



Université de Ghardaïa

- N° Ordre :
- N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance industrielle

Par : M. GUELLAADHROUS Mustafa Amine
M. OULAD HADJOU Abdelhamid

Thème :

**MODELISATION DE LA CONSOMMATION
COMBUSTIBLE DES GROUPES ELECTROGENES DIESEL
EN FONCTION DE LA PUISSANCE, EN VUE DE
L'OPTIMISATION DU PROGRAMME DE MARCHÉ**

Soutenu Publiquement le, 20/06/2018

Devant le jury

ALLALI Mouhamed	M.A.A	Univ. Ghardaïa	Président
DJALOULI Taher	M.A.A	Univ. Ghardaïa	Examineur
BOUREGHDA Skander	M.A.A	Univ. Ghardaïa	Examineur
KHIRENNAS Abdelhamid		USTHB	Encadreur
BEKKAR Belgacem	M.A.A	Univ. Ghardaïa	Co-Encadreur

Dédicace

Dédicace

*A mes très chers **Parents***

*Pour tout l'amour dont vous m'avez entouré, pour tout ce que vous avez fait
pour moi.*

*Que dieu, le tout puissant, vous préserve et vous procure santé et longue vie
afin que je puisse à mon tour vous combler.*

*A mon **Frère** et mes **sœurs***

*Vous occupez une place particulière dans mon cœur. Je vous dédie se travail
en vous souhaitant un avenir radieux, plein de bonheur et de succès.*

*A ma **femme** et mon petit ange **Aicha***

Je prie dieu le tout puissant pour qu'il vous donne bonheurs et prospérités

*A toute **ma famille** proche et loin.*

*A mes très chers **Amis***

*A mes **collègues** au sein de la société SKTM*

*A tous mes enseignants pour lesquels je porte beaucoup de respect et de
gratitude.*

*Une spéciale dédicace à la **promotion 2017-2018 en Maintenance
industrielle.***

*A tous ceux qui m'ont soutenu de près et de loin
Je vous aime tous.*

Abdelhamid OULAD HADJOU

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

*A ma source de bonheur cher **Mère** et à l'esprit de mon **père***

*A Mes **frères** et mes **sœurs***

Pour leurs appui, encouragements permanents, et leur soutien moral,

*A ma **Femme** et mes Enfants **Zaid, Oussama**, et mon petit **Omar***

A toute ma famille proche et loin.

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de
votre soutien infailible, Merci d'être toujours là pour moi.*

*A tous mes chers **Amis** et **Collègues** au sein de la société **SKTM**
Une spéciale dédicace à la **promotion 2017-2018 en Maintenance
industrielle.***

A tous ceux qui m'ont soutenu de près et de loin

Mustafa Amine GUELLAADHROUS

Remerciement

Remerciement

Nous remercions, avant tout, notre Dieu de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce travail.

Nous remercions notre promoteur le Doctorant : Mr Abdelhamid KHIRENNAS pour ces précieux conseils durant ce travail et pour ces qualités humaines : modestie, bienveillance et moralité qui resteront pour nous un exemple à suivre dans notre vie professionnelle. Puisse ce travail vous satisfaire et témoigner notre grande reconnaissance et notre profonde estime.

Nous exprimons nos sincères remerciements à notre Co-encadreur, le Docteur M. Belkacem BEKKARI à l'université de Ghardaïa pour ses efforts et patience.

Nous adressons nos chaleureux remerciements aux membres du jury qui ont bien voulu juger notre travail et nous honorer avec leur participation.

Nous remercions sincèrement tous mes enseignants pour leurs efforts sans oublier nos collègues.

Nos vifs remerciements sont adressés à Mr. BABAZ Omar, Chef département exploitation et Mr. MAHI Houari Chef Projet Engineering Diesel/Conventionnel au sein de la société Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida, SKTM.Spa pour leur accueil.

Nous remercions tous ceux qui nous ont aidé à réaliser ce travail.

Table des matières

Dédicace.....	I
Remerciement.....	III
Table des matières.....	IV
Liste des Figures.....	VIII
Liste des tableaux.....	IX
Glossaires et Terminologies.....	X
Introduction Générale.....	1
1 - INTRODUCTION.....	3

Chapitre I

Généralité sur la production d'énergie électrique

2 - Brève historique sur l'invention de l'électricité.....	3
2.1 - Les débuts de l'électricité [1].....	3
2.2 - Deux sortes d'électricité [1].....	4
2.3 - L'unification de l'électricité et du magnétisme.....	5
2.4 - L'électricité industrielle.....	5
2.5 - Les porteurs de l'électricité [2].....	6
2.6 - Le développement industriel et domestique de l'électricité [2].....	6
3 - Les moyens de production de l'Energie électrique.....	7
3.1 - Filière Conventiennel.....	7
3.1.1 - Centrales nucléaires à fission.....	7
3.1.2 - Centrales thermiques à flamme.....	7
3.1.3 - Turbines à Combustion (TAC).....	8
3.1.4 - Centrales à cycles combinés.....	9
3.1.5 - Moteurs à combustion interne / Groupes électrogènes.....	9
3.2 - Filière renouvelable.....	10
3.2.1 - Centrales biomasses.....	10
3.2.2 - Centrales hydroélectriques.....	11
3.2.3 - Fermes éoliennes.....	12
3.2.4 - Centrales à Système solaire.....	13
3.2.5 - Les énergies marines.....	14
3.2.6 - Centrale hydrogène.....	14
3.2.7 - La géothermie [14].....	14

4 -	La production d'électricité dans le monde « Perspectives générales ».....	15
4.1 -	Développement économique et production d'électricité [3]	15
4.2 -	Visions et perspectives [4]	15
4.3 -	Une part croissante d'électricité... de plus en plus décarbonée [4]	18
5 -	La Production de l'Electricité en Algérie	19
5.1 -	Brève histoire [5].....	19
5.2 -	Le développement des capacités de production [6].....	20
5.3 -	Prévision de la demande électrique à l'horizon 2030 sur le RIN [19]	21
6 -	Electrification rurale [15]	24
6.1 -	L'impact de l'électrification rural [16].....	25
7 -	Présentation de SKTM [17]	25
7.1 -	Introduction :.....	25
7.2 -	Pourquoi SKTM est créée ?	26
7.3 -	Les missions principales de SKTM	26
7.4 -	Réalisations et perspectives.....	26
8 -	Conclusion :	27

Chapitre II
Centrale électrique Diesel

1 -	Introduction	29
2 -	Définition d'une centrale de production Diesel [22] :	29
3 -	Différentes catégories des groupes électrogènes [23].....	31
3.1 -	Moteurs à haute vitesse.....	31
3.2 -	Moteur à moyenne vitesse	31
3.3 -	Moteur à basse vitesse.....	31
4 -	Classification des centrales diesel en fonction du type de production d'énergie [23].....	32
4.1 -	Centrales de secours :	32
4.2 -	Centrales de pointe	32
4.3 -	Centrales de base	33
5 -	Système d'alimentation en carburant d'un groupe diesel :.....	33
5.1 -	Description [23] :	33
5.2 -	Principe de fonctionnement [23] :	33
5.3 -	Système d'injection [25] :	33
6 -	Agencement général de la centrale [23].....	37
6.1 -	Îlot de puissance (Power Island)	37
6.2 -	Les auxiliaires de la centrale (BOP - Blance Of Plant).....	37

