurs de risque.

3-Les leviers de l'efficacité énergétique :

L'efficacité énergétique repose sur trois leviers complémentaires (Djahel, 2008):

3.1-L'efficacité énergétique passive : axée sur l'enveloppe du bâtiment et l'amélioration de son isolation (**éco-construction**).

3.2-L'efficacité énergétique active : qui combine une amélioration du rendement énergétique des équipements techniques du bâtiment (chaudière, climatisation, éclairage, etc.) et une approche systémique et globale de gestion de l'énergie, centrée sur le pilotage automatisé des énergies du bâtiment en fonction de leurs usages.

3.3-Comportement des utilisateurs : c'est-à-dire la transformation du consommateur en consommateur responsable, informé et mobilisé, capable d'optimiser son confort tout en réalisant des économies d'énergie et, dans les années à venir, de produire sa propre énergie.

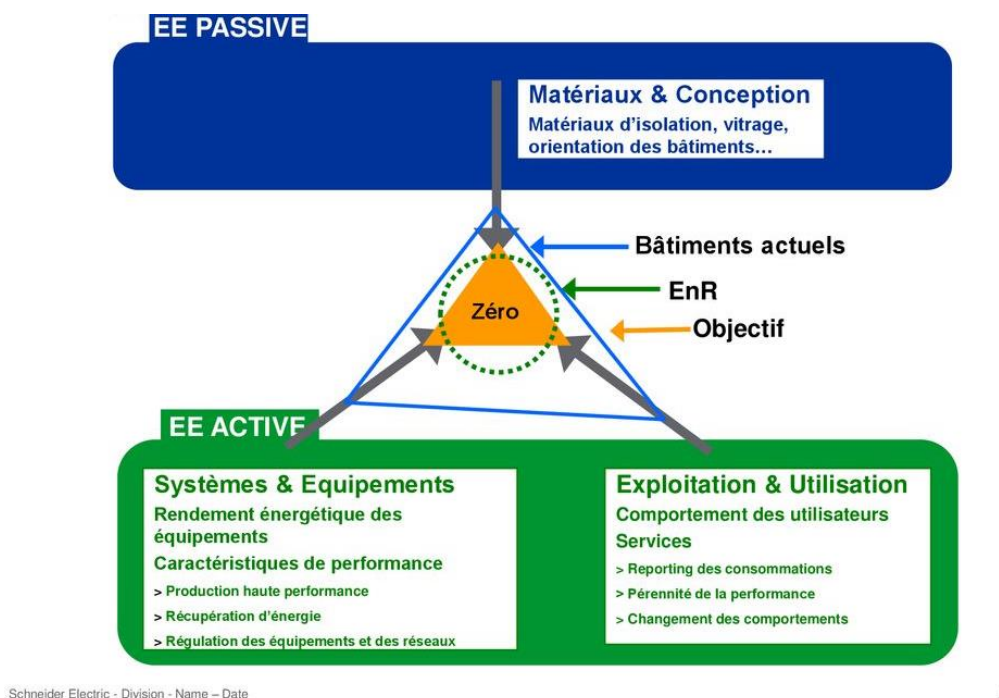


Figure 4.2 : les trois leviers de l'efficacité énergétique (Djahel, 2008)

4-L'efficacité énergétique passive :

L'efficacité énergétique passive est basée sur les principes de « l'éco- construction » qui renvoie à une construction dont les caractéristiques architecturales mettent à profit les ressources climatiques locales pour fournir un environnement intérieur le plus confortable possible, réduisant ainsi la consommation d'énergie associée aux besoins de chauffage ou de climatisation. On citera dans les parties suivantes quelques principes :

4.1-Implantation et orientation du bâtiment

Lors de l'implantation d'un bâtiment dans son assiette, il est nécessaire de prendre en compte le relief du terrain, l'ensoleillement ainsi que les vents locaux (figure 4.3). Grâce à ces éléments, il est possible de limiter les consommations de chauffage, de climatisation et d'éclairage. En matière d'orientation :

- Il faut favoriser l'orientation Sud car elle apporte un éclairage important, une lumière plus facile à contrôler et un ensoleillement maximal en hiver et minimal en été.
- L'orientation Nord assure la meilleure qualité lumineuse, suscitant peu d'éblouissement, ne provoquant pas de surchauffe mais qui peut être insuffisante dans de nombreux cas. C'est une orientation à privilégier pour éclairer les locaux où il est important d'avoir un éclairage constant, sans source d'éblouissement comme les salles de classe par exemple.
- Les orientations Est ou Ouest présentent des caractéristiques identiques avec possibilité d'inconfort visuel par éblouissement en été.

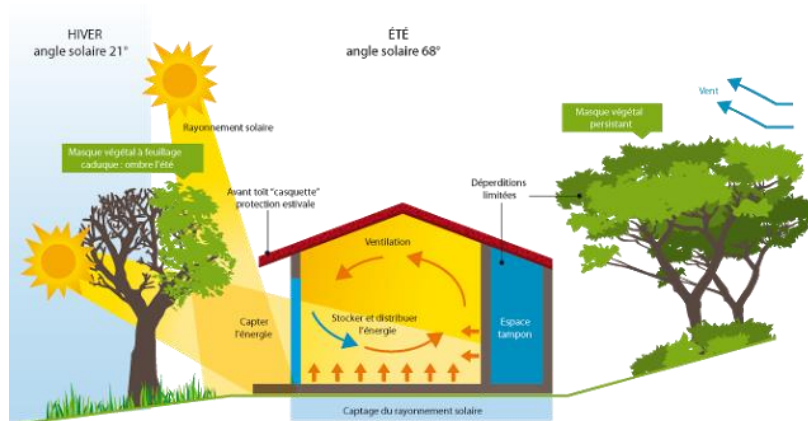


Figure 4.3 : Implantation et orientation optimales du bâtiment.

4.2-Organisation spatiale intérieure du bâtiment

Il est préconisé de disposer les espaces intérieurs d'un bâtiment en fonction du mode d'occupation et de la course solaire comme suit:

- Au Sud, les espaces de jour (salon et séjour) nécessitant chaleur et lumière en journée ;
- Au Nord, les espaces dits « tampons » (cellier, garage, pièces humides), peu utilisés et où le besoin de chaleur est absent ou ponctuel ;
- À l'Est, à l'Ouest ou au Nord, les espaces de nuit (chambre) ou intermédiaires où le besoin de chaleur est réduit. (Liebard et De Herde, 2006)

4.3 -L'enveloppe du bâtiment :

L'enveloppe du bâtiment constitue la surface de régulation des échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur. En matière de déperditions par exemple, la toiture est l'élément principale responsable de 30% des échanges, suivi des murs avec une part de 25%, puis le renouvellement d'air, les fenêtres, les sols et enfin les ponts thermiques avec des parts respectives de 20%, 13%, 7% et 5%. (figure 4.4)

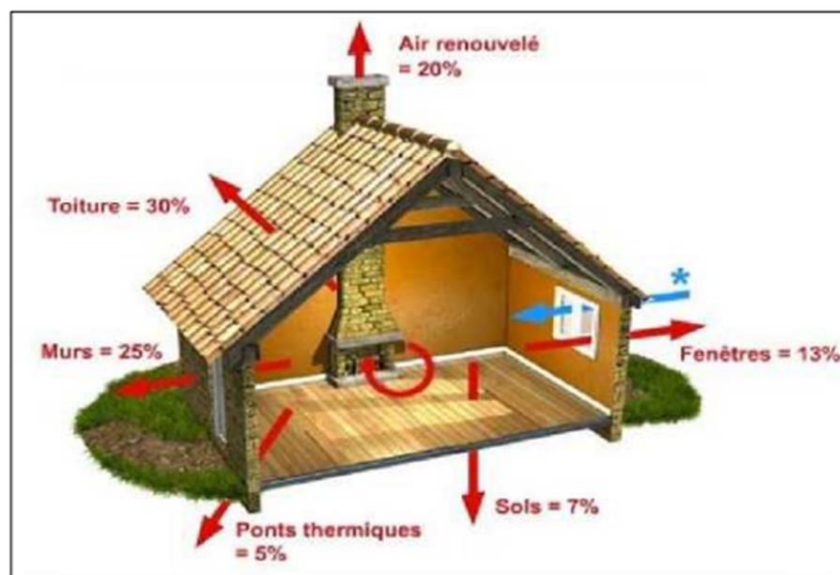


Figure 4.4 : Les sources de déperdition de chaleur de l'enveloppe du bâtiment

Pour réduire les échanges thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment, il est nécessaire d'améliorer son **inertie thermique** par un choix judicieux des matériaux et le recours aux isolants thermiques.

4.3.1-Le choix des matériaux

Le choix des matériaux de construction s'avère important dans la mesure où il faut choisir des matériaux à forte voire très forte inertie thermique, donc isolant très bien du froid en hiver et du chaud en été. Il faudra également se préoccuper de leurs performances environnementales. Ainsi, les matériaux écologiques et biosourcés sont à privilégier.

Les matériaux de construction biosourcés sont des matériaux partiellement ou totalement issus de la biomasse d'origine animale ou végétale (EN 16575, 2014). La nature de ces matériaux est multiple : bois, chanvre, paille, ouate de cellulose, textiles recyclés, balles de céréales, miscanthus (graminées), liège, lin, chaume, herbe de prairie, algues etc. Leurs applications le sont tout autant dans le domaine du bâtiment et de la construction : structure, isolants, mortiers et bétons, matériaux composites plastiques ou encore dans la chimie du bâtiment (peinture, colles...). La figure 4.5 montre quelques exemples de matériaux biosourcés.

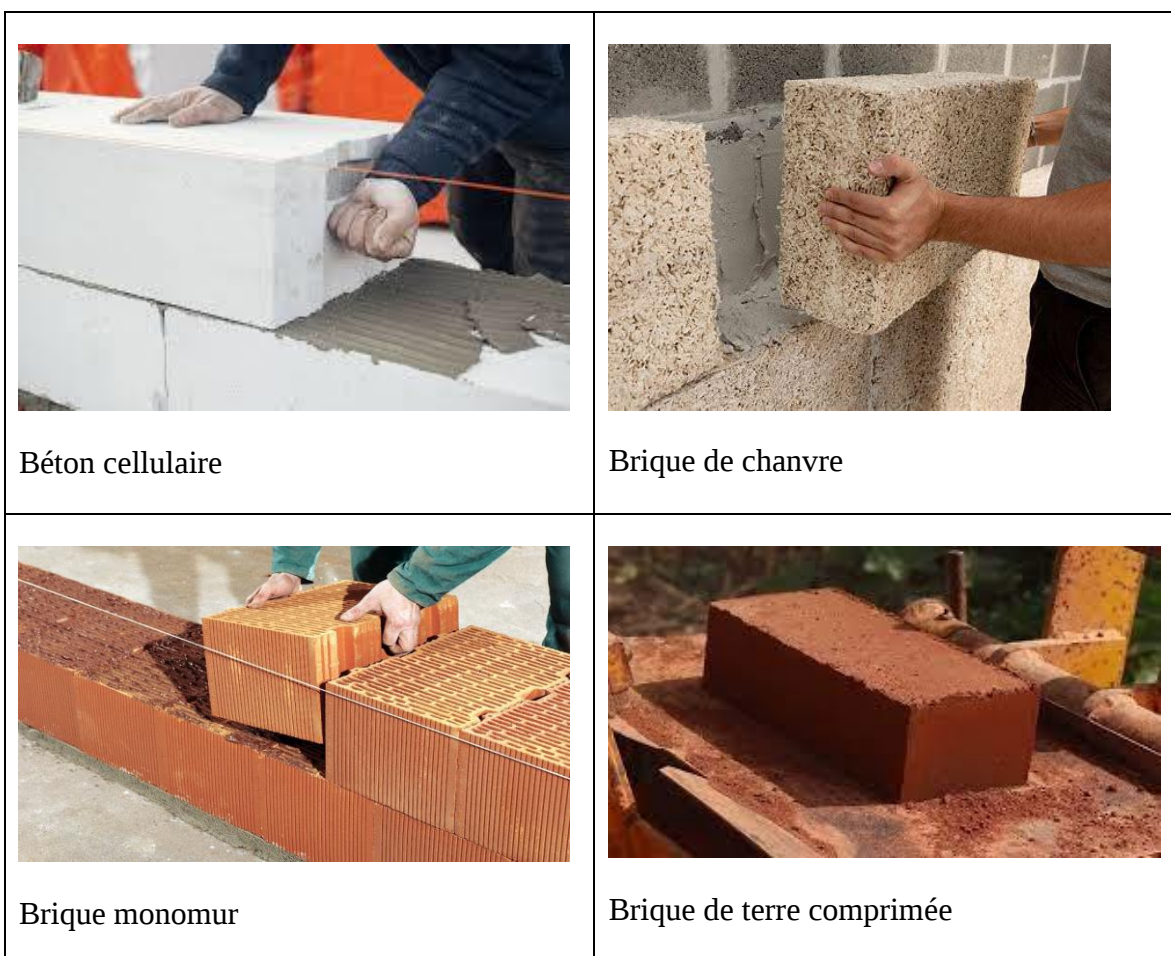


Figure 4.5 : Exemples de matériaux biosourcés

4.3.2-L'isolation thermique :

Un matériau isolant thermiquement est caractérisé par une valeur de **conductivité thermique** inférieure à $0.065\text{W/m.}^{\circ}\text{C}$ (APRUE, 2014). Il existe sur le marché trois grandes familles d'isolants (figure 4.6):

-Les isolants d'origine minérale : tel que la laine de roche et la laine de verre.

-Les isolants d'origine synthétique : tel que le polystyrène et polyuréthane.

-Les isolants d'origine naturelle (écologique) : tel que le liège et le chanvre.