7 -	Principe de fonctionnement et performances [23]	39
7.1 -	Fonctionnement de la centrale	39
7.2 -	Paramètres influant les performances moteur diesel	40
7.3 -	Possibilités d'amélioration du rendement et augmentation de la puissance électrique produite.....	40
7.4 -	Bilan énergétique	41
7.4.1 -	Bilan énergétique typique	41
7.4.2 -	Bilan énergétique d'une tranche	41
8 -	Procédure de vérification des performances de la centrale.....	41
8.1 -	Les essais de démarrage.....	42
8.2 -	Les essais d'achèvement	42
8.2.1 -	Les Essais de Fiabilité	42
8.2.2 -	Les Essais de Performance	42
8.2.3 -	La consommation spécifique [26]	43
8.2.3.1-	Le combustible :	43
8.2.4 -	Les Essais des Émissions atmosphériques.....	44
9 -	Conclusion.....	45

Chapitre III

Modélisation de la consommation combustible du groupe diesel

1 -	Introduction :	46
2 -	Notions sur la modélisation :	46
2.1 -	Introduction :.....	46
2.2 -	Ajustement du modèle [21] :	47
3 -	Modélisation de la consommation	47
3.1 -	Principe :.....	47
3.2 -	Gamme des groupes choisie et données constructeur utilisé :	48
3.3 -	Modélisation	48
3.3.1 -	Obtention des Paramètres du modèle de consommation du groupe diesel α_{GE} β_{GE} γ_{GE} :	48
3.3.2 -	Diagramme de variation de α_{GE} β_{GE} γ_{GE} en fonction de la puissance nominale de chaque groupe :	49
3.3.3 -	Calcul des coefficients de variation des paramètres α_{GE} β_{GE} et γ_{GE} :	50
4 -	Résultats de la modélisation :	51
5 -	Interprétation des résultats	52
6 -	Conclusion :	53
1 -	Introduction	55

Table des matières

2 -	Explication du cas d'étude :	55
3 -	Evaluation de la consommation combustible de la centrale	55
3.1 -	Cas de l'établissement d'un programme de marche :	55
3.2 -	Cas sans l'établissement d'un programme de marche	59
4 -	Interprétation des résultats :	60
5 -	Conclusion	61

Chapitre IV

Optimisation de programme de marche des groupes Diesel

Conclusion Générale	62
Bibliographie	63
Résumé.....	65

Liste des Figures

Figure I 1- Schéma de principe d'une centrale nucléaire à fission.....	7
Figure I 2- Schéma de principe d'une centrale thermique à flamme	8
Figure I 3- Schéma de principe d'une centrale TAC - Turbines à Combustion	8
Figure I 4- Schéma de principe d'une centrale à cycles combinés	9
Figure I 5- Schéma de principe d'une centrale à Moteurs à combustion interne / Groupes électrogènes	10
Figure I 6- Schéma de principe d'une Centrales électriques biomasse	11
Figure I 7- Schéma de principe d'une centrale hydroélectrique	12
Figure I 8- Schéma de principe d'une centrale éolienne terrestre	12
Figure I 9- Schéma de fonctionnement d'une centrale solaire photovoltaïque	13
Figure I 10- Schéma de fonctionnement d'une centrale solaire thermique.....	13
Figure I 11- Production de l'électricité par habitant en 2012 dans les régions du monde (KWh/hab)	15
Figure I 12- Consommation mondiale d'énergie primaire (Mtep/an) - Historique + AIE New-policies.....	16
Figure I 13- Consommation Mondial de l'énergie primaire Tep/ habitant/an	17
Figure I 14- Consommation mondial d'énergie primaire (Mtep/an) - Historique + AIE scénario 450.....	17
Figure I 15- Consommation mondial d'énergie primaire (Mtep/an) - Historique + Greenspace AER.....	18
Figure I 16- Répartition de la production électrique mondiale par source d'énergie en 2015)	18
Figure I 17- Vue d'Alger Port en 1910	19
Figure I 18- Centrale Diesel de Talmine (Réseau Isolé du Sud)	20
Figure I 19- Prévisions de développement en énergies renouvelables période 2016-2025.....	21
Figure I 20- Evolution de la demande d'électricité Haute Tension en Algérie à l'horizon 2030.....	22
Figure I 21- Evolution de la demande d'électricité Moyen Tension en Algérie à l'horizon 2030.....	22
Figure I 22- Evolution de la demande d'électricité Basse Tension en Algérie à l'horizon 2030	23
Figure I 23- Evolution de la demande totale d'électricité en Algérie à l'horizon 2030.....	23
Figure I 24- Evolution de la demande totale d'électricité aux RISde l'Algérie à l'horizon 2030	24
Figure I 25- Agencement d'une centrale Diesel (Plan de masse)	38
Figure I 26- Exemple d'un schéma unifilaire d'une centrale Diesel	39
Figure II 1- Vue d'ensemble d'une centrale thermique diesel (sans salle des machines).....	30
Figure II 2- Package d'un groupe diesel de Production	30
Figure II 3- Schéma de principe d'un Injecteur groupe diesel.....	34
Figure II 4- Exemple d'installation d'injection (HEUI Fuel System – Caterpillar).....	36
Figure II 5- Schéma de principe d'une application en cycle combiné d'une centrale diesel.....	40
Figure II 6- Bilan énergétique d'une tranche de production diesel.....	41
Figure III 1- variation de α_{GE} en fonction des puissances nominales des groupes.....	49
Figure III 2- variation de β_{GE} en fonction des puissances nominales des groupes.....	49
Figure III 3- variation de γ_{GE} en fonction des puissances nominales des groupes	49
Figure III 4- Les courbes de consommation de chaque groupe électrogène	51
Figure III 5- Modélisation de la consommation du groupe électrogène	51
Figure IV 1- structure de l'algorithme de programme de marche.....	56
Figure IV 2- La consommation de la centrale en utilisant un programme de marche	57
Figure IV 3- La consommation de la centrale sans utilisation d'un programme de marche.....	59
Figure IV 4- La consommation de la centrale sans et avec programme de marche.....	61

Liste des tableaux

<i>Tableau II 1- Emissions maximales en g/KWh</i>	<i>44</i>
<i>Tableau III 1- Les données constructeur de consommation des groupes électrogène</i>	<i>48</i>
<i>Tableau III 2 Les valeurs de α_{GE} β_{GE} γ_{GE} pour les différentes puissances nominales.</i>	<i>48</i>
<i>Tableau III 3- Paramètres du modèle polynomial de la consommation des groupes électrogènes Diesel</i>	<i>50</i>
<i>Tableau III 4- Les valeurs de la consommation combustible calculées par le modèle</i>	<i>52</i>
<i>Tableau III 5- Les écarts entre les valeurs données par le constructeur et celles calculées par le modèle en (L/h)</i>	<i>52</i>
<i>Tableau IV 1- calcul de la consommation en gasoil de la centrale (cas avec programme de marche)</i>	<i>58</i>
<i>Tableau IV 2- calcul de la consommation en gasoil de la centrale (cas sans programme de marche)</i>	<i>60</i>

Glossaires et Terminologies

°

°C, °F

Unité de mesure de température

A

AC

Courant Alternatif

AER

Advanced Energy Révolution

AIE

Agence Internationale de l'Energie

AIE-450

Il est cohérent avec l'objectif de non dépassement d'une augmentation de température de 2°C par une limitation du CO₂ dans l'atmosphère à 450 ppm (parties par millions)

AIE-NP

Agence Internationale de l'Energie - Nouvelle Politique

B

bar

unité de mesure de la pression atmosphérique

BP

BP Energy Outlook 2030 (2012)

C

CC

Courant Continu

CCG

Centrale à Cycle Combiné Gaz

CO₂

Le dioxyde de carbone, aussi appelé gaz carbonique ou anhydride carbonique

COP 21

La COP21 est la 21ème Conférence des parties de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (en anglais Conference Of the Parties, COP)

CSP

en Anglais: Concentrated Solar Power et en Français:
Centrale Solaire thermodynamique

E

émissions de GES

émissions de gaz à effet de serre

G

g/kWh

Unité de mesure de la consommation spécifique de carburant

GPL

gaz de pétrole liquéfié

GW

Géga Watt, Ordre de grandeur de puissance

H

Hz

Le hertz est l'unité dérivée de fréquence du Système international.

I

IEG

Groupe d'Évaluation Indépendante de la Banque mondiale

ISO 15550

la norme de l'Organisation internationale de normalisation 15550

K

KJ/Kg

unité SI de capacité thermique massique et de l'entropie massique

kVA

Unité de mesure de la puissance électrique apparente

KW

Killo Watt, Ordre de grandeur de puissance

kWh

Le kilowattheure, est une unité de mesure d'énergie

kWh/hab

Kilo Watt heure par habitant

Le KiloWatt heure par habitant est l'unité traditionnelle de mesure de l'énergie électrique

L

L /h

Unité de mesure du débit
LFC
Les chaudières à lit fluidisé circulant

M

m/s
Unité de mesure de vitesse du système SI
(mètre par seconde)
MW
Le mégawatt, est une unité de puissance
Mtep
Unité d'énergie, mégatonne équivalent pétrole

O

ONG
Organisation non gouvernementale est une association à but non lucratif
ONU
L'Organisation des Nations unies (ONU) est une organisation internationale regroupant 193 États

P

PIAT
Réseau du Pole In salah Adrar Timimoune
Polyfit
Polynomial curve fitting est une fonction sur MATLAB
PV
Photovoltaïque

R

RIN
Réseau Interconnecté du Nord
RIS
Réseaux Isolés du Sud (RGS Réseaux du Grand Sud)

RNR
Réacteurs à neutrons rapides

S

SKTM
Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida, Filiale du Groupe Sonelgaz
SMR
Small Modular reactor
SPE
Société de Production d'Électricité, Filiale du Groupe Sonelgaz
stand-by
mode d'attente
STEP
stations de transfert d'énergie par pompage

T

tableaux MT, BT
tableaux Moyen et basse tension
TAC
Turbine à Combustion
TCS
Turbo Compound System
TG
Turbine à Gaz
tr/min
unité pour mesurer une vitesse de rotation (tour par minute)
TV
Turbine à vapeur

U

USEPA
United States Environment Protection Agency

Introduction Générale

Du fait des changements importants qui se sont produits durant ces dernières décennies, le contexte énergétique mondial connaît aujourd'hui de grandes transformations ; il appelle à une redéfinition des besoins et des modes de consommation de l'énergie, à cause des risques d'épuisement des ressources largement exploitées.

En Algérie, et malgré les effets nuisibles et polluants des moteurs diesel et ses différents impacts négatifs sur l'environnement, et notamment la tendance mondiale vers des énergies propres et renouvelables, le recours à une telle énergie conventionnelle, particulièrement des centrales en groupes électrogènes diesel, semble incontournable, surtout dans quelques localités isolées et éloignées des ressources du gaz naturel avec une demande en énergie électrique non importante vu la nature et le caractère non industriel de ces régions.

La présente étude a pour objectif l'établissement, à travers des données du constructeur, d'un modèle de consommation combustible d'une gamme de groupes diesel en fonction de la puissance qui lui est demandé et d'exploiter ce dernier pour calculer la consommation globale de la centrale en fonction de la charge, et d'en choisir un programme de marche optimal afin de diminuer la consommation en gasoil.

Au cours de traitement de ce sujet, un aperçu sera donné sur les moyens de production d'électricité conventionnels et renouvelables, à travers l'état de l'art sur ces moyens dans le monde et en Algérie ont été présenté dans le premier chapitre, et le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur les centrales de production diesel à base des groupes électrogènes.

Dans la partie pratique qui sera exposée dans le troisième et quatrième chapitre, nous présenterons la méthode de modélisation utilisée et nous afficherons la gamme de groupes diesel choisie et les données de constructeur qu'on va utiliser pour établir notre modèle.

En fait dans le troisième chapitre, un modèle de consommation générique basé sur différents points de consommation donnés par le constructeur de groupes électrogènes sera établi, et permettra de calculer la consommation en gasoil des différents groupes diesel et sur toute leur plage de puissance.

Enfin et dans le quatrième chapitre, le modèle obtenu sera exploité pour illustrer l'importance et le gain qu'on peut avoir en utilisant et en optimisant le programme de marche des groupes diesel.

Chapitre I

Généralité sur la production d'Energie Electrique

1 - INTRODUCTION

L'électricité est tellement présente dans notre vie quotidienne que nous avons souvent tendance à la considérer comme une nécessité d'ordre naturel, au même titre que l'eau courante. Que les sources de sa production menacent de se tarir et c'est toute la société moderne qui vacille.

Pourtant, au regard de l'Histoire, l'utilisation des phénomènes électriques est relativement récente. Étudiée dès la fin du 16^{ème} siècle, l'électricité (au sens de l'ensemble des phénomènes électriques observables) est longtemps restée, pour le grand public, un objet de curiosité et d'amusement, avant que les progrès accomplis au cours du siècle dernier ne démontrent son utilité pratique.

La prodigieuse pénétration qu'elle a opérée depuis dans toutes les branches de l'activité humaine, notamment par le biais de l'électronique, n'est pas étrangère à l'effcience que nos contemporains attribuent à la science.

Dans le présent chapitre, des notions générales sur cette énergie vitale seront présentées ainsi que les différents moyens de production conventionnels et renouvelables. Aussi, il sera exposé la tendance mondiale en termes de production de l'électricité ainsi qu'à l'échelle de l'Algérie.

2 - Brève historique sur l'invention de l'électricité

2.1 - Les débuts de l'électricité [1]

Jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle, le terme d'électricité fut réservé aux phénomènes d'attraction ou de répulsion entre corps préalablement frottés. Ce domaine est aujourd'hui connu sous le nom d'électrostatique. L'attraction de corps légers par des objets électrisés par friction était connue depuis l'Antiquité, mais son étude n'a véritablement débuté qu'à la fin du 16^{ème} siècle, avec les travaux du savant anglais William Gilbert, auteur du premier traité connu touchant à ces questions, *De Magnete*, paru en 1600. C'est à lui que l'on doit l'invention de l'adjectif électrique pour désigner ces mystérieuses propriétés d'attraction (électrique vient du grec *elektron*, qui signifie ambre, l'un des premiers corps à avoir été électrisés par friction). Les expériences de Gilbert furent reprises par un allemand, Otto von Guericke, au milieu du 16^{ème} siècle. Afin d'améliorer la qualité des observations, celui-ci inventa la première machine à faire le vide (l'attraction de corps électrisés se manifeste d'autant mieux que l'air ne fait pas obstacle à leur rapprochement), ainsi que la première machine électrostatique, en l'occurrence un gros globe de soufre que l'expérimentateur électrisait en le frottant de ses mains. Ces instruments rudimentaires lui permirent de découvrir à la fois le phénomène de conduction électrique, c'est-à-dire la capacité de ce mystérieux pouvoir électrique à se transmettre le long de certains corps, et le pouvoir des pointes, c'est-à-dire la forte tendance des objets pointus à manifester des propriétés électriques. Ce dernier effet ne fut mis à profit qu'un siècle plus tard par *Benjamin Franklin* : après avoir démontré, en 1752, que la foudre est un phénomène de nature électrique, une sorte d'étincelle géante, il tira parti du pouvoir des pointes pour imaginer le paratonnerre,

simple pointe métallique reliée à la terre et destinée à protéger le bâtiment qu'elle surplombe en attirant sur elle la décharge venue du ciel.