Figure 4.6 : Les types d'isolants thermiques

4.3.3-L'enveloppe végétalisée :

L'intégration des murs et toitures végétalisés (intensives, semi-intensives ou extensives) dans le bâtiment (figure 4.7) permet également d'augmenter l'inertie thermique de l'enveloppe. Ces éléments offrent plusieurs autres avantages tels que:

- Impact sur le confort thermique grâce au phénomène d'évapotranspiration
- Réduire le phénomène de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle urbaine
- Prolongement de la durée de vie de l'enveloppe
- Un refuge pour la biodiversité
- Protection sonore
- Lutter contre la pollution

- Résistance au feu
- La toiture végétalisée est un facteur de rétention des eaux de pluies



Figure 4.7 : Les murs (à gauche) et les toitures (à droite) végétalisés

4.3.4-Les Fenêtres

Les fenêtres ont pour rôle de transmettre la lumière naturelle à l'intérieur du bâtiment, d'assurer la ventilation naturelle, de permettre la vue vers l'extérieur mais également le rôle d'isolation thermique et acoustique. Les performances thermiques des ouvertures dépendent du facteur de transmission thermique U_w . Cette valeur est généralement comprise entre $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ pour un modèle performant à triple-vitrage et $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ pour un simple vitrage (figure 4.8).

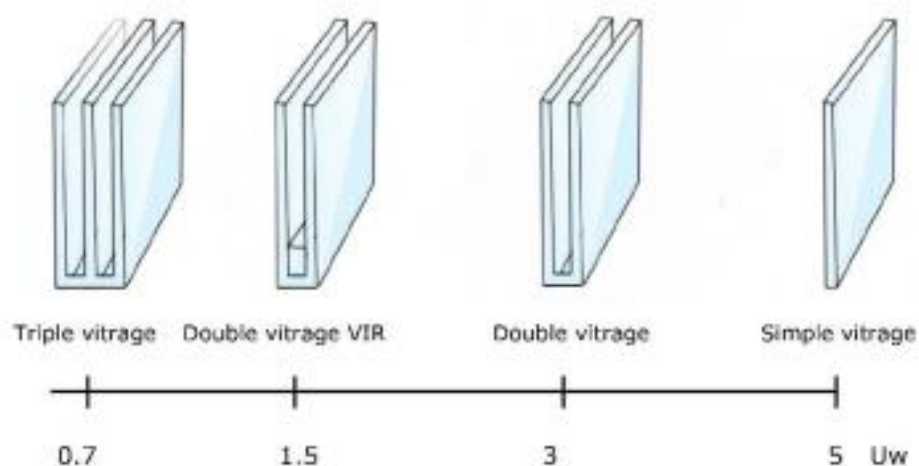


Figure 4.8 : Valeurs U_w de différents types de vitrage.

4.4-L'éclairage naturel

L'utilisation de la lumière naturelle dans le bâtiment présente un triple intérêt :

- **Intérêt économique** par la réduction des consommations d'énergie électrique (jusqu'à 30% de réduction) ainsi que la réduction des gains de chaleur internes produits par l'éclairage artificiel et donc la réduction des besoins en rafraîchissement.
- **Intérêt environnemental** par la réduction des pollutions générées par la production de l'électricité et les équipements électriques.
- **Intérêt psycho-physiologique** : rôle bactéricide de la lumière naturelle, confort visuel, productivité, santé....

Les dispositifs d'éclairage naturel sont classés en deux grandes catégories :

- **L'éclairage latéral** qui se fait par des ouvertures pratiquées dans un mur de façade ou plus.
- **L'éclairage zénithal** : il peut être direct comme les skylights, les dômes et les verrières ; indirect comme les sheds, les lanterneaux et les tubes lumières.

La quantité de lumière naturelle pénétrant à l'intérieure du bâtiment dépend de plusieurs facteurs tels que la taille de l'ouverture exprimée par l'indice de vitrage I_v , sa position, son orientation, type de menuiserie, type de vitrage, la couleur des surfaces intérieures et du mobilier ainsi que les masques extérieurs.

5-L'efficacité énergétique active :

Les postes de consommation d'énergie dans un bâtiment sont : le chauffage, la climatisation, la production d'eau chaude sanitaire ECS, l'éclairage et l'électricité spécifique (équipements de cuisson, électroménagers et multimédia). Le choix de ces systèmes techniques doit se faire en fonction de leurs performances énergétiques afin de diminuer la consommation énergétique globale.

Les indicateurs de performance des systèmes techniques varient d'un domaine à l'autre, on citera :

- « **Energy Efficiency Ratio** » EER pour un système de climatisation.

- « **Coefficient of Performance** » COP pour les systèmes de chauffage biomasse, gaz, ou électrique.
- « **Specific Fan Power** » SFP (W/m³.s) pour les systèmes de ventilations.
- « **Indice d'efficacité lumineuse** » (Lm/W) pour l'éclairage.

5.1- Energy Efficiency Ratio (EER) :

Il s'agit du rapport entre l'énergie utile frigorifique et l'énergie consommée par le système de climatisation.

$$\text{EER} = \frac{\text{Energie utile frigorifique}}{\text{Energie consommée}}$$

Les coefficients EER compris **entre 3 et 4** sont de bonnes valeurs. Par exemple : si le EER =3, cela signifie que pour 1 kW consommé, le climatiseur produit 3 KW d'énergie.

5.2-Coefficient of Performance (COP) :

C'est le rapport entre l'énergie utile calorifique et l'énergie consommée par le système de chauffage. La valeur du COP est comprise entre 0 et 7. Plus le COP du système est élevé, moins il va consommer d'énergie.

$$\text{COP} = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie consommée}}$$

5.3-Indice d'efficacité lumineuse El:

C'est le rapport entre le flux lumineux émis par une lampe (en lumen) et la puissance électrique absorbée par cette dernière (en watt). Plus cette efficacité lumineuse est importante plus le système d'éclairage est économique. Le tableau 4.1 définit les différentes classes d'efficacité des lampes en fonction de l'indice El.

Tableau 4.1 : Les différentes classes des systèmes d'éclairage.

<https://www.ledsgo.fr/blog/technique/nouvelles-reglementations-sur-l-eclairage>

Classe d'efficacité	Efficacité lumineuse lm/W
A	Supérieur à 210 lumen par watt
B	185 à 210 lumen par watt
C	160 à 185 lumen par watt
D	135 à 165 lumen par watt
E	110 à 135 lumen par watt
F	85 à 110 lumen par watt
G	Inférieur à 85 lumen par watt

NB : en Algérie, l'arrêté interministériel du 29 novembre 2008 définit la classification d'efficacité énergétique des appareils à usage domestique soumis aux règles spécifiques d'efficacité énergétique et fonctionnant à l'énergie électrique. L'arrêté définit les sept classes d'efficacité énergétique (classe A à G) des différents appareils selon les coefficients EER, COP et EL.

5.4-Specific Fan Power (SFP) :

Il s'agit de la puissance électrique consommée par débit d'air transporté dans un système de ventilation mécanique, exprimée en (W/m³.s). Le tableau 4.2 montre les cinq classes des systèmes de ventilation selon la norme EN 13779 (2007). Les systèmes appartenant aux classes SFP 1 et SFP 2 sont les plus performants.

Tableau 4.2 : les différentes classes des systèmes de ventilation (EN 13779, 2007)

Classe	Puissance électrique par m ³ /s transporté
SFP1	... < 500 W par m ³ /s
SFP2	500 < ... < 750 W par m ³ /s
SFP3	750 < ... < 1250 W par m ³ /s
SFP4	1250 < ... < 2000 W par m ³ /s
SFP5	2000 < ... W par m ³ /s

Cours 5 : Certification énergétique des bâtiments

Introduction :

L'obtention d'une certification est une démarche engagée par un maître d'ouvrage ou un propriétaire qui souhaite faire contrôler et reconnaître la qualité de ses constructions. Ces différents labels et certifications sont des indicateurs en termes de confort, d'économie d'énergie et de respect de l'environnement. Ils s'appuient sur des référentiels et sont soumis à des procédures d'audit et d'évaluation.

1-Certificat de Performance Énergétique :

Un **Certificat de Performance Énergétique** est un document officiel qui évalue l'efficacité énergétique d'un bâtiment, d'une maison, d'un bureau ou de locaux en indiquant sa consommation d'énergie et les émissions de CO₂ associées. Elle repose sur une évaluation réalisée par un technicien certificateur agréé, qui inspecte divers aspects techniques du bâtiment. En Europe, la directive relative à la Performance Énergétique des Bâtiments (PEB) impose aux États membres de mettre en place un système de certification énergétique des bâtiments.

Les objectifs du certificat de performance énergétique sont :

- Informer les futurs locataires ou acquéreurs sur la performance énergétique d'un bien.
- Permettre de comparer différents biens immobiliers.
- Inciter à effectuer des travaux d'économie d'énergie en contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

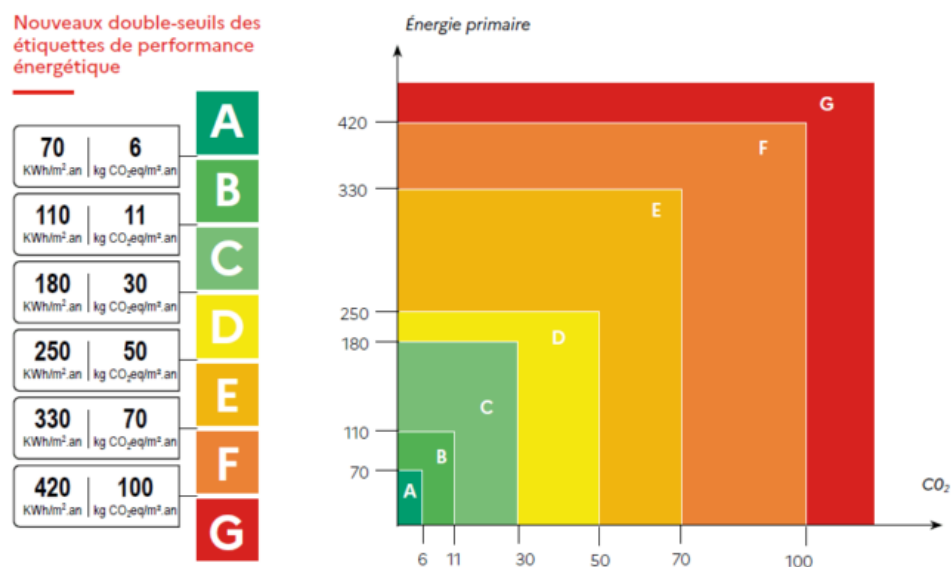
La réalisation du certificat par un diagnostiqueur immobilier décrit, de manière réglementée :

- Le bâtiment ou le logement (superficie, murs, fenêtres, matériaux...) ;
- Ses équipements de chauffage, de production d'eau chaude sanitaire, de refroidissement, d'éclairage et les auxiliaires type VMC ;
- Une estimation de la quantité d'énergie consommée dans le logement.

Le bilan énergétique annuel affiché par le certificat peut être évalué de deux façons :

- **Méthode conventionnelle** : Soit par l'intermédiaire du recensement des caractéristiques de l'enveloppe thermique du bien ainsi que des performances techniques des équipements qui le composent, le tout renseigné dans un logiciel utilisant le moteur de calcul réglementaire 3CL. Le résultat est donc issu d'une simulation selon une méthode normée.
- **Sur la base de factures** : le calcul est basé sur les données issues de la récolte de trois années consécutives des consommations d'énergies (électricité, gaz, fioul, réseaux urbains) du bâtiment (Maes P., 2010).

Ce diagnostic permet de positionner le bâtiment dans une des sept classes de l'étiquette de performance énergétique et environnementale (figure 5.1). Les bâtiments de classe F et G dits « passoire énergétique » devront subir des opérations de réhabilitations et de remplacement des équipements énergivores pour se remettre dans les normes.



Source : Ministère de la Transition énergétique

Figure 5.1: Etiquettes énergétique et environnementale d'un bâtiment.

2-Certification BREEAM

Développée et délivrée par le Building Research Establishment (BRE), la certification BREEAM (pour Building Research Establishment Environmental Assessment Method) est un standard britannique qui date de 1990 pour mesurer la performance environnementale des bâtiments.

La certification BREEAM évalue la performance environnementale des bâtiments, c'est-à-dire la conception à faible impact environnemental, réduction des émissions de carbone, durabilité et résilience de la conception, adaptation au changement climatique, valeur écologique et protection de la biodiversité, suivant une grille de dix familles de critères (BRE, 2009) mentionnées dans la figure 5.2.



Figure 5.2: Les familles de critères de la certification BREEAM.

<https://www.wattsense.com/fr-fr/blog/gestion-de-lenergie/certification-breeam/>

Selon les dernières statistiques du BRE (2024), il existe 2,33 millions de bâtiments enregistrés BREEAM à travers 102 pays, dont 610 000 ont reçu la certification à ce jour. Comme exemple, on citera le bâtiment du campus universitaire Kampusareena en Finlande (figure 5.3) qui a été certifié « Very good » en 2016. Le bâtiment intègre plusieurs technologies, à savoir :

- 560 panneaux photovoltaïques qui fonctionnent également comme des stores solaires car ils sont installés sur les murs au-dessus des fenêtres des côtés sud et ouest.
- Les appareils d'eau dans le bâtiment sont largement économes en eau dispose d'un système automatisé de détection des fuites d'eau installé.
- Le toit vert aide à gérer le ruissellement des eaux de surface et à absorber les particules et la chaleur.