Au 18^{ème} siècle, les travaux expérimentaux amorcés au siècle précédent s'accéléraient. D'autres effets furent bientôt mis en évidence, de nouveaux instruments virent le jour, en même temps que certaines distinctions conceptuelles s'opéraient, premiers pas vers une formalisation des phénomènes électrostatiques. On doit à l'Anglais *Stephen Gray* la découverte de l'électrisation par influence, c'est-à-dire la possibilité d'électriser un corps à distance, sans contact direct, ainsi que la distinction entre corps conducteurs, qui transmettent l'électricité, et corps isolants, qui inhibent cette transmission.

Une autre distinction importante est le fait du savant français *Charles Du Fay* : en 1733, il découvrit qu'il existait deux sortes d'électricités (nous dirions aujourd'hui charges électriques), l'une obtenue en frottant du verre, qu'il appela électricité vitreuse, l'autre obtenue en frottant des corps résineux, qu'il appela électricité résineuse. Deux corps porteurs d'électricités de même nature se repoussent, et deux corps porteurs d'électricités différentes s'attirent. Pour cette raison, *Benjamin Franklin* les rebaptisa quelques années après électricité positive et négative. Il fut le premier à fournir l'explication du phénomène d'électrisation en s'appuyant à la fois sur l'existence des deux types de charges électriques et sur un principe fondamental, mis en évidence quelques années auparavant par le physicien anglais *William Watson*, la conservation globale de la charge électrique : l'électrisation résultait de la séparation des charges positives et négatives contenues dans un corps globalement neutre .

2.2 - Deux sortes d'électricité [1]

L'étape suivante consista à caractériser la force électrique exercée par un porteur de charge sur un autre. Les physiciens n'eurent pas à aller chercher bien loin : ils s'inspirèrent de la loi de gravitation de *Newton* énoncée un siècle auparavant. Ils proposèrent ainsi une force proportionnelle à la charge électrique de chacun des porteurs en interaction, et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Cette loi fut vérifiée expérimentalement en 1785 par le Français *Charles Augustin de Coulomb* (l'unité internationale de charge électrique porte son nom). Les dernières briques de la théorie des interactions entre charges électriques immobiles furent posées dans les années qui suivirent.

Compte tenu de la forte similitude entre la loi de Coulomb et la loi de gravitation, le formalisme et les concepts de la mécanique furent transportés dans le domaine de l'électrostatique. C'est à cette occasion que la notion de potentiel, introduite en 1772 par *Joseph Louis de Lagrange* pour la gravitation, fut reprise, en 1784, par *Pierre Simon de Laplace* pour décrire l'état électrique engendré en un point quelconque de l'espace par un ensemble de charges électriques .

2.3 - L'unification de l'électricité et du magnétisme

L'expérience d'*Oersted* avait mis en évidence l'existence de liens entre électricité et magnétisme. Les deux domaines furent unifiés par l'Écossais *James Clerk Maxwell* en 1864, donnant naissance à l'Electromagnétisme [1].

La principale conséquence de cette nouvelle théorie fut, du point de vue de l'électricité, l'identification de la vitesse de propagation des phénomènes électriques, qu'on avait jusqu'alors vainement tenté de mesurer, avec celle de la lumière. Il ne s'agissait d'ailleurs pas réellement d'un résultat nouveau, car *Kirchhoff* était déjà parvenu, par une voie purement électrocinétique, à une telle conclusion sept ans auparavant, dans le cas particulier de l'étude de la propagation de signaux électriques le long d'un fil télégraphique (l'équation à laquelle il aboutit est connue sous le nom d'équation des télégraphistes) [2].

2.4 - L'électricité industrielle

La seconde moitié du 19^{ème} siècle fut marqué par un développement spectaculaire de l'électricité industrielle, ou électrotechnique. La pile de Volta fut bientôt supplantée par des piles plus performantes, comme la pile Daniell (1836), la pile Bunsen (1841) ou la pile Leclanché (1864).

En 1859, *Gaston Planté* mit au point la première pile rechargeable, ou accumulateur. Les générateurs connurent un essor analogue : l'invention de la dynamo dans les années 1870 par *Zénobe Gramme* préfigura l'apparition des premiers générateurs de courants alternatifs, ou alternateurs, notamment grâce aux travaux de l'ingénieur croate *Nikola Tesla* (qui laissa son nom à l'unité internationale du champ magnétique). Ces dispositifs, entraînés par les turbines immenses des centrales électriques (qu'elles soient thermiques, hydroélectriques ou nucléaires) constituent l'élément central de la production d'énergie électrique. Le développement des générateurs accompagna assez naturellement celui des dispositifs inverses, à savoir les moteurs électriques [1].

Ces progrès contribuèrent au développement des applications de l'électricité tout au long du siècle dernier. Dès 1839 apparaissait en Angleterre le premier instrument de télécommunication fonctionnant à l'aide de signaux électriques transmis le long d'un fil, le télégraphe, mis au point par les ingénieurs *William Cooke* et *Charles Wheatstone*. En 1876, des signaux électriques furent pour la première fois utilisés par l'Américain *Graham Bell* pour transporter à distance la voix humaine, le téléphone était né. Bientôt, ce fut au tour des moyens de transport d'être électrisés ; le premier tramway électrique des ingénieurs allemands *Werner von Siemens* et *Johann Halske* date de 1879 ; le premier train électrique, inventé par *Thomas Edison*, date de 1880 [1].

Grâce au développement des transformateurs électriques dans les années 1880 et aux hautes tensions que ces dispositifs permettaient d'obtenir, il devint possible d'étendre la distance de transport de l'électricité depuis son lieu de production jusqu'au cœur des cités (les pertes électriques causées par l'effet Joule le long d'une ligne sont d'autant plus faibles que la tension de la ligne est élevée). La manifestation la plus frappante de cette pénétration fut certainement

l'essor de l'éclairage urbain, permis par la mise au point récente par Edison d'un nouveau type de lampe, la lampe à incandescence (reposant sur l'émission d'un intense rayonnement visible par un fil de matériau réfractaire amené à haute température par effet Joule) [2].

2.5 - Les porteurs de l'électricité [2]

L'évolution rapide de l'électrotechnique au 19^{ème} siècle prouve qu'il n'était point besoin de connaître la nature des porteurs de charge électrique pour utiliser leurs propriétés. Celle-ci ne fut élucidée qu'à la fin du 19^{ème} siècle et au début du 20^{ème} siècle grâce à la découverte de l'Électron et de la structure atomique de la matière. De ces découvertes, il ressortit que les phénomènes électriques ne résultaient pas d'un mystérieux fluide électrique indépendant de la matière, qu'on avait vainement tenté de caractériser des siècles durant, mais de la structure même de la matière, intrinsèquement électrique puisque deux des trois constituants élémentaires de l'atome (l'électron et le proton) sont porteurs d'une charge électrique. Bien plus, il s'avéra que ce caractère électrique explique aussi bien la cohésion de l'atome, celle de la molécule et celle du solide.

Quant au courant électrique, sa nature dépend avant tout de l'état physique considéré. Dans un solide métallique, il résulte uniquement du déplacement des électrons les moins liés à la structure cristalline, ou électrons de conduction. Une zone d'un solide ne peut donc apparaître chargée positivement que par déficit d'électrons. Dans un liquide, le courant électrique est assuré grâce à la présence préalable et au déplacement d'ions au sein du fluide, les ions chargés positivement (ou cations) se déplaçant en sens inverse des ions chargés négativement (ou anions). Dans un gaz, enfin, où toutes les particules, qu'il s'agisse d'atomes ou de molécules, sont initialement neutres, les choses se passent en deux temps : l'application d'une tension électrique entre deux électrodes provoque l'ionisation partielle du gaz, autrement dit la scission des particules en ions positifs et électrons. C'est le mouvement consécutif des particules chargées vers les électrodes qui constitue alors le courant électrique.

2.6 - Le développement industriel et domestique de l'électricité [2]

L'utilisation du courant électrique se propagea d'abord dans les villes par un usage industriel et pour l'éclairage public supplantant peu à peu le gaz d'éclairage.

Le problème à résoudre pour réaliser l'extension du réseau électrique était celui du transport du courant. L'augmentation de la tension (exprimée en volts) permet de transmettre l'électricité sur de plus longues distances avec peu de pertes en ligne. Cette technique fut mise au point par l'ingénieur français *Marcel Deprez* en 1883 laquelle bénéficia de l'invention du transformateur par le français *Lucien Gaulard* en 1881 qui permettait d'abaisser ou d'augmenter la tension du courant. Enfin le perfectionnement du courant alternatif par l'ingénieur *Croate Nikola Tesla* eut un effet sur la qualité de transport de l'électricité sur de plus longues distances.

3 - Les moyens de production de l'Énergie électrique

3.1 - Filière Conventiennel

3.1.1 - Centrales nucléaires à fission

Une centrale nucléaire génère de l'électricité grâce à l'énergie dégagée par une réaction contrôlée de fission nucléaire, principalement des isotopes de l'Uranium et du Plutonium. Les principales technologies en service utilisent le réacteur de fission comme une chaudière alimentant en chaleur un circuit vapeur qui génère de l'électricité. L'eau fait à la fois office de caloporteur et de modérateur (réacteurs à eau légère) [7].

Parmi les évolutions attendues, le développement des réacteurs à neutrons rapides (RNR) de 4^{ème} génération permettrait de limiter drastiquement la consommation de combustible et les déchets. Les "Small Modular Reactors" (SMR) pourraient également se développer pour répondre aux besoins de moyenne puissance [18].

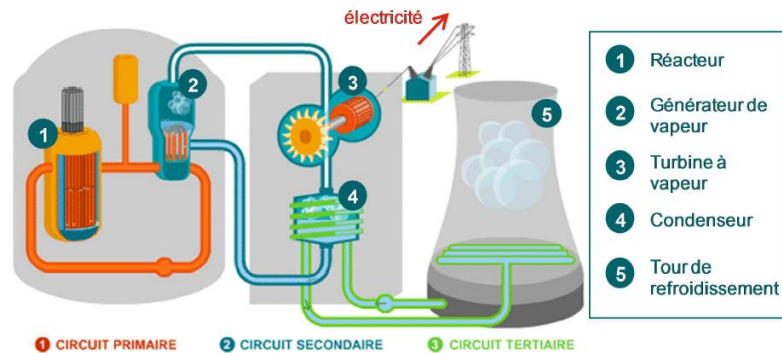


Figure I 1- Schéma de principe d'une centrale nucléaire à fission [7]

3.1.2 - Centrales thermiques à flamme

Dans une centrale thermique dite "à flamme", la chaleur de combustion dégagée dans une chaudière permet de générer de la vapeur qui, en circulant dans une turbine reliée à un alternateur, produit de l'électricité [7].

Diverses technologies existent, en fonction du combustible (charbon, fioul, gaz) ou du type de chaudière. Les chaudières à charbon pulvérisé sont les plus nombreuses ; de meilleures performances peuvent encore être atteintes à des niveaux de température et de pression plus élevés. Les chaudières à lit fluidisé circulant (LFC), flexibles sur les combustibles utilisés, sont également en développement.

Les efforts actuels visent à réduire l'impact environnemental des installations (réduction des émissions polluantes, captage du CO₂, etc.). Le fonctionnement en cogénération est possible, accroissant ainsi l'efficacité énergétique globale [8].

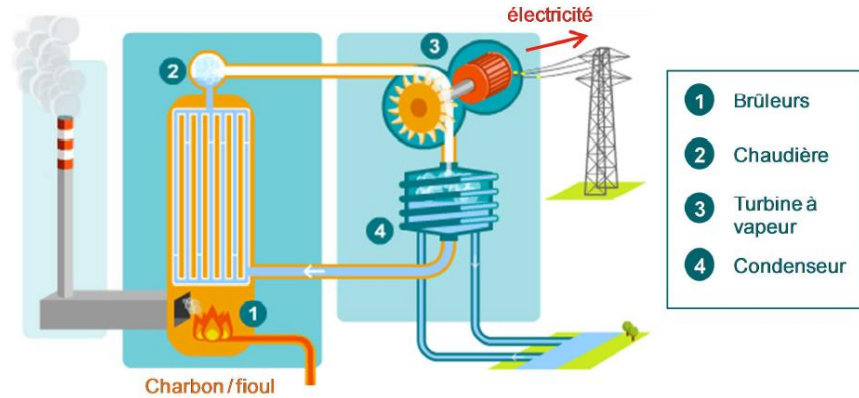


Figure I 2- Schéma de principe d'une centrale thermique à flamme [7]

3.1.3 - Turbines à Combustion (TAC)

Dans une turbine à combustion (TAC), l'électricité est générée grâce à la circulation de gaz d'échappement issus d'une chambre de combustion et traversant directement la turbine. La chambre de combustion est le plus souvent interne à la turbine, elle génère de la chaleur à partir d'un combustible (gaz ou fioul) et d'air initialement comprimé [7].

Alors que le fioul apporte une sécurité de fourniture, le développement des TAC gaz est aujourd'hui privilégié, notamment pour des raisons environnementales (émissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants moindres). Sur le réseau électrique, la réactivité des TAC est souvent mise à profit pour fournir la pointe électrique. Les TAC sont également répandues pour la production décentralisée dans l'industrie ou le tertiaire, notamment pour un fonctionnement en cogénération.

L'intérêt de la cogénération sur les TAC réside dans la haute température des fumées de combustion, dont la chaleur peut être récupérée et valorisée sans affecter la production électrique [9].

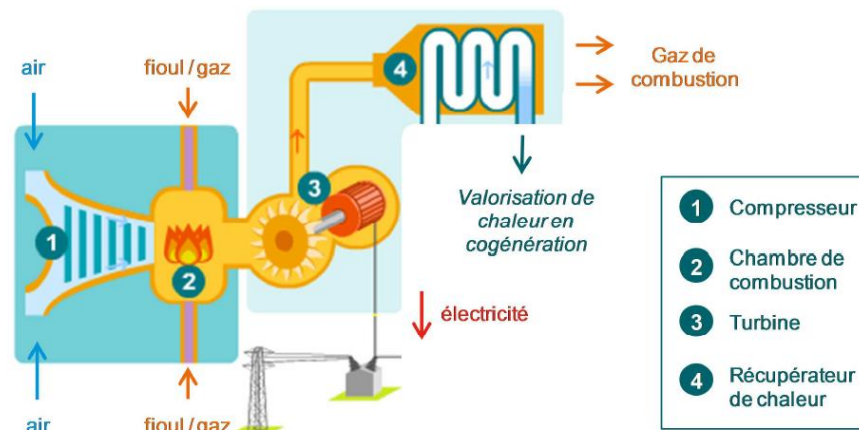


Figure I 3- Schéma de principe d'une centrale TAC - Turbines à Combustion [7]

3.1.4 - Centrales à cycles combinés

Un cycle combiné consiste à produire de l'électricité sur 2 cycles successifs. Le premier cycle est semblable à celui d'une TAC : le gaz brûlé en présence d'air comprimé actionne la rotation de la turbine reliée à l'alternateur. Dans le second cycle, la chaleur récupérée en sortie de la TAC alimente un circuit vapeur qui produit également de l'électricité avec une turbine dédiée.