Figure 5.3 : Le bâtiment Kampusareena en Finlande certifié « BREEAM Very good »

3-Certification LEED

Leadership in Energy and Environmental Design LEED a été créé aux Etats-Unis en 1998 par US Green Building Council et constitue une certification volontaire bénéficiant d'une reconnaissance internationale. Elle offre une vérification indépendante par une tierce partie attestant qu'un bâtiment, une habitation ou une communauté a été conçu et construit à l'aide de stratégies visant à atteindre une performance élevée dans des domaines clés de de l'environnement et de la santé des humains.

Le système LEED évalue chaque phase de chaque projet en s'appuyant sur neuf grandes catégories de critères (figure 5.4) pour lesquelles des crédits sont octroyés comme suit :

- Localisation et transport (16 points)
- Aménagement écologique des sites (10 points)
- Gestion efficace de l'eau (11 points)
- Énergie et atmosphère (33 points)

- Matériaux et ressources (13 points)
- Qualité des environnements intérieurs (16 points)
- Innovation (6 points)
- Processus intégrative (1 point)
- Priorité régionale (4 points)

Ainsi, chaque projet est évalué sur un total de 110 points (USGBC, sd).

(<https://www.usgbc.org/articles/explore-leed-credits-interactive-leed-scorecard>)



Figure 5.4 : Les familles de critères de la certification LEED.

Chaque bâtiment est classé dans une des cinq catégories selon son utilisation : LEED NC (nouvelles constructions ou rénovations majeures), LEED BE (bâtiments existants), LEED SC (structure et coque), LEED H (habitations) et LEED IC (bâtiments commerciaux).

Selon les dernières statistiques du USGBC (2024), il existe 197.000 bâtiments certifiés LEED à travers 186 pays. On citera comme exemple le bâtiment Crystal (figure 5.5) situé à Londres et certifié LEED Platine. The Crystal utilise un générateur photovoltaïque pour produire 20 % de la demande totale en électricité, et seulement 10 % de l'eau utilisée dans le bâtiment provient du réseau public, la majorité provenant des réservoirs de récupération des eaux de pluie sur place et de la récupération des eaux noires. De plus, le bâtiment dispose de systèmes opérationnels de surveillance, de contrôle et d'automatisation pour l'eau et l'électricité, gérés à distance depuis Francfort, en Allemagne.

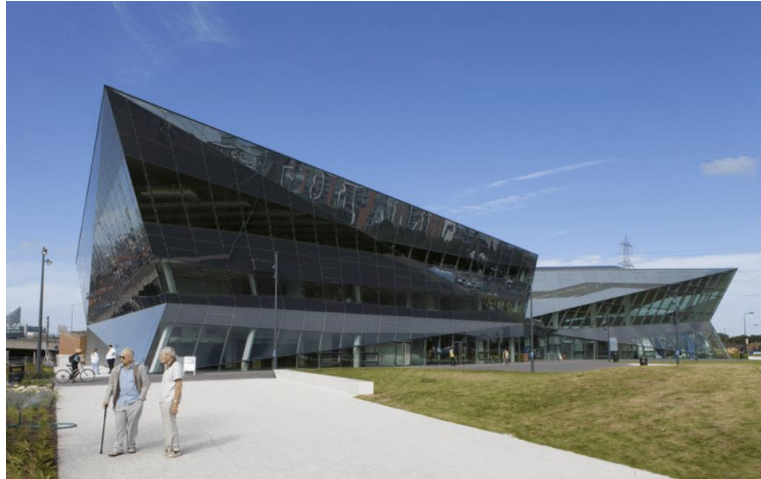


Figure 5.5 : The Crystal Building à Londres certifié LEED platine.

4-La démarche Haute Qualité Environnementale HQE

La qualité environnementale du bâtiment correspond « aux caractéristiques du bâtiment et du reste de la parcelle de l'opération de construction ou d'adaptation du bâtiment qui lui confère l'aptitude à satisfaire les besoins de maîtrise des impacts du bâtiment sur l'environnement extérieur et de création d'un environnement intérieur sain et confortable » (Hetzel, 2003)

La démarche de Haute Qualité Environnementale est une démarche globale de management du projet visant à minimiser l'impact du bâtiment sur son environnement (intérieur, local ou global) durant l'ensemble de son cycle de vie.

La démarche HQE s'appuie sur 14 cibles regroupées en 4 sous familles : éco-construction, éco-gestion, confort et santé (figure 5.6).

Pour respecter la « Démarche HQE », le bâtiment doit atteindre au minimum :

-7 cibles au niveau de base – B

-4 cibles supplémentaires (soit 11 cibles) au niveau performant – P

-3 cibles supplémentaires (soit 14 cibles) au niveau très performant – TP

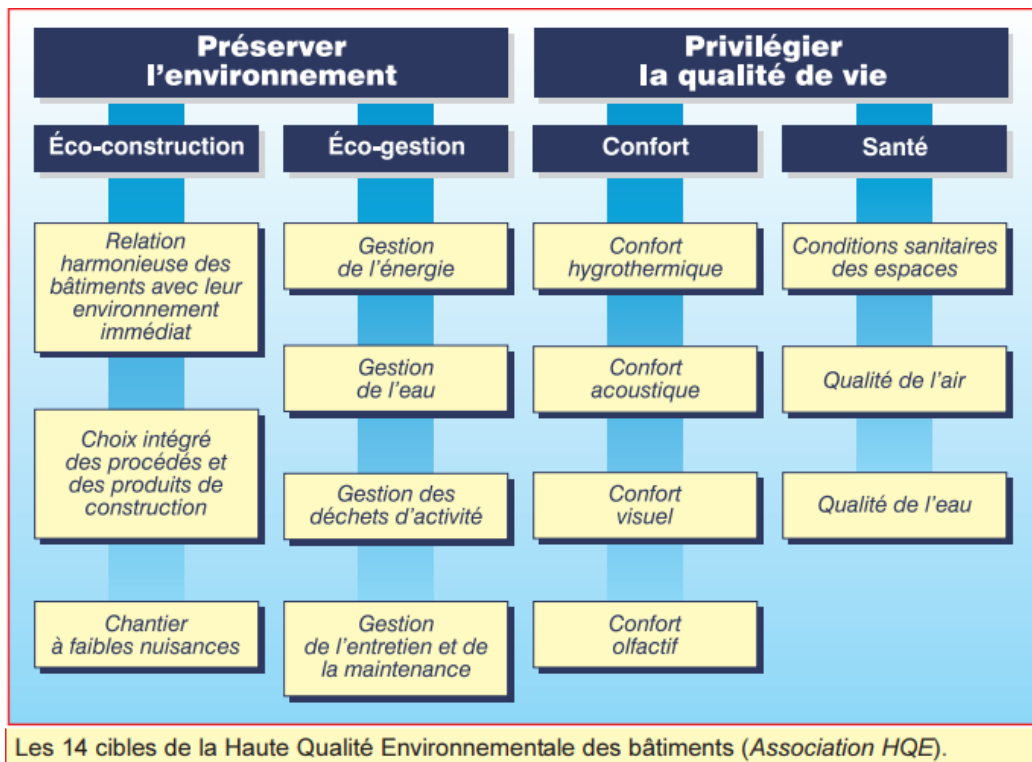


Figure 5.6: Les 14 cibles de la démarche HQE.

Selon l'organisme CERTIVEA, 6 645 opérations certifiées ou labellisées HQE sont recensées dans le monde dans plus de 21 pays (Europe, Afrique, Asie, Amérique). L'école Daniel Pennac (figure 5.7) en France est un exemple de bâtiment HQE. Le projet intègre les éléments suivants:

- Le toit avec 315 m² de panneaux photovoltaïques et 20m² de panneaux solaires pour chauffer l'eau sanitaire.
- Le bâtiment est isolé grâce à 20 cm de polystyrène extrudé Placé à l'extérieur qui possède un haut pouvoir en tant qu'isolant thermique.,
- Les brises soleil : grâce à des lames extérieures de couleur s'orientent automatiquement, le bâtiment orienté sud est tempéré
- Le chauffage et la ventilation sont régulées automatiquement par la GTB (gestion technique du bâtiment).
- L'ensemble de l'éclairage est géré par des détecteurs mesurant l'éclairement ambiant.
- Les salles de classe de l'étage ainsi que la cuisine sont équipées de puits de lumière,



Figure 5.7 : Ecole Daniel Pennac (France) –bâtiment HQE

En résumé, le tableau 5.1 est un tableau comparatif entre les certificats BREEAM, LEED et HQE.

Tableau 5.1 : Comparaison entre les certificats BREEAM, LEED et HQE.

HAUTE QUALITÉ ENVIRONNEMENTALE (HQE)	BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT ENVIRONMENTAL ASSESSMENT METHODOLOGY (BREEAM)	LEADERSHIP IN ENERGY AND ENVIRONMENTAL DESIGN (LEED)
	Date de création	
2004/2005	1990/2011	1998/2018
	Organisme	
CERTIVEA	BRE	USGBC / GBCI
	Nombre de critères et cibles	
Eco-construction : Relation bâtiment et environnement, matériaux, chantier à faible impact Eco-gestion : énergie, eau, déchets, maintenance Confort : hygrothermique, acoustique, visuel, olfactif Santé : qualité sanitaire des espaces, de l'eau et de l'air	· Management, · Santé & Bien-être · Énergie · Transport · Matériaux · Eau · Déchets · Pollution · Paysage & écologie · Innovation	· Management · Durabilité du site · Transport & Localisation · Énergie & Rejets atmosphériques · Qualité environnementale de l'environnement intérieur · Gestion de l'eau · Innovation · Priorités régionales · Matériaux & Ressources
	Niveaux de performance	
Bon / Très bon / Excellent / Exceptionnel ★ ★ ★ ★ ★	Pass / Good / Very good / Excellent / Outstanding ★ ★ ★ ★ ★	Certified / Silver / Gold / Platinum ★ ★ ★ ★ ★
Coût à payer au certificateur pour un immeuble de 10 000 m²		
~20 700 € dont +6 640€ pour un label énergétique	~8 780 € ne permettant pas l'obtention de labels HPE	~6 740 € ne permettant pas l'obtention de labels HPE
	Procédures	
3 audits (programme, conception, réalisation) réalisés par une tierce partie désignée par CERTIVEA	Rapport d'évaluation réalisé par un BREEAM Assessor et vérifié par le BRE	Enregistrement du projet sur une plateforme en ligne et évaluation du dossier par le GBCI

Cours 6 : Les bâtiments intelligents

1-Définition du bâtiment intelligent :

Le concept de bâtiment intelligent ou Smart Building a vu le jour dans les années 80 puis a gagné une popularité remarquable au cours des dernières années.

D'une manière générale, c'est un bâtiment dont tous les fluides (eau, air, électricité et communication) sont gérés et contrôlés à distance en temps réel offrant des services IT (Information Technology) étendus à ses occupants et aux visiteurs, ainsi qu'à son gestionnaire. C'est aussi un bâtiment dont l'IT est un vecteur important de la sobriété énergétique et de l'éco-responsabilité. Son intelligence sert à mieux gérer ses systèmes techniques bâtimentaires, donc de mesurer ses consommations de fluides, mais aussi d'abaisser son coût d'exploitation et sa consommation énergétique, le rendant ainsi plus écoresponsable (Genin G et Meyer C, 2017).

2-Caractéristiques du bâtiment intelligent :

Nous pouvons retenir cinq caractéristiques fondamentales des bâtiments intelligents :

- 1) l'automatisation : maintenance prédictive, identification en temps réel des défauts/comportements inattendus,
- 2) l'adaptabilité : reconnaître, apprendre et réagir aux besoins des utilisateurs en termes de confort, de santé et de sécurité,
- 3) l'interactivité : donner aux occupants du bâtiment les moyens de prendre le contrôle direct de leur consommation d'énergie,
- 4) l'efficacité : les bâtiments doivent être capables de minimiser leur demande d'énergie et de générer de l'énergie renouvelable, afin de couvrir leur consommation d'énergie,
- 5) la multifonctionnalité : la capacité à permettre l'exécution de plus d'une fonction dans un bâtiment) (Al Dakheel et al ., 2020).