Les centrales à Cycle Combiné Gaz (CCG) présentent l'avantage d'atteindre des rendements élevés, par rapport aux TAC en cycle simple, et de fournir une alternative aux centrales thermiques à flamme avec un moindre impact environnemental [9].

La cogénération sur les CCG est possible en valorisant la chaleur résiduelle, mais elle demeure peu répandue [7].

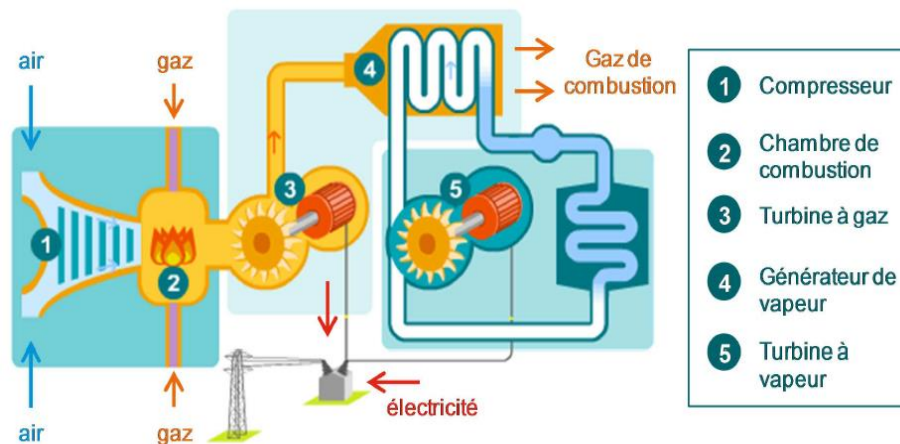


Figure I 4- Schéma de principe d'une centrale à cycles combinés [7]

3.1.5 - Moteurs à combustion interne / Groupes électrogènes

Les moteurs à combustion interne, largement utilisés pour la propulsion des véhicules, peuvent également produire de l'électricité lorsqu'ils sont reliés à un alternateur : on parle alors de groupes électrogènes. À l'intérieur du moteur, une combustion actionne le mouvement des pistons, entraînant la rotation de l'arbre relié à l'alternateur.

Les carburants liquides (diesel notamment), facilement stockables, sont couramment utilisés comme combustibles. En effet, les groupes électrogènes sont souvent utilisés pour de la production d'électricité sur des sites non interconnectés (site isolée) ou comme systèmes de secours (hôpitaux, industries, etc.) Connectés au réseau, ils sont des systèmes de production dits "d'extrême pointe" [7].

Les moteurs à gaz sont aussi courants, notamment pour de la production décentralisée en cogénération. Les tailles sont très variables, avec une gamme qui s'étend des petits systèmes domestiques jusqu'aux gros moteurs industriels [9].

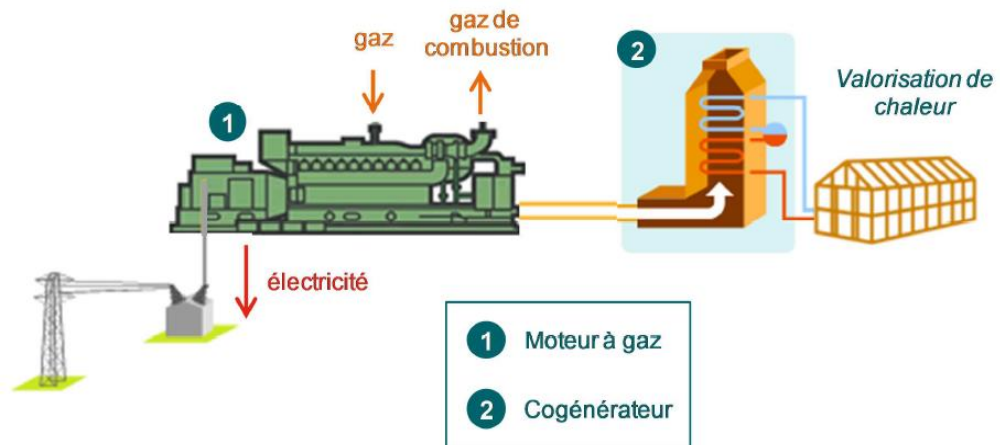


Figure I 5- Schéma de principe d'une centrale à Moteurs à combustion interne / Groupes électrogènes [7]

3.2 - Filière renouvelable

3.2.1 - Centrales biomasses

Pour produire de l'électricité, les centrales thermiques renouvelables utilisent l'énergie thermique provenant de la combustion d'une énergie primaire renouvelable, issue de la biomasse.

La biomasse, c'est l'ensemble des matières organiques (= végétales et animales) existant sur Terre. Dans le domaine de l'énergie, on désigne plus précisément par biomasse les matières organiques pouvant être transformées en énergie. Elle se présente sous trois formes : solide (bois, copeaux...), liquide (huiles végétales, alcool...), ou gazeuse (biogaz, gaz de synthèse).

On transforme la **biomasse solide** en énergie par la filière thermochimique, qui regroupe trois technologies :

1. La combustion : production de chaleur, d'électricité ou des deux à la fois par cogénération.
2. La gazéification : en chauffant de la biomasse solide, à haute température et sans oxygène, on obtient un gaz de synthèse, utilisable comme combustible. La gazéification permet également la cogénération.
3. La pyrolyse : production de charbon de bois ou charbon végétal et de combustible gazeux de bonne qualité, par chauffage à haute température.

La filière biochimique transforme la biomasse provenant des boues et déchets par un autre procédé [7] :

1. La méthanisation : en laissant fermenter les matières organiques dans un digesteur, on obtient un biogaz, utilisable comme combustible. Les digestats, résidus de la méthanisation, sont valorisables sous forme de compost ou d'engrais liquide.

Ainsi, la biomasse permet de produire une énergie renouvelable, utilisable sous forme de chaleur, d'électricité, mais aussi de carburant. La reconversion des centrales thermiques à flamme conventionnelles à charbon en centrales biomasse est une option connaissant un intérêt croissant [10].

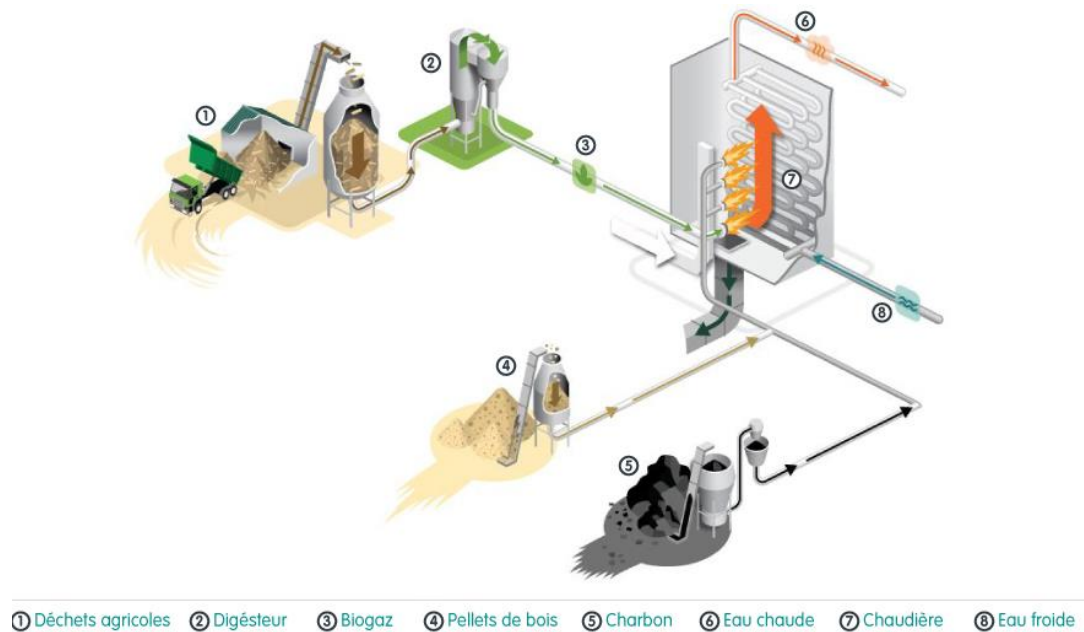


Figure I 6- Schéma de principe d'une Centrales électriques biomasse [7]

3.2.2 - Centrales hydroélectriques

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau, guidée par un réseau de conduites, en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternateur relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice [11].

On distingue les ouvrages hydroélectriques disposant d'un stock d'énergie (ouvrages lac avec retenue d'eau) à ceux produisant au "fil de l'eau". Les ouvrages éclusés sont mixtes, avec une capacité de stockage limitée [7].

La taille des ouvrages est extrêmement variable, de l'ordre du KW pour la "pico-hydro" jusqu'à plusieurs dizaines de GW, pour des hauteurs de chutes de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Les centrales de taille restreinte, souvent au "fil de l'eau", produisent une électricité considérée comme fatale. A l'inverse, les ouvrages disposant d'un stock hydraulique sont des outils de flexibilité pour le réseau [7].

Certains ouvrages, les STEP (stations de transfert d'énergie par pompage), disposent en plus d'une capacité de pompage qui offre un degré de flexibilité supplémentaire, en remontant l'eau

dans un bassin supérieur pendant les périodes creuses de consommation électrique et en produisant de l'électricité durant les périodes de plus forte consommation [7].

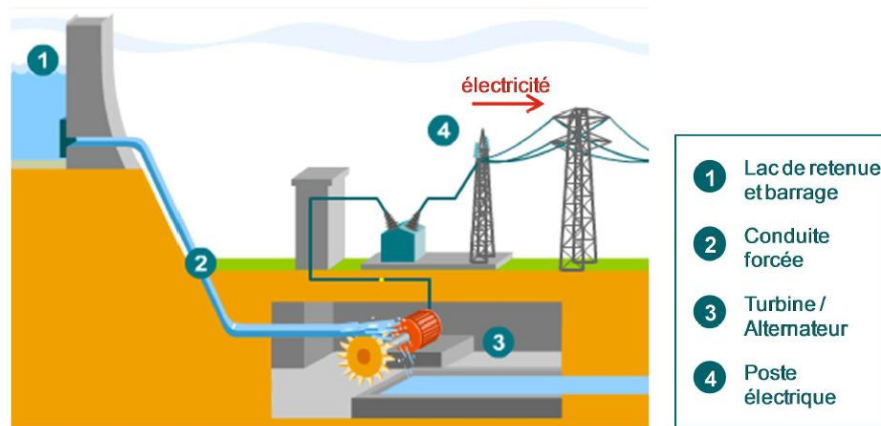


Figure I 7- Schéma de principe d'une centrale hydroélectrique [7]

3.2.3 - Fermes éoliennes

Une éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en électricité via un rotor, lié aux pales, ainsi qu'un dispositif électromécanique. La puissance fournie étant proportionnelle au cube de la vitesse du vent, la performance de l'éolienne dépend de l'emplacement ainsi que de la présence éventuelle d'obstacles. L'énergie du vent peut être captée à partir d'une vitesse de 3 m/s, pour une performance maximale atteinte à partir de 12 m/s à 15 m/s. Les éoliennes sont mises à l'arrêt au-delà d'une vitesse de vent seuil (variable selon les modèles) [7].

Cette source est non polluante. Néanmoins l'énergie éolienne est intermittente, et l'installation de parc éolien engendre des impacts paysagés et sonores [11].

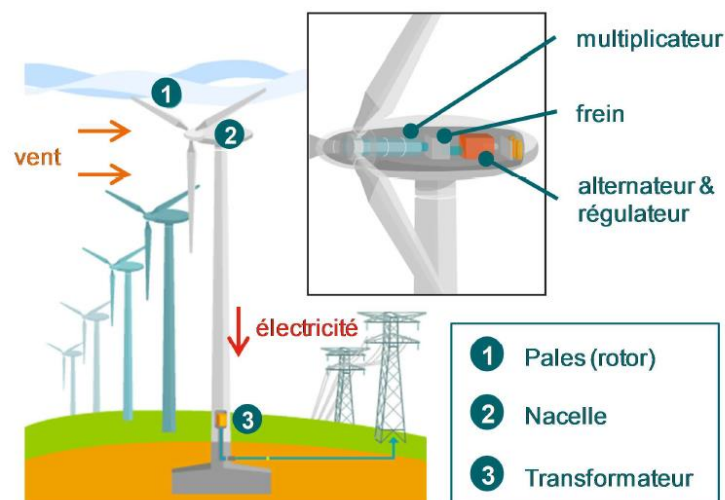


Figure I 8- Schéma de principe d'une centrale éolienne terrestre [7]

3.2.4 - Centrales à Système solaire

Deux grands types d'énergies rentrent au-dessous de cette catégorie, la première thermique se base sur la température qui permet essentiellement de faire chauffer l'eau afin de produire une pression mesurable, on l'appelle aussi la production combinée de chauffage par plancher chauffant [10]. La deuxième photovoltaïque basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire.

On peut la considérer comme une énergie propre puisque sa production énergétique à partir des modules PV n'engendre pas de déchets impliquant la pollution à la terre. Cette ressource a toutefois deux inconvénients, la production est invariablement liée aux conditions climatiques et une surface considérable est nécessaire pour produire de grande quantité d'énergie puisque le rendement des panneaux PV est relativement faible [11].

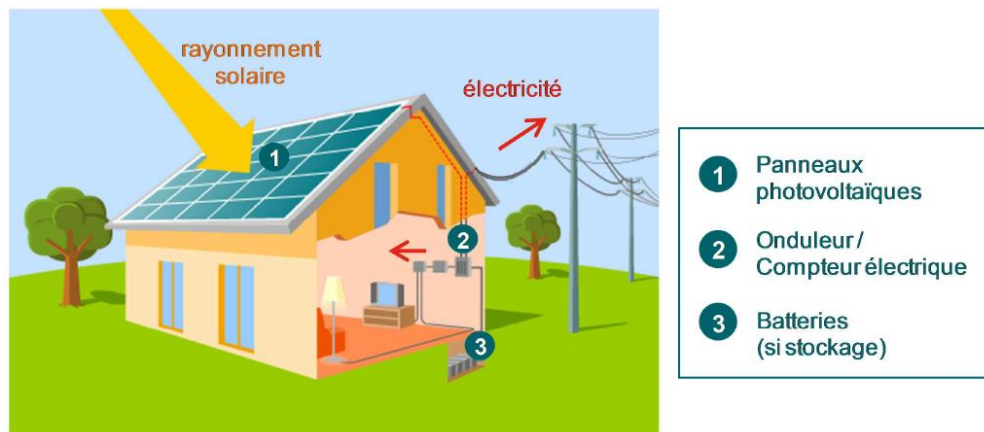


Figure I 9- Schéma de fonctionnement d'une centrale solaire photovoltaïque [7]