3-Fonctions du bâtiment intelligent :

Les trois fonctions de base du bâtiment intelligent sont :

- **Données et analyse** : le gestionnaire de bâtiment ou le facility manager d'un smart building peut en visualiser l'occupation à tout moment (bureaux, salles de réunion, cantine, etc.). En outre, il peut recueillir des statistiques sur l'historique du taux d'occupation et les utiliser pour prendre des décisions en ce qui concerne, par exemple, la surface utile requise ou l'agencement de la pièce.
- **Automatisation et optimisation** : dans un bâtiment intelligent, les différentes installations techniques (système de chauffage ou de refroidissement, protections solaires, éclairage, etc.) peuvent être réglées sur la base d'une multitude de paramètres tels que la température extérieure, l'apport de lumière naturelle, etc. Par ailleurs, le bâtiment est capable d'apprendre de son utilisation en vue d'optimiser continuellement le réglage de ses systèmes. Les utilisateurs sont toutefois libres d'adapter les systèmes à tout moment selon leurs souhaits.
- **Interaction avec l'utilisateur** : les smart buildings permettent aux utilisateurs d'interagir avec le bâtiment par le biais d'applications (sur leur smartphone, tablette ou ordinateur portable) et d'utiliser tous les services offerts par le bâtiment à partir d'un environnement central (accès au bâtiment, gestion de l'éclairage et des protections solaires, réservation d'un poste de travail, d'une salle de réunion ou d'une place de parking, commande d'un repas, notification de problèmes, etc.). (Buidwise, 2024)

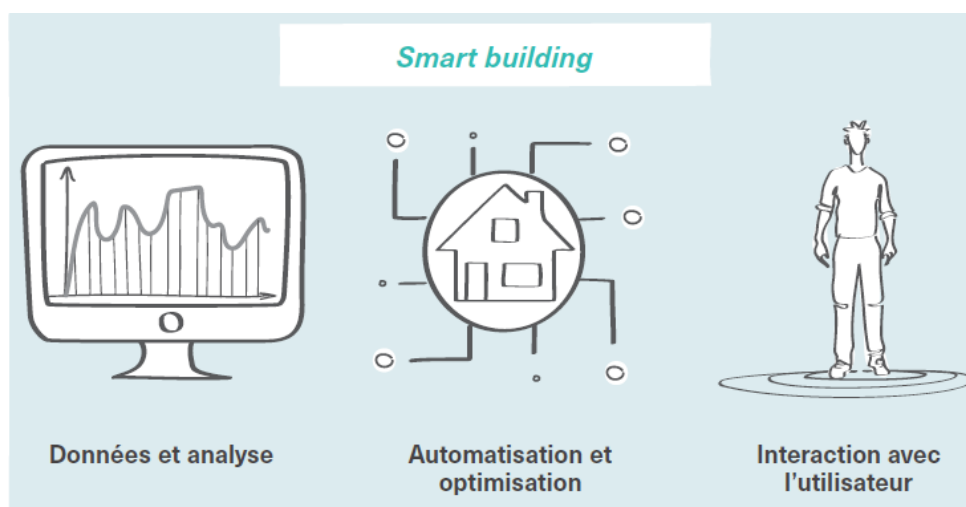


Figure 6.1 : Les trois fonctions du bâtiment intelligent (Buildwise, 2024)

4-Objectifs du bâtiment intelligent :

L'objectif ultime de la conception et de la construction d'un bâtiment intelligent est de **créer de la valeur ajoutée pour les utilisateurs, le bâtiment et l'environnement.**

Cela se traduit de plusieurs manières :

- **Maximisation des aspects positifs tels que :**

- le confort (acoustique, visuel, lié à la qualité de l'air, etc.)
- la flexibilité
- l'expérience utilisateur
- l'optimisation de l'occupation
- la durabilité

- **Diminution des aspects négatifs tels que :**

- la consommation d'énergie
- l'impact environnemental
- les coûts, dont ceux liés au cycle de vie : total des coûts relatifs à la construction, des coûts de l'énergie, des frais relatifs à la maintenance, au nettoyage et aux renouvellements, des frais opérationnels, etc. (Buidwise, 2024)

5-Les technologies du bâtiment intelligent :

5.1-La Domotique

La domotique, du latin « Domus » signifiant maison, est l'ensemble des technologies de l'électronique, de l'information et des télécommunications permettant d'automatiser des bâtiments. Le principe de la domotique est la gestion centralisée des équipements techniques (chauffage, sécurité, éclairage,...etc) et du multimédia dans un bâtiment (figure 6.2). Elle vise à apporter des fonctions de confort, de sécurité, d'économie d'énergie et de communication aux maisons ou appartements équipés (Bediar et Lemale, 2016). Certains l'appellent la « robotique domestique ».



Figure 6.2 : Exemples d'application de la domotique

5.2-L'immatique :

5.2.1-Définition :

L'immatique est un mot formé à partir du mot « immeuble » et du suffixe « tique » qui implique un rapport avec l'informatique ou l'électronique. L'immatique désigne ainsi l'ensemble des systèmes automatiques, électroniques, informatiques et de télécommunications installés dans un grand bâtiment (immeuble, site industriel, etc.).

5.2.2-Principe de l'immatique :

L'immatique est plus complexe que la domotique car elle doit gérer un plus grand nombre d'appareils. Ces dispositifs peuvent concerner le chauffage, l'éclairage, la ventilation, la communication, l'énergie ou encore la sécurité. Ils sont contrôlés à distance grâce à des modules ou un terminal. Les interfaces de contrôle peuvent être des télécommandes, des écrans tactiles ou des appareils mobiles (téléphone, PDA, etc.) (Bediar et Lemale, 2016).

5.2.2-Les différents types d'immotique :

On distingue deux types de solutions immotiques : **la gestion technique de bâtiment (GTB)** et **la gestion technique centralisée (GTC)**

a) La Gestion Technique Centralisée (GTC)

La Gestion Technique Centralisée est un système de traitement des informations d'un seul domaine technique (chauffage, ou éclairages, ou climatisation, etc.) provenant d'un même site qui utilise généralement un réseau de communication propriétaire (propre au constructeur). <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-immotique-10722/>

b) La Gestion Technique de Bâtiment (GTB)

La Gestion Technique du Bâtiment (Building Management System BMS en anglais) est souvent utilisée pour désigner le système informatique d'aide à la gestion des équipements techniques d'un bâtiment qui sont classés en deux grandes familles: **les équipements liés au confort énergétique** (chauffage, ventilation, climatisation, eau chaude sanitaire...) et **les équipements liés à la distribution électrique** (alarmes, contrôles d'accès, bureautique, ascenseurs...). Ces équipements sont eux-mêmes régulés individuellement par des systèmes de mesure et d'action (compteurs, capteurs, détecteurs, actionneurs). La GTB permet de "connecter" ces équipements techniques dans un but général de : sécuriser- maîtriser - économiser – gérer.(CEREMA, 2017)

La GTB est un concept communiquant numérique et informatique qui présente les avantages suivants :

- Économies d'énergie
- Amélioration du confort, bien être au sein du bâtiment
- Réduction des coûts d'exploitation voire d'installation
- Facilité d'utilisation - autonomie du client
- Réduction des déplacements et intervention très rapides à distance
- Fiabilité des installations - fonctionnement sans discontinuité
- Surveillance du bâtiment 24h/24 7j/7
- Retransmission des alarmes par mail, fax, sms ou serveur local

- Sécurité des utilisateurs
- Compatibilité des systèmes avec quasi toutes les marques d'automates du marché
- Possibilité d'optimiser et valoriser l'équipe technique

La gestion technique du bâtiment comprend généralement les trois missions suivantes :

- **la surveillance des installations techniques** : assurer la sécurité et la disponibilité des installations en optimisant les opérations de maintenance (traitement des alarmes, suivi des interventions enregistrées dans un historique) ;
- **la supervision** : assurer le confort des occupants en optimisant les coûts d'exploitation (mesures, comptages, réglage et programmation des équipements)
- **le suivi (principalement énergétique)** : mesurer en détail les consommations du bâtiment et mettre en place un plan de suivi (mesure de l'efficacité énergétique, bilan, pistes d'améliorations...).

A chaque mission de la gestion technique, correspond un système informatique plus ou moins avancé :

- **Système terrain** qui mesure et détecte des anomalies éventuelles : points de mesure et d'action, compteurs, capteurs, détecteurs, actionneurs...
- **Système régulation** qui mesure et agit automatiquement : mesure, programme, règle, actionne les équipements...
- **Système d'archivage** qui est un calculateur « cerveau » : communique, enregistre, traite, synthétise...(CEREMA, 2017)

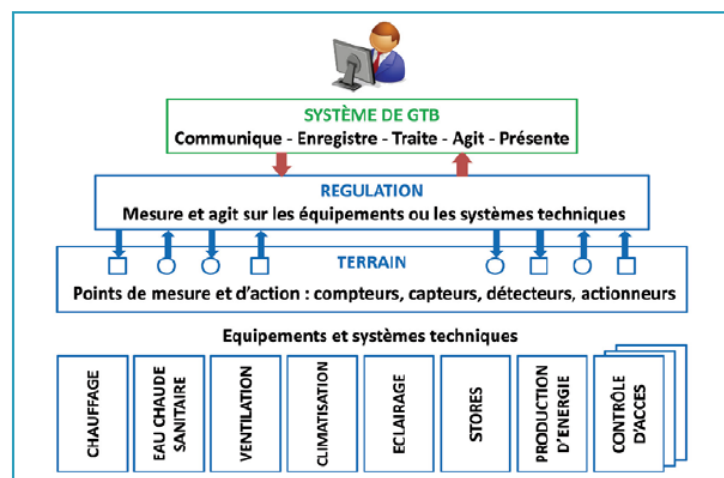


Figure 6.3 : système de Gestion Technique du Bâtiment (CEREMA, 2017)

6-Les étapes d'un projet de bâtiment intelligent :

La conception d'un bâtiment intelligent passe par les étapes habituelles d'un bâtiment avec quelques spécificités liées à l'intégration des systèmes intelligents qui sont :

6.1-Phase de programmation :

Son objectif est de définir et prescrire les solutions intelligentes du bâtiment.

Durant cette phase, le maître d'ouvrage doit définir ses attentes et ses contraintes en impliquant un maximum d'interlocuteurs et d'utilisateurs. Une étude fonctionnelle débouchant sur un cahier de charge fonctionnel, établi à la suite d'entretiens et d'analyses menées par un bureau d'étude ou un cabinet d'architecte.

6.2-Phase de conception :

L'objectif de cette étape est de concevoir et choisir les solutions intelligentes : cette phase s'organise en déterminant les composants à même de répondre à la mise en œuvre de solutions intelligentes en se basant sur les attentes et besoins du maître d'ouvrage sur le plan technique/technologique (régulation, gestion et de communication) mais aussi sur le plan économique.

6.3-Phase de réalisation ou d'installation :

Son objectif est d'installer et mettre en place les équipements.

L'installation des équipements doit être réalisée par des entreprises ayant une expertise et des compétences dans les techniques actuelles de gestion énergétique. Le suivi de chantier par le maître d'œuvre d'exécution est essentiel : il doit être attentif et anticiper les difficultés, notamment sur la non-activité » et la collaboration entre les différents lots.

6.4-Phase de réception :

Son objectif consiste à vérifier que le bâtiment est conforme au cahier des charges, assurer la prise en main des solutions intelligentes et sensibiliser les utilisateurs à leur fonctionnement.

6.5-Phase d'exploitation :

Son objectif : suivre, contrôler et améliorer l'efficacité énergétique.

Cette étape nécessite de faire appel à un prestataire pour garantir la maintenance optimale des solutions intelligentes. Cette fonction peut être exercée par l'exploitant, le fournisseur de matériel. L'analyse des bilans de consommation et de la gestion technique permet de déterminer des actions correctives ou des évolutions potentielles des équipements. (Bediar et Lemale, 2016)

7-Les réseaux électriques intelligents au service du bâtiment intelligent

7.1-Définition du réseau électrique intelligent :

Un réseau électrique intelligent (ou « smart grid » en anglais) désigne un réseau électrique communiquant qui intègre des technologies de l'information et de la communication. Ces technologies sont utilisées à tous les niveaux du réseau : production, transport, distribution et consommation.

En collectant des informations sur l'état du réseau, les smart grids contribuent à une adéquation entre production, distribution et consommation et améliorent ainsi son exploitation. Ils permettent aussi le développement d'usages nouveaux, tels que l'autoconsommation, la recharge de véhicules électriques et le stockage d'électricité (Beddiar et Lemale, 2016).

L'ensemble du système de réseau intelligent est automatisé pour surveiller la consommation d'électricité à tous les endroits. Ce système permet la surveillance, le contrôle, la communication et l'analyse au sein de la chaîne d'approvisionnement pour aider à réduire la consommation et les dépenses énergétiques, à améliorer l'efficacité et à maximiser la fiabilité et la transparence de la chaîne d'approvisionnement énergétique.

7.2-Caractéristiques du réseau électrique intelligent :

Les réseaux intelligents peuvent être définis selon quatre caractéristiques en matière de :

- **Flexibilité** : ils permettent de gérer plus finement l'équilibre entre production et consommation ;
- **Fiabilité** : ils améliorent l'efficacité et la sécurité des réseaux ;
- **Accessibilité** : ils favorisent l'intégration des sources d'énergies renouvelables sur l'ensemble du réseau ;
- **Économie** : ils apportent, grâce à une meilleure gestion du système, des économies d'énergie et une diminution des coûts (à la production comme à la consommation).

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reseau-intelligent-smart-grid>

7.3-Les composantes du réseau électrique intelligent :

Les réseaux électriques intelligents intègrent les composantes suivantes :

- **Capteurs** : Mesurent en temps réel les paramètres du réseau (tension, courant, fréquence, etc.).
- **Compteurs intelligents** : Collectent les données de consommation et communiquent avec le réseau.
- **Actionneurs dans les réseaux** : Ce sont en général des dispositifs qui permettent de mieux gérer les transits de puissance ou d'autres variables du réseau comme par exemple la tension.
- **Dispositifs de coupures rapides et protections intelligentes** comme les interrupteurs ou les organes de manœuvres télécommandables.
- **Réseaux de communication**: Assurent la transmission des données entre les différents éléments du réseau.
- **Systèmes de gestion**: Analysent les données et prennent des décisions en temps réel.
- **Stockage d'énergie**: Permet de stocker l'énergie excédentaire et de la restituer lorsque la demande est élevée. (Hadjsaid et Sabonnadière, 2015)

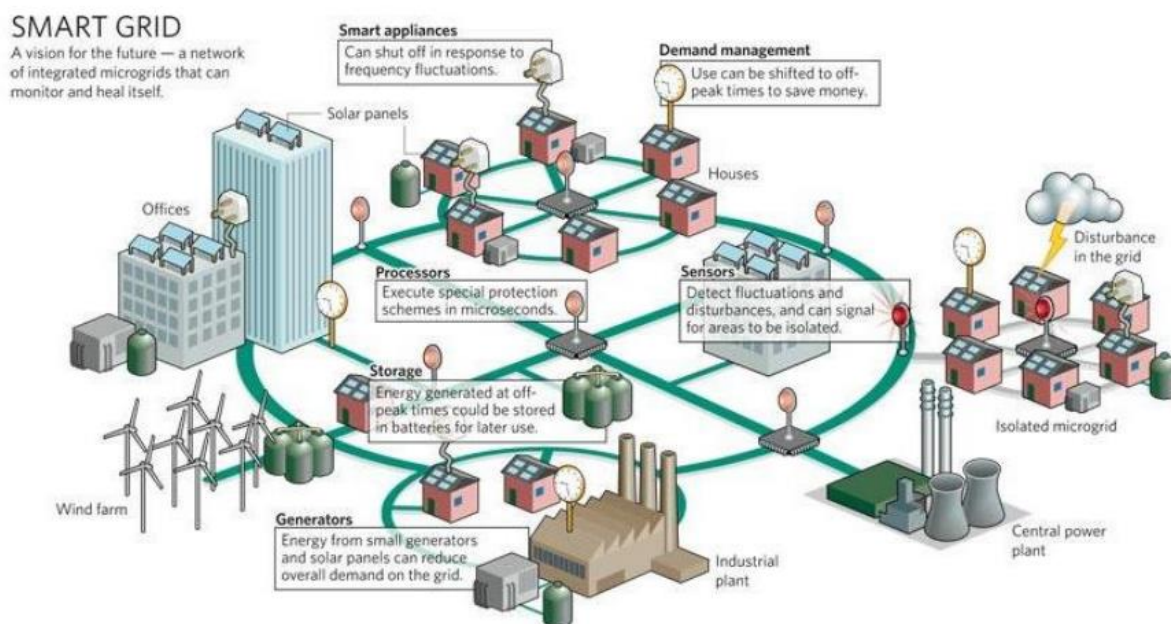


Figure 6.4 : Les composantes du réseau électrique intelligent

7.4-Les clés de fonctionnement des réseaux électriques intelligents :

Le tableau 6.1 présente une comparaison entre les clés de fonctionnement des réseaux électriques traditionnels et intelligents.

Tableau 6.1 : Comparaison entre un réseau électrique traditionnel et un réseau intelligent

Réseau électrique traditionnel	Réseau électrique intelligent
Structure centralisée: Une seule source d'énergie (centrale électrique) alimente un grand nombre de consommateurs.	Structure décentralisée: Plusieurs sources d'énergie (centrales, énergies renouvelables, stockage) alimentent le réseau.
Flux d'énergie unidirectionnel: L'électricité circule de la production vers la consommation.	Flux d'énergie bidirectionnel: L'électricité peut circuler dans les deux sens, permettant aux consommateurs de devenir producteurs (ex : panneaux solaires).
Peu ou pas d'automatisation: La gestion du réseau est principalement manuelle.	Hautement automatisé: Des systèmes de contrôle et de communication intelligents

	optimisent la gestion du réseau en temps réel.
Faible intégration des énergies renouvelables: Les énergies renouvelables sont souvent marginales et difficilement intégrables.	Forte intégration des énergies renouvelables: Les énergies renouvelables sont intégrées de manière massive grâce à des technologies de stockage et de gestion de la demande.
Communication limitée: Les échanges d'informations sont restreints et se font principalement entre le fournisseur et le consommateur final.	Communication bidirectionnelle: Les différents acteurs du réseau (producteurs, distributeurs, consommateurs) communiquent en temps réel.

7.5- Enjeux des réseaux électriques intelligents :

Les réseaux électriques intelligents présentent plusieurs enjeux d'ordre environnementaux, techniques, économiques et géopolitiques qui sont résumés comme suit:

- **Environnementaux :**
 - Réduction des émissions de CO2
- **Techniques :**
 - Introduction des énergies renouvelables
 - Stabilité du réseau électrique
 - Gestion locale des productions et consommations
- **Economiques :**
 - Mise à niveau des infrastructures
 - Impact sur la tarification
 - Développement territorial
- **Géopolitiques :**

– Indépendance énergétique (Beddiar et Lemale, 2016).

7.6-Exemple de réseau électrique intelligent :

IssyGrid (figure 6.5), situé à Issy-les-Moulineaux, est l'un des premiers exemples en France d'application des principes des Smart Grids à l'échelle d'un quartier. IssyGrid utilise les technologies des Smart Grids pour optimiser l'utilisation de l'énergie dans les logements, les bureaux et les espaces publics.

Depuis son lancement en 2012, IssyGrid a connecté 2 000 logements et de nombreux bâtiments commerciaux. Il utilise une variété de technologies avancées pour atteindre ses objectifs :

- Compteurs Intelligents et Capteurs : installation de dispositifs de mesure qui permettent de suivre et de gérer la consommation d'énergie en temps réel.
- Production d'Énergie Renouvelable : utilisation de panneaux solaires installés sur les toits des bâtiments pour produire de l'électricité.
- Stockage d'Énergie : mise en place de systèmes de stockage pour capturer l'énergie excédentaire produite, qui peut ensuite être redistribuée en fonction des besoins.
- Gestion de la Demande : systèmes automatisés pour ajuster la consommation d'énergie basée sur la disponibilité en temps réel et les prévisions de demande.



Figure 6.5 : Le projet de IssyGrid (Issy-les-Moulineaux -France)

<https://www.lechodusolaire.fr/wp-content/uploads/2016/04/Embix-060416.jpg>

Cours 7 : Efficacité énergétique des installations industrielles

Introduction :

L'efficacité énergétique dans le domaine de l'industrie est un ensemble d'opérations dont le but est de concilier réduction de la consommation énergétique et maintien, voire amélioration, du niveau de production d'un site industriel.

1-Enjeux de l'efficacité énergétique en industrie :

L'efficacité énergétique en industrie répond à plusieurs enjeux :

- Réduire la facture énergétique de l'entreprise par l'amélioration des processus industriels et la réduction de la consommation du bâtiment (chauffage, climatisation, ventilation, éclairage)
- Baisse des émissions de GES de l'industrie, en vue de participer à l'atteinte des objectifs de neutralité carbone fixés à l'échelle internationale.
- Diminuer l'impact carbone de l'entreprise peut permettre également de valoriser l'image de marque de l'entreprise auprès des consommateurs, des parties prenantes et des investisseurs ainsi que valoriser son patrimoine (ses actifs)
- Renforcer l'indépendance énergétique dans un contexte géopolitique incitant à limiter les importations d'énergies fossiles.
- Être en conformité avec la réglementation en matière d'efficacité énergétique dans l'industrie

<https://bigmedia.bpifrance.fr/nos-dossiers/efficacite-energetique-en-industrie-enjeux-avantages-et-solutions>

2-Les catégories d'industries selon la consommation énergétique :

Il y a deux grandes catégories d'industries :

-Industrie Grande Consommatrice d'Énergie (IGCE): dans cette catégorie sont classées l'industrie sucrière, le ciment, le papier, la pâte à papier, les matériaux de construction, les sidérurgies, le phosphate, les acides et les engrais. Pour ces industries, le paramètre énergie est déterminant dans le coût de production.

-Industrie Légère Consommatrice d'Énergie (ILCE) : cette catégorie regroupe les industries agro-alimentaires, textile et cuir, autres & bâtiment et travaux publics, chimie parachimie, industrie mécanique, métallurgique et électrique, et divers. Pour ce type d'industries légères ou diffuses, le paramètre énergie est souvent moins déterminant dans la fonction de coût de production.

3-Les outils de l'efficacité énergétique en industrie :

L'audit énergétique et le management de l'énergie sont les outils primordiaux pour atteindre l'efficacité énergétique dans le secteur industriel. Nous allons ainsi aborder ces deux outils en détail dans la partie qui suit.

3.1-Système de management de l'énergie (SME)

Le management de l'énergie en industrie renvoi à « l'utilisation judicieuse et efficace de l'énergie pour maximiser les profits et améliorer sa compétitivité."

Il s'agit en outre de « Stratégie d'ajustement et d'optimisation de la consommation d'énergie: l'objectif est de réduire l'apport énergétique pour les systèmes de transformation et traitement du produit, tout en maintenant ou en réduisant le coût total du produit fini » (Cape Hart, Turner et Kennedy, 2016)

3.1.1-Définition du SME:

Un Système de Management Energétique (SMÉ) est un ensemble de processus et de pratiques organisées visant à gérer de manière efficace la consommation d'énergie au sein d'une organisation. (Cape Hart, Turner et Kennedy, 2016)

3.1.2-Rôles du SME:

Le rôle principal du SME est d'établir une structure permettant de surveiller, contrôler et réduire la consommation énergétique de manière systématique et continue.

Le SME permet d'identifier les opportunités d'amélioration de l'efficacité énergétique, de mettre en place des objectifs et des cibles de performance énergétique, ainsi que des plans d'action pour les atteindre. Il implique également la collecte et l'analyse de données sur la consommation d'énergie, la sensibilisation et la formation du personnel, ainsi que l'intégration de pratiques éco-responsables dans les processus opérationnels.

Grâce à un SME bien mis en place, une organisation peut surveiller de près sa consommation énergétique, détecter les anomalies et les sources de gaspillage, mettre en place des mesures correctives, et progressivement réduire sa dépendance énergétique tout en améliorant sa performance environnementale et sa compétitivité économique.

3.1.3-Objectifs du SME:

Les objectifs principaux du SMÉ sont:

- Réduire les coûts énergétiques
- Améliorer l'efficacité énergétique
- Diminuer l'impact environnemental
- Promouvoir la durabilité et la responsabilité sociale

3.1.4-Cadre réglementaire du SME:

La figure 7.1 indique la famille des standards internationaux ISO 50000 développés dans le cadre du **système de management de l'énergie**.

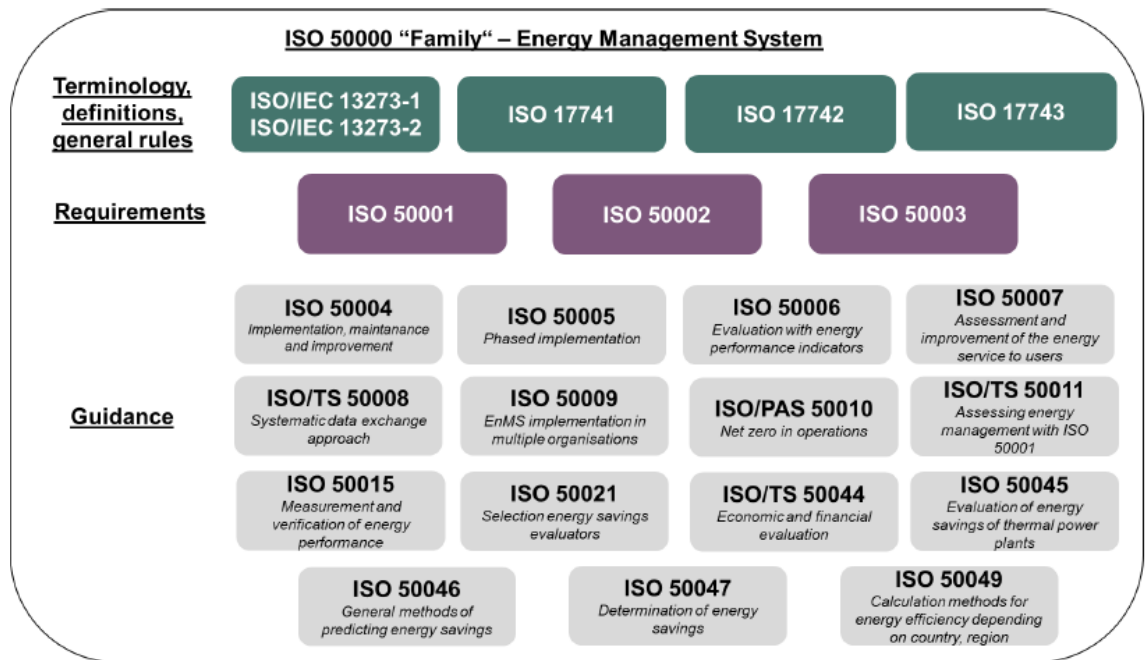


Figure 7.1: Famille ISO 50000 (Stetsiv M.,2024)

ISO 50001 : « système de mangement de l’énergie » est une norme volontaire internationale mise au point par une cinquantaine de pays membres de l’Organisation Internationale de Normalisation (ISO) en 2011. Elle propose des lignes directrices pour déployer un système de management de l’énergie efficace dans une entreprise ou dans toute autre organisation. C’est, en quelque sorte, le mode d’emploi de référence pour qui souhaite emmener son organisme vers davantage d’efficacité énergétique. Elle a été révisée en 2018.



Figure 7.2 : Contenu de la norme ISO 50001 (Prasetya et al, 2021)

La figure 7.2 résume le contenu de la norme ISO 50001 ainsi que les principaux composants du SMÉ qui sont:

- **Politique énergétique** : Élaboration d'une politique définissant les objectifs énergétiques et l'engagement de l'organisation en matière de gestion de l'énergie.
- **Planification** : Développement de plans d'action détaillés pour atteindre les objectifs énergétiques, y compris l'allocation de ressources et la définition des responsabilités.
- **Implémentation** : Mise en œuvre des mesures et des initiatives identifiées dans le plan d'action, telles que l'installation de technologies éco-énergétiques, la formation du personnel et la sensibilisation.
- **Surveillance et mesure** : Collecte de données sur la consommation énergétique, surveillance des performances, évaluation des progrès par rapport aux objectifs et identification des opportunités d'amélioration.
- **Évaluation des performances** : Analyse des résultats obtenus, comparaison avec les objectifs fixés, identification des écarts et ajustement des stratégies si nécessaire.
- **Revue de direction** : Examens périodiques par la direction pour évaluer l'efficacité du SME, prendre des décisions stratégiques et garantir l'engagement continu envers l'amélioration de la performance énergétique. (Prasetya et al, 2021)

3.1.5-Le cycle PDCA dans le système de management de l'énergie :

Le cycle PDCA (ou roue de Deming), acronyme de Plan – Do – Act – Check, est un outil utilisé dans la gestion de la qualité des processus. Cette méthode, mise en place par plusieurs normes ISO dans l'énergie vise à l'amélioration continue du système de management de l'énergie. La figure 7.3 résume les actions à entreprendre à chaque étape du processus.