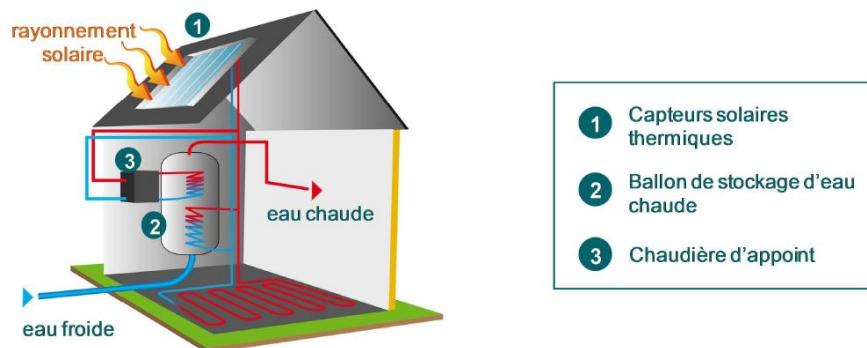


Figure I 10- Schéma de fonctionnement d'une centrale solaire thermique [7]

3.2.5 - Les énergies marines

L'énergie marine ou des mers est extraite du milieu marin. Il y a notamment l'énergie marémotrice (issue du mouvement de l'eau créé par les marées), l'énergie des vagues (utilise la puissance du mouvement des vagues), l'énergie thermique des mers (produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans), les éoliennes offshore, et l'énergie osmotique (diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer). Tout comme les autres sources renouvelables, elle est non polluante lors de la production. On note également que l'énergie potentiellement disponible est énorme et que cette technologie a un bel avenir [11] [12].

3.2.6 - Centrale hydrogène

Dans le domaine de la recherche, une autre énergie a le vent en poupe. Très abondante, plus énergétique que le pétrole ou le gaz naturel, ni polluante, ni toxique, elle pourrait, du moins en théorie, répondre à tous nos besoins l'hydrogène tout ça à cause de ses avantages :

1. L'hydrogène peut être produit à partir de sources d'énergie propre.
2. L'hydrogène peut être stocké et distribué dans une variété de formes.
3. L'hydrogène peut remplacer les combustibles fossiles pour fournir de l'électricité de manière différente. Il peut être utilisé comme carburant pour alimenter le moteur à combustion pour la production d'électricité en faisant tourner la machine. Il peut également être directement utilisé par un électro-réacteur chimique dans les piles à combustible pour produire de l'électricité. Pour les puissances élevées la conversion la plus efficace de l'hydrogène à l'électricité peut être atteinte en production combinée en chaleur [11] [13].

3.2.7 - La géothermie [14]

Le terme géothermie provient du grec <Ge> et <thermos>, signifiant respectivement : la terre et la chaleur. La géothermie peut se définir comme étant la technique qui consiste à puiser dans le sous-sol ou dans les roches, les calories qui y sont contenues, afin de les rendre disponibles en surface pour des applications de chauffage ou de production d'électricité. Dans des cas particuliers, la géothermie peut consister à injecter de la chaleur dans le sous-sol afin de refroidir les installations de surface.

Différentes sources de chaleurs sont à l'origine de la chaleur interne de la terre : la radioactivité, la chaleur initiale, la chaleur de différenciation et les mouvements différentiels.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques ; c'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont

technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas très élevé [11].

4 - La production d'électricité dans le monde « Perspectives générales »

4.1 - Développement économique et production d'électricité [3]

L'électricité est un facteur essentiel au développement économique, dans tous les pays du monde. Son importance relative s'accroît avec les progrès techniques, l'industrialisation et le besoin de confort moderne. L'augmentation de sa production est synonyme d'amélioration de la qualité de vie et de création de richesse. La production d'électricité, ramenée au nombre d'habitants, est donc un bon indicateur permettant de mesurer les écarts de développement entre les différentes régions du monde. L'Amérique du Nord est comme toujours la région où l'on produit le plus d'électricité par habitant (14 167 kWh/hab.). C'est plus de deux fois plus qu'en Europe de l'Ouest (6 646 kWh/hab.), plus de trois fois plus qu'en Europe centrale (4 411 kWh/hab.), encore plus de quatre fois plus qu'en Asie de l'Est et du Sud-Est (3 400 kWh/hab.), huit fois plus qu'en Afrique du Nord (1 771 kWh/hab.) et près de trente fois plus qu'en Afrique subsaharienne (490 kWh/hab.).

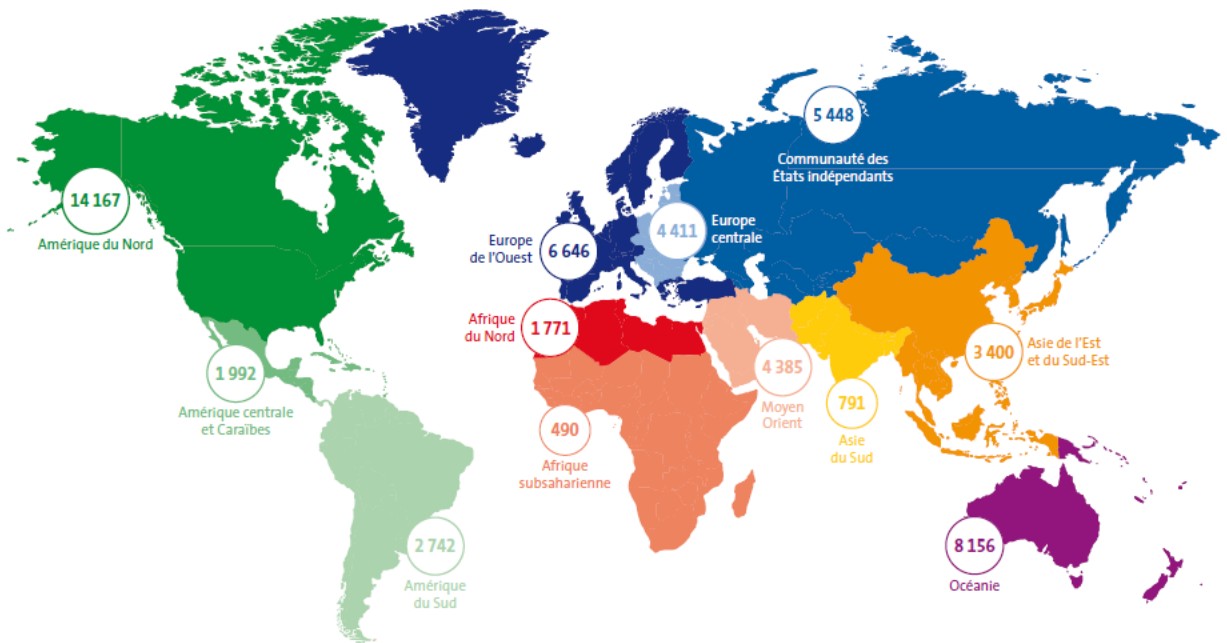


Figure I 11- Production de l'électricité par habitant en 2012 dans les régions du monde (KWh/hab) [3]

4.2 - Visions et perspectives [4]

Les visions prospectives de l'avenir énergétique sont légion : visions partielles où chaque branche industrielle fait sa promotion, visions nationales, scénarios mondiaux élaborés par des

organismes officiels (dont le plus connu est l'AIE, Agence Internationale de l'Énergie) et scénarios militants d'ONG. Nous n'avons retenu que trois scénarios mondiaux