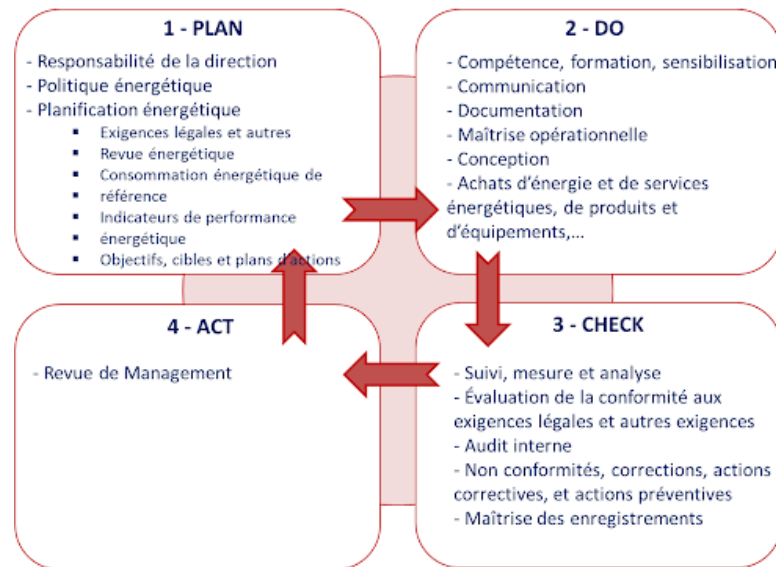


Figure 7.3 : Le cycle PDCA dans la norme ISO 50001

1-Planifier (Plan) :

À ce stade, il est nécessaire d'établir des objectifs ainsi qu'une stratégie puis planifier ce qui doit être fait. Dans la gestion de l'énergie, c'est ici qu'il faut définir une politique énergétique. Quelques exemples d'actions à ce stade :

- Définition des objectifs et cibles énergétiques
- Affectation des ressources
- État des lieux de la performance
- Construction du plan d'actions

2 -Faire (Do) :

Une fois le plan établi, il faut le mettre en œuvre. À cette étape, il faut appliquer le plan d'actions de management de l'énergie envisagé durant la phase précédente. Exemples :

- Mise en œuvre des actions
- Formation et sensibilisation
- Maîtrise des équipements
- Fiabilisation des indicateurs

3-Vérifier (Check) :

A cette étape, il faut contrôler l'exécution du plan et évaluer sa réussite. L'objectif est de surveiller et mesurer les processus et voir s'ils sont adaptés aux objectifs et politique énergétique. Cette étape s'effectue essentiellement à l'aide des Indicateurs de Performance Energétiques (IPE). Exemples :

- Suivi de la performance
- Quantification des écarts par rapport aux cibles
- Suivi des plans d'actions

4-Agir (Act) :

Après avoir planifié, appliqué et contrôlé le plan d'action, il faut agir, c'est-à-dire, prendre la décision de réajuster la stratégie ou de répéter les solutions qui se sont avérées appropriées. Cette étape permet d'améliorer en permanence la performance énergétique et le Système de Management de l'Energie (SME). Exemples :

- Audit interne du système
- Détermination des actions correctives et préventives
- Management des ressources
- Validation de l'atteinte des objectifs (Caron T., sd)

Afin de superviser toutes ces étapes, **un logiciel de management de l'énergie** est souvent nécessaire. Il permet de planifier les plans d'actions et d'en mesurer les résultats facilement et dans un seul et même outil.

3.1.6-Les indicateurs de performance énergétique en industrie :

Les indicateurs de performance énergétique (IPE) sont des paramètres essentiels que les organisations utilisent pour évaluer et améliorer leur efficacité énergétique. Ces indicateurs fournissent un moyen mesurable d'évaluer l'utilisation de l'énergie et ses incidences, ce qui permet de prendre des décisions stratégiques en matière de gestion de l'énergie. L'utilisation efficace des IPE peut conduire à des améliorations significatives de la consommation d'énergie et à des réductions des coûts opérationnels, tout en renforçant l'engagement d'une organisation en faveur des pratiques durables.

Il y a plusieurs types d'indicateurs de performance énergétique dans le domaine industriel. Le tableau 7.1 montre quelques exemples avec la formule de calcul et l'unité utilisée.

Tableau 7.1 : Exemples d'indicateurs de performance énergétique (IPE) en industrie
(Daganaud F., 2014)

Caractéristique	Formule	Unité
Consommation totale d'énergie	Absolue	kWh/unité de temps
Consommation spécifique d'énergie	$\frac{\text{Consommation d'énergie en kWh}}{\text{Quantité produite en pièces/m}^2/\text{kg}}$	kWh/unité de production
Intensité énergétique	$\frac{\text{Consommation d'énergie d'un processus en kWh}}{\text{Consommation totale d'énergie en kWh}}$	%
Efficacité de récupération de la chaleur système de ventilation	$\frac{\text{Chaleur récupérée en kWh}}{\text{Chaleur disponible en kWh}}$	%
Efficacité de génération d'air comprimé	$\frac{\text{Quantité d'air comprimée générée en m}^3}{\text{Consommation électrique du compresseur en kWh}}$	m ³ /kWh

3.1.7-Stratégies opérationnelles du SME:

Il existe trois types de stratégies opérationnelles du SME :

1-Les « **remèdes rapides** » : ce sont des activités engendrant simplement des réductions occasionnelles de la consommation énergétique. Celles-ci sont généralement des mesures d'efficacité énergétique non coordonnées, coutant peu ou bien même gratuites: elles ne nécessitent pas d'étape analytique ou de plan d'action.

2-Les **Projets Énergétiques** permettent une réduction systématique de la consommation d'énergie. Comparé à la méthode précédente, celle-ci peut atteindre des résultats bien plus importants. Une phase d'analyse devrait être entreprise pour identifier les opportunités de réduction les plus significatives.

3-Le **Programme global de Management Énergétique** est l'approche finale et la plus complète pour instaurer l'efficacité énergétique dans une organisation. C'est un véritable système de management. Cette approche nécessite comme étape fondamentale l'introduction

d'un suivi, contrôle et d'une réduction continue de la consommation d'énergie. (Daganaud F., 2014)

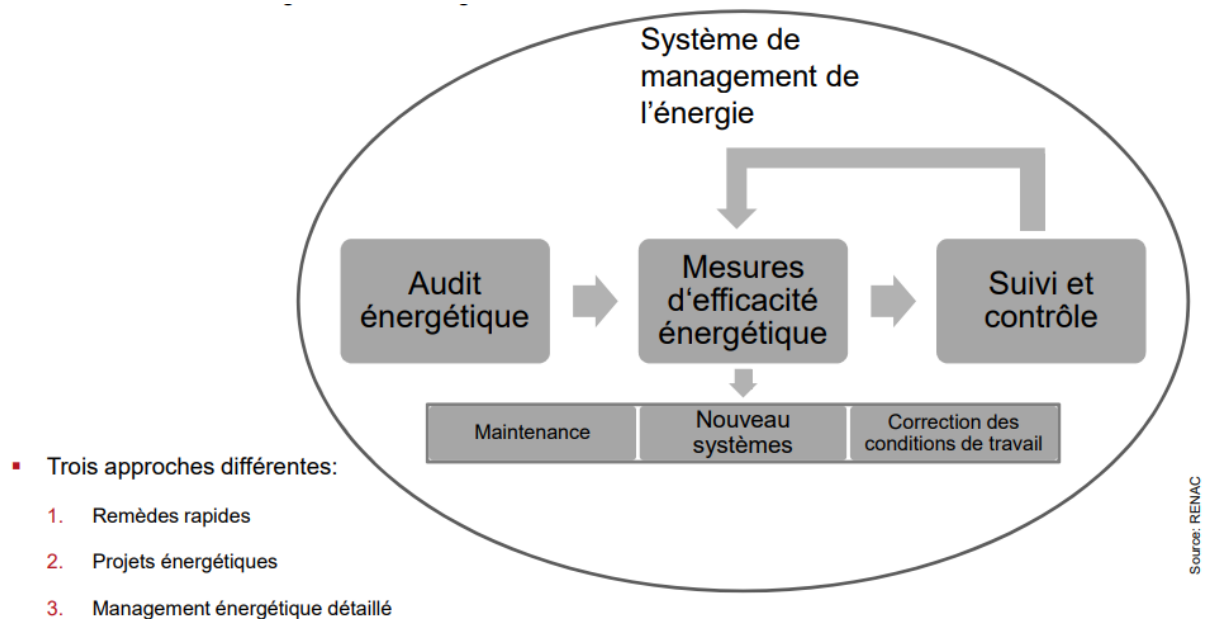


Figure 7.4 : vue générale sur le système de management de l'énergie (Daganaud, 2014)

3.2-AUDIT ENERGETIQUE

3.2.1-Définitions :

« L'audit énergétique est une analyse systématique de l'utilisation et de la consommation d'énergie afin d'identifier, de quantifier et de rendre compte des opportunités d'amélioration de la performance énergétique. » (ISO 50002-2014)

« Il s'agit de l'examen et le contrôle Périodique des performances Énergétiques des installations et des équipements des établissements industriels, de transport et du tertiaire, en vue de l'optimisation énergétique de leur fonctionnement. » (Décret 05-495 de décembre 2005)

3.2.2-Cadre réglementaire :

-ISO 50002-2014 : Energy audits –Requirements with guidance for use :

La norme internationale ISO 50002 est applicable à tous les types d'établissements et d'organisations, et à toutes les formes d'énergie et d'utilisation de l'énergie. Elle précise les exigences du processus pour réaliser un audit énergétique en matière de performance

énergétique. Elle précise également les principes de réalisation des audits énergétiques, les exigences relatives aux processus communs lors des audits énergétiques et les livrables des audits énergétiques.

- Décret 05-495 de 26 décembre 2005 :

En Algérie, le décret 05-495 du 26 décembre 2005 relatif à l'audit énergétique des établissements grands consommateurs d'énergie constitue la référence nationale en matière d'audit énergétique. Son contenu porte sur quatre chapitres principaux :

- Chapitre 1: objet, définition et modalité de mise en œuvre.
- Chapitre 2: conditions d'exercice de l'audit énergétique.
- Chapitre 3: obligations d'audit énergétique des établissements grands consommateurs.
- Chapitre 4: suivi et évaluation des audits énergétiques obligatoire.

C'est l'Agence de Promotion et de Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie APRUE, sous la tutelle du ministère des énergies et des mines, qui est responsable du suivi et de l'évaluation des opérations d'audit.

3.2.3-Bénéfices de l'audit énergétique :

- Montre tous les flux d'énergie et aide à identifier les problèmes.
- Fournit des informations claires et des recommandations sur les possibilités d'économie d'énergie et les mesures d'efficacité énergétique qui aideront à réduire les factures.
- Évalue la performance énergétique et sert de base au processus de prise de décision et aux investissements.
- Évalue les modèles de comportement, les processus d'exploitation et de maintenance qui influencent la consommation d'énergie.
- Contribue à la réussite des systèmes de gestion de l'énergie et à la réalisation des objectifs énergétiques de l'entreprise.
- A un impact sur les opérations et permet de comprendre où, quand et comment beaucoup d'énergie est utilisée (Stetsiv, 2024).

3.2.4-Objectifs de l’audit énergétique :

- Réduire la consommation d'énergie, améliorer les indicateurs de performance énergétique, diminuer le niveau des émissions de CO2
- Analyse et évaluation du bilan énergétique, des schémas d'utilisation de l'énergie de l'organisation.
- Évaluation de l'efficacité du système de gestion de l'énergie.
- Évaluation du potentiel d'efficacité énergétique, des possibilités d'économies d'énergie et du niveau d'utilisation efficace des ressources énergétiques.
- Élaboration de recommandations pour la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique avec une évaluation technique et financière pour le processus de prise de décision. (ISO 50002-2014)

3.2.5-Portée de l’audit énergétique :

L'audit énergétique peut porter sur :

- Les différentes divisions d'une entreprise industrielle
- Les procédés technologiques des industries principales et auxiliaires
- Consommateurs importants (à forte intensité énergétique) des ressources énergétiques de l'entreprise industrielle
- Systèmes d'approvisionnement en énergie d'une entreprise industrielle
- Bâtiments et structures, installations
- Système de comptabilité et de contrôle de l'utilisation des ressources énergétiques
- Système de gestion de l'énergie, etc.

3.2.6-Etablissements concernés par l’audit énergétique :

En Algérie, les articles 11, 12 et 13 du décret 05-495 précisent les établissements concernés par les opérations d’audit énergétique obligatoire en fonction du seuil de consommation en énergie primaire (tableau 7.2). La consommation totale d'énergie, exprimée en tonne Équivalent pétrole (tep), est la somme des consommations d'électricité et de combustibles solides, liquides et gazeux : l'électricité produite par les Énergies renouvelables est exclue du calcul de la consommation totale d'énergie.

Tableau 7.2: Etablissements GCE concernés par l’audit énergétique en Algérie
(APRUE)

Type d'établissement	Seuil de consommation TEP/an	Périodicité
Industriels	≥ 2000	03 ans
Transport	≥ 1000	03 ans
Tertiaire	≥ 500	05 ans

Les seuils et la périodicité des audits énergétiques diffèrent d’un pays à un autre comme le montre le tableau 7.3.

Tableau 7.3: Etablissements concernés par l’audit énergétique dans différents pays
(Elabboubi M., SD)

	Tunisie	Australie	La chine	l'Union européenne
Secteurs concernés	-Industrie, -Sociétés de transport, -Tertiaire et résidentiel	-Industrie, -Tertiaire -Sociétés de transport,	-Procédés industriels -Bâtiments	-Bâtiments -Procédés industriels -Sociétés de transport
Seuil d'obligation de l'audit	-Industrie: 1000 tep/an, -Tertiaire ,résidentiel et transports: 500 tep/an	12 000 tep/ an.	10 000 tep / an.	-Plus de 250 salariés, ou -Chiffre d'affaires annuel supérieur à 50 millions d'euro ou -Bilan annuel excédant 43 millions d'euros.
Agrément obligatoire de l'auditeur	oui	oui	oui	oui
Période de renouvellement	5 ans	5ans	5ans	4 ans

3.2.7-Le métier d’auditeur énergétique :

L’auditeur énergétique est une personne ou une équipe de personnes réalisant un audit énergétique.

Les audits énergétiques peuvent être menés par l'organisation, à l'aide de ressources internes ou externes, telles que des consultants en énergie et des sociétés de services énergétiques.

Un auditeur énergétique, qu'il soit interne ou externe, doit travailler avec le personnel interne concerné par la portée définie de l'audit énergétique (par exemple, l'organisation, l'installation/les installations, l'équipement, le(s) système(s) et le(s) processus.

Les tâches de l'auditeur énergétique sont précisées dans le décret 05-495 comme suit :

- Mesure des performances Énergétiques des installations et de ses gros Équipements ;
- Analyse de l'évolution des consommations d'énergie ;
- Établissement des bilans Énergétiques de l'établissement et des gros équipements ;
- Évaluation des émissions polluantes dues aux consommations Énergétiques
- Évaluation de l'efficacité énergétique des opérations en s'appuyant sur les standards de consommation ;
- Identification des possibilités d'économie d'énergie et/ou de substitution inter-énergétique favorable sur le plan de l'efficacité Énergétique et de l'environnement ;
- Élaboration d'un plan d'actions correctives comportant les opérations à réaliser et leur coût Économique.

3.2.8-Principes du succès de l'audit énergétique :

Les quatre principes clés du succès de l'audit énergétique sont :

1. La compétence
2. La confidentialité
3. L'objectivité
4. L'accès aux équipements, aux ressources et à l'information

3.2.9-Types d'audit énergétique :

En général, l'audit énergétique peut être classé selon deux échelles : la portée et l'intégralité.

Selon la norme internationale ISO 50002-2014, il y a trois types d'audit énergétique comme l'indique la figure 7.5:

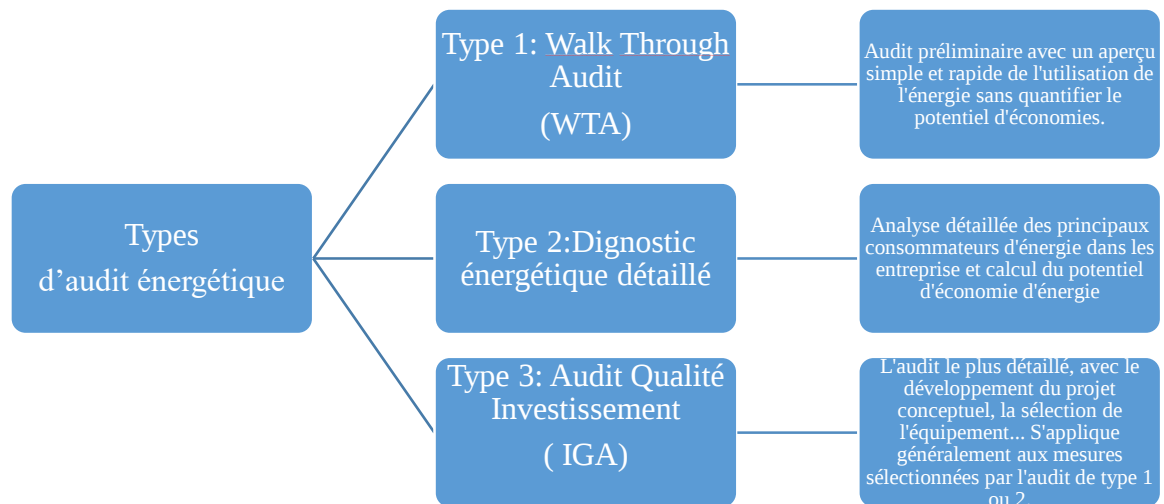


Figure 7.5: Les trois types d'audit énergétique selon ISO 50002

-Audit énergétique type 1 : Walk Through Audit (WTA)

Application typique : audit des installations/processus ou des flottes de petites organisations ou installations, audit préliminaire pour les grandes organisations ou installations, petit budget.

Objectifs :

- Identification des économies potentielles et des avantages à tirer des audits de type 2 ou 3.
- Identifier les domaines présentant un potentiel de gestion de l'énergie.
- Sensibilisation au rapport coût-bénéfice de la gestion de l'énergie.
- Définir le champ d'application d'un audit plus détaillé et les domaines stratégiques à privilégier.
- Établissement d'indicateurs de base de la performance énergétique sur la base des données existantes.

-Audit énergétique type 2: Diagnostic énergétique détaillé

Application typique : audit énergétique détaillé d'un site, d'un processus ou d'un parc de véhicules, budget élevé.

Objectifs :

- Identification et évaluation d'un ensemble de possibilités d'économies d'énergie avec analyse coût-bénéfice.
- Identification des opportunités complexes qui nécessitent une étude plus détaillée (type 3).
- Établissement d'indicateurs de performance énergétique détaillés.

Remarques :

- Pas rentable pour une faible consommation d'énergie.
- Nécessite des mesures/un suivi
- L'auditeur est généralement externalisé et dispose des compétences techniques appropriées et d'une bonne connaissance de l'installation.

-Audit énergétique type 3: Audit Qualité Investissement (IGA)

Application typique : Site entier, processus, système ou flotte (s'applique également aux systèmes, par exemple l'air comprimé).

Objectifs :

- Identification et évaluation d'une gamme cohérente et spécifique de possibilités d'amélioration de la performance énergétique avec des coûts et des avantages identifiés, y compris des avantages non énergétiques.
- Fournit des calculs techniques et financiers plus détaillés.

Remarques :

- Pour les organisations à forte consommation d'énergie ou les institutions ayant des objectifs de subvention pour les investissements en capital.
- L'auditeur est hautement qualifié et souvent un spécialiste du système spécifique.
- Nécessite des mesures/un suivi. (Stetsiv, 2024)

3.2.10-Procédure d'audit énergétique :

La figure 7.6 montre les différentes étapes de l'audit énergétique.

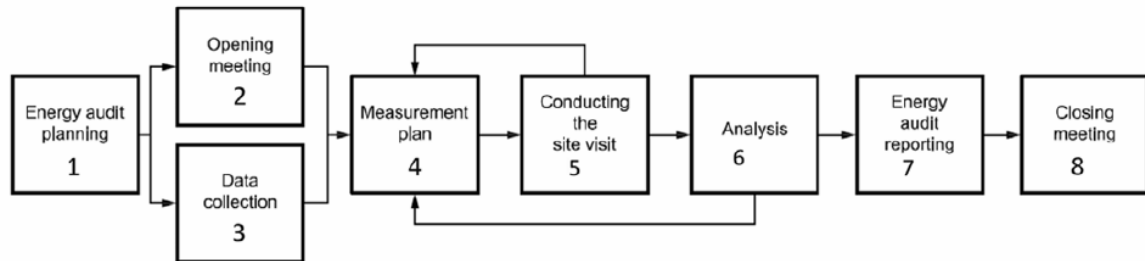


Figure 7.6 : Les étapes de l'audit énergétique (ISO 50002-2014)

Etape 1 : Planification

- Tenir une réunion avec les principales parties prenantes de l'organisation
- Déterminer les objectifs de l'audit énergétique Rôles, responsabilités, besoins en données, ressources
- Critères d'investissement
- Déterminer la portée et le calendrier
- Sélection du type/détail de l'audit, du format du rapport, du processus d'approbation
- Révision des systèmes de gestion
- Revue des contraintes organisationnelles, réglementaires ou autres
- Consultation avec les parties prenantes initiales de l'installation

Etape 2 et 3 : Réunions et collecte de données

- Données requises
- Accès aux installations

- Délais de collecte des données sur site
- Organiser la copie, la récupération des documents, etc.
- Personnel clé sur place pour accéder à des zones spécifiques
- Etablir les autorisations de sécurité
- Introductions sur site pour la sécurité
- Vêtements spéciaux / équipements de protection individuelle
- Exonérations de responsabilité / assurances pour les travaux de chantier
- Exigence d'inspection de sécurité des équipements de mesure

Etape 4 : Planification des mesures

- Factures de services publics
- Revue des dessins et devis
- Dessins électriques unifilaires
- Schémas de processus de haut niveau (par exemple, diagrammes de flux énergétique et massique)
- Plans CVC
- Aménagements architecturaux avec placement des luminaires
- Plan du site
- Examen des problèmes opérationnels spécifiques / éléments de maintenance retardés

Etape 5 : Effectuer une visite du site

- Mesurer suffisamment de données pour estimer la consommation d'énergie et les économies appropriées.

- Les facteurs comprennent :
- Étape de développement du projet
- Ressources disponibles
- Niveau de risque acceptable

Etape 6 : Analyse après la visite du site

➤ Analyse préliminaire/approximative (audits de niveau 1/mesures non essentielles) :

- Élaboration d'un périmètre cible pour une étude plus détaillée
- Le temps et les ressources sont limités
- Les valeurs du projet sont faibles
- L'installation/le système énergétique et le profil d'exploitation sont simples

➤ Analyse détaillée (audits de niveau 2 / mesures de base) :

- Projets avec financement interne disponible
- Des engagements budgétaires fermes ont été pris pour la mise en œuvre du projet
- Systèmes et profils d'exploitation de complexité modérée

➤ Analyse avancée (audit de niveau 3 / projets à haute valeur ajoutée / à haut risque):

- Projets nécessitant une sollicitation de financement externe
- Systèmes et profils d'exploitation de complexité modérée
- Lorsque les modifications du projet comportent des risques financiers, sanitaires, de sécurité humaine ou environnementaux importants (par exemple, modifications du procédé, environnements critiques, etc.)

Etape 7 : Constatations et rapports d'audit

- Données de référence pour l'évaluation des mesures d'économie d'énergie (MEE).
- Approche méthodologique d'audit.
- Analyse des données d'audit liées aux indicateurs de performance énergétique de l'installation.
- Résultats de l'audit pour les opportunités d'efficacité énergétique.
- Les grandes lignes des ECM et la faisabilité financière.
- Conclusions et remarques.

3.3- Exemples de mesures d'efficacité énergétique en industrie :

L'Agence Marocaine pour l'Efficacité Energétique (AMEE, sd) a mis en place plusieurs mesures d'économie d'énergie pour le secteur industriel comprenant des recommandations et de mesures ne nécessitant pas d'investissements, des actions ne nécessitant que de faibles investissements et quelques actions de plus grande envergure. Le tableau 7.4 montre des exemples de mesures se rapportant à certains postes consommateurs d'énergie communs à plusieurs types d'industrie.

Tableau 7.4: Exemples de mesures d'efficacité énergétique en industrie

(source : AMEE, sd)

Poste consommateurs d'énergie	Recommandations de mesures d'efficacité énergétique
Le Compresseur Le compresseur utilisé pour générer et traiter l'air comprimé représente une part importante mais nécessaire de la	- Colmater les fuites d'air comprimé ; - Mettre fin aux utilisations inutiles - Contrôler le taux de charge des compresseurs

charge électrique dans la plupart des installations industrielles. Les fuites d'air comprimé constituent la principale et la plus courante cause des coûts excessifs, représentant généralement environ 70% du gaspillage total. Les pertes d'énergie dans un système d'air mal entretenu découlent du besoin de fournir une énergie supplémentaire pour pallier à l'inefficacité du circuit. 	- Bien dimensionner le ballon de stockage d'air comprimé - Installer le système variation de vitesse en cas de régime variable - Réduire au maximum la pression de la conduite principale. - Éviter de réduire la pression au point d'utilisation finale, séparer les grandes utilisations de faible pression et fournir séparément de l'air à basse pression. - Veiller à ce que les compresseurs fonctionnant à vide soient arrêtés rapidement. - Optimiser l'installation de compresseurs en utilisant des réservoirs de la bonne taille, des régulateurs de puissance appelée et un dispositif de contrôle général du système. - S'assurer que l'air aspiré est aussi froid et sec que possible – utiliser de l'air provenant de l'extérieur pendant les saisons froides. - Opter pour la forme de récupération de chaleur la plus simple possible au niveau du système de refroidissement de l'air sortant des compresseurs par eau ou par air. - Envisager de remplacer le compresseur par un appareil plus adéquat, plus récent et plus efficace.
La Ventilation et le Pompage Le système de ventilation et celui du pompage présentent de nombreuses caractéristiques semblables et peuvent donc être analysés, d'un point de vue énergétique, de façon similaire. Tous deux sont actionnés par un moteur,	- Contrôler les heures de fonctionnement des ventilateurs et des pompes au moyen d'une commande automatique. - Éliminer l'étranglement comme moyen de contrôle du débit. - Pour les systèmes de ventilateurs ayant besoin d'un débit fixe, réduire le débit en fonction du besoin - Pour les systèmes de ventilateurs ou de pompes dont le débit requis varie, modifier le débit - Assurer un entretien adéquat des ventilateurs et des pompes : Lubrification, Courroie et poulies,

directement ou au moyen d'une courroie ou d'une boîte à engrenages.	Nettoyage et remise en état des pompes et des ventilateurs
Les systèmes de réfrigération Les systèmes de réfrigération sont relativement complexes, et leur rendement dépend des conditions de fonctionnement. Bien que la cote d'un système soit établie pour une charge de refroidissement nominale ou maximale donnée, le système fonctionne généralement pendant la majeure partie de sa durée de vie utile à une fraction de cette puissance, ou à charge partielle. L'efficacité d'un système de refroidissement peut varier considérablement en fonction de la charge, selon la méthode de réglage de la puissance frigorifique employée. Par conséquent, il est important d'évaluer le rendement et l'efficacité d'un système pour toute la plage de charges réelles.	- Adopter des pratiques d'économie au point d'utilisation finale pour réduire au maximum la charge de refroidissement. - Calibrer les commandes et régler les températures aux plus hauts degrés acceptables. - Éviter si possible un chauffage et un refroidissement simultanés. - Éviter le recours à la dérivation des gaz chauds pour régler la puissance - Veiller à ce que les commandes de dégivrage soient bien réglées et revoir régulièrement le réglage. - S'assurer que les surfaces d'échange thermique sont nettoyées et entretenues régulièrement. - Réduire les températures de condensation en assurant une libre circulation de l'air autour des unités de condensation et des tours de refroidissement. - Veiller à ce que les tours de refroidissement soient bien entretenues afin d'obtenir la température de l'eau la plus basse possible. - Remplacer les compresseurs par des unités à haut rendement - Utiliser le stockage frigorifique pour optimiser le fonctionnement des systèmes de refroidissement par l'achat d'électricité pendant les heures creuses. - Utiliser des désurchauffeurs pour récupérer la chaleur rejetée par les condenseurs. - Envisager d'exploiter la capacité de refroidissement naturel directement de l'air froid ambiant (ex., en hiver)

Les systèmes CVC Les systèmes CVC sont conçus pour offrir aux occupants un environnement confortable, sûr et productif sous la forme d'une température confortable et d'une ventilation et d'un taux d'humidité adéquats.	- Programmer les systèmes ou la température en fonction de l'occupation et de l'air extérieur. - S'assurer que la température et l'humidité fournies ne sont pas beaucoup plus élevées que celles qui sont requises. - Envisager des commandes numériques directes qui offrent un contrôle plus souple des charges - Utiliser des variateurs de vitesse - Installer des unités locales de traitement d'air (ex., assainisseurs d'air électroniques, filtres à charbon actif à absorption d'odeur, filtres à haut rendement) pour réduire le besoin d'évacuation générale. - Vérifier régulièrement les points d'entretien mécanique (ventilateurs, paliers, alignements, etc.) - S'assurer que les filtres à air et les conduits sont propres. - Isoler le système de distribution – conduits, système de gaines. - Récupérer la chaleur et l'air frais rejetés.
Les chaudières Les chaudières sont utilisées pour produire de la vapeur et de l'eau chaude en vue de satisfaire les besoins des procédés. Le rendement de ces chaudières varie grandement selon la charge. Par conséquent, il est important d'évaluer et d'optimiser le rendement de l'installation de chaudières pour toute la plage de charges réelles imposées.	- S'assurer que la température de la chaudière et la pression de fonctionnement ne sont pas bien plus élevées que le besoin le plus grand. Fonctionner à la température ou à la pression la moins élevée possible. - Réduire au maximum le besoin de demeurer en position d'attente pour les chaudières. - Réduire au maximum les variations de charge et prévoir la demande dans la mesure du possible. - Adapter les calendriers et la fréquence des purges de la chaudière en fonction des exigences de la charge et de la composition chimique de l'eau.

	- Vérifier régulièrement le rendement de combustion et celui de la chaudière. - Vérifier et adapter régulièrement les niveaux d'air excédentaire. - Vérifier et adapter régulièrement les procédures de traitement de l'eau. - Veiller à ce que les assemblages et les commandes du brûleur soient ajustés et calibrés. - Maintenir en bon état les joints, les conduits d'air, le collecteur de fumée et les portes d'accès pour assurer l'étanchéité à l'air. - S'assurer que l'isolation de la chaudière et des conduits répond aux normes. - Déplacer la prise d'air comburant pour tirer parti de la chaleur perdue afin de préchauffer l'air comburant. - Récupérer la chaleur provenant de la purge de la chaudière.
Le Circuit Vapeur La vapeur dans l'industrie est souvent utilisée comme agent de transfert de chaleur de la chaudière à son point d'utilisation finale. Ces caractéristiques avantageuses comme caloporteur (capacité élevée de transfert de chaleur) rendent aussi son système de distribution vulnérable aux pertes et aux gaspillages d'énergie. Les systèmes d'approvisionnement en vapeur et de retour des condensats requièrent une inspection et un entretien réguliers (et parfois, un	- S'assurer que la température de la chaudière et la pression de fonctionnement ne sont pas beaucoup plus élevées que le besoin maximal. - Assurer une taille adéquate des tuyaux pour éviter des pressions d'alimentation excessives visant à surmonter les chutes de pression. - En cas d'utilisation indirecte de la vapeur, s'assurer que l'échangeur de chaleur est ajusté en fonction de la charge - Vérifier régulièrement la tuyauterie des réseaux de vapeur et de condensats afin de déceler les fuites et de les réparer. - Déceler et réparer les purgeurs de vapeur défectueux. - Fermer l'alimentation en vapeur de l'équipement non utilisé. - Réviser les postes de détente.

travail de détection) afin de minimiser ou éliminer ces pertes.	- Vérifier et ajuster régulièrement les procédures de traitement de l'eau. - Isoler les tuyaux, les brides, les raccords et les équipements non isolés. - Renvoyer le maximum de condensats à la bache alimentaire de la chaufferie. - Nettoyer régulièrement les surfaces d'échange thermique.
Les fours, sécheurs et fours de cuisson Les fours, sécheurs et fours de cuisson sont utilisés dans des applications diverses comme la fonte de métal, le séchage du bois, l'évaporation de l'eau et la fabrication de chaux, de briques et de céramiques. Certaines installations sont construites et exploitées uniquement pour les besoins d'un procédé de fabrication utilisant la chaleur. Par conséquent, le four peut être le plus gros consommateur d'énergie. Les entreprises industrielles ne sont pas équipées que d'un seul compteur général installé au niveau des postes de transformation ou de production de l'énergie.	- S'assurer que la température de traitement n'est pas beaucoup plus élevée que la valeur requise. - Fonctionner à la température et au débit d'air les plus bas possible. - Dans un système étagé, placer les brûleurs en ordre séquentiel en ligne pour suivre la demande de chaleur. - Réduire au maximum la nécessité pour les fours de demeurer en position d'attente. - Réduire les variations de charge et planifier la production afin d'optimiser, dans la mesure du possible, l'utilisation de la capacité du four, du sécheur ou du four de cuisson. - Examiner les procédures de l'opérateur pour s'assurer que ses pratiques occasionnent une consommation minimale d'énergie. - Vérifier régulièrement le rendement de combustion. - Vérifier et adapter régulièrement les niveaux d'air excédentaire. - Garder les assemblages et les commandes du brûleur ajustés et calibrés. - Maintenir en bon état les joints, les conduits d'air, le collecteur de fumée et les portes d'accès pour assurer l'étanchéité à l'air. - Déplacer les prises d'air pour s'assurer que les fours de cuisson utilisent l'air le plus sec possible.

	- S'assurer que l'isolation de la surface est conforme à la norme. - Installer des commandes électroniques pour contrôler la combustion et la température. - Déplacer la prise d'air comburant pour tirer parti de la chaleur résiduelle afin de préchauffer l'air comburant. - Installer un économiseur sans condensation pour recueillir la chaleur dans les gaz de combustion. - Installer un condenseur de gaz de combustion pour récupérer de la chaleur additionnelle dans les gaz de combustion. - Récupérer la chaleur résiduelle issue du refroidissement du produit.
--	---

BIBLIOGRAPHIE

Acket Claude, Vaillant Jacques (2011) "Les énergies renouvelables : État des lieux et perspectives", Éditions Technip .

Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie ADEME (2012) Comprendre l'énergie éolienne

Agence Internationale de l'Energie (2019) International Energy Statistics. US Energy Inf. Adm. [En ligne] <https://www.eia.gov/>

Agence Marocaine pour l'Efficacité Energétique (2018) L'efficacité énergétique dans le secteur de l'industrie [En ligne] <https://www.amee.ma/fr/expertise/industrie>

Al Dakheel, J., Del Pero, C., Aste, N., & Leonforte, F. (2020). Smart buildings features and key performance indicators: A review. Sustainable Cities and Society, 61, 102328.

Beddiar Kamel et Lemale, (2016) Bâtiments intelligents et efficacité énergétique. Ed. Dunod.

Brault Pascal et Dollet Alain (2013) L'énergie à découvert. Paris : Editions CNRS

British Research Establishment (2009) BRE Environmental and sustainability standard

Buidwise (2024) Comprendre les bases des smart buildings

Cape Hart, Turner et Kennedy (2016) Guide to energy management

Caron Théophile (sd) Systèmes de Management de l'Energie : Comment atteindre la certification ISO 50001 ? . Bureau Veritas

Centre algérien de Développement des Energies Renouvelables CDER (2019) Algerian Renewable Energy Resource Atlas

CEREFÉ (2020) Transition Energétique en Algérie : Leçons, Etat des Lieux et Perspectives pour un Développement Accéléré des Energies Renouvelables, (Edition 2020) : Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Energétique, Premier Ministre, Alger.

CEREMA (2017) La Gestion Technique du Bâtiment (GTB) : quel système choisir ? Fiche n 6

Daganaud Frank (2014) Efficacité énergétique dans l'industrie [En ligne] www.renac.de

Denker A. et El Hassar SMK (2014) Guide pour une construction éco-energetique en Algérie, Edition APRUE

Djahel, Thierry (2008) Solutions et services d'efficacité énergétique.

Drobinski P, Azzopardi B, Ben Janet Allal H, Bouchet V, Civel E, Creti A, Duic N, Fylaktos N, Mutale J, Pariente-David S, Ravetz J, Taliotis C, Vautard R (2020) « Energy transition in the Mediterranean ». In: Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report [Cramer W, Guiot J, Marini K (eds.)] Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille, France, 58pp.

Elabboubi Mostafa, SD. Audit énergétique.

Encyclopédie Le Grand Larousse illustré, (2016)

Filloux Alain (2014) Bâtir le développement durable : Intégrer les énergies renouvelables. Editions CSTB.

Genin Gilles, Meyer Christian (2017) Bâtiments intelligents -Collection L'ESSENTIEL– Edition CATED.

Glatigny Didier (SD) Déclinaisons de l'énergie – énergie primaire, secondaire, finale et utile, [en ligne] <https://www.criirad.org/annexe-declinaisons-de-lenergie-energie-primaire-secondaire-finale-et-utile/>

Greenpeace France (2013) « Scénario de transition énergétique », Paris, consulté sur <http://greenpeace.fr>.

Hadjsaid Noureddine et Sabonnadière Jean Claude (2015) Des réseaux électriques au smart grids.[En ligne] <https://www.encyclopedia-energie.org/des-reseaux-electriques-aux-smartgrids/>

Hetzel Jean (2003) Haute qualité environnementale du cadre bâti : Enjeux et pratiques. Ed Eyrolles

Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement IBGE (2009) la biomasse et la bioénergie [En ligne] https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/IF%20Energie%20ER12%20Part%20FR

Institut Montaigne (2019) Pour réussir la transition énergétique [en ligne]
<https://www.institutmontaigne.org/ressources/pdfs/publications/pour-reussir-la-transition-energetique-rapport.pdf>

Liebard Alain et De Herde, André (2006) Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique

Maes Pascal (2010) Les labels d'efficacité énergétique. Ed Eyrolles.

Ministère de l'énergie et des mines (2022) Bilan énergétique national 2021.

Ministère de l'énergie et des mines (2023) Stratégie nationale de développement de l'hydrogène en Algérie

Ouali Salima (2019) Chauffage et rafraîchissement par la géothermie. Bulletin des Energies Renouvelables N°48

Prasetya B. et al (2021) The role of Energy Management System based on ISO 50001 for Energy-Cost Saving and Reduction of CO2-Emission: A review of implementation, benefits, and challenges. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 926 012077

Sourisse Claude (2018) Biomasse et énergie : des ressources primaires aux produits finaux [En ligne] <https://www.encyclopedie-energie.org/biomasse-et-energie-des-ressources-primaires-aux-produits-energetiques-finaux/>

Stetsiv Marta (2024) Energy audit and energy management : Standards and Requirements. Allemagne : RENAC

Thiziri Hammiche, (2015) « La transition énergétique en Méditerranée », *Rives méditerranéennes* , 51 mis [en ligne] <http://journals.openedition.org/rives/4918> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rives.4918>

Tissot-Colle Catherine, Jouzel Jean. (2013) « La transition énergétique : 2020-2050 : un avenir à bâtir, une voie à tracer ». Paris : *les éditions des Journaux Officiels*, p. 6.

Normes et Règlementation

Algérie : Loi 04-09 du 14 aout 2004 relative à la promotion des Energies Renouvelables dans le cadre du développement durable.

Algérie- Décret 05-495 de décembre 2005 relatif à l’audit énergétique des établissements grands consommateurs d’énergie

Algérie-Arrêté interministériel du 29 novembre 2008 définit la classification d'efficacité énergétique des appareils à usage domestique soumis aux règles spécifiques d'efficacité énergétique et fonctionnant à l'énergie électrique

EN 13779 (2007) Ventilation dans les bâtiments non résidentiels

EN 16575 (2014) Produits biosourcés

ISO 50001 (2018) : Système de Management de l’Energie

ISO 50002 (2014) Energy audits –Requirements with guidance for use

Webographie:

www.dictionnaire-environnement.com

www.connaissancedesenergies.org

www.irena.org

<https://bregroup.com/>

<https://www.usgbc.org/>

<https://certivea.fr/>

<https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-immotique-10722/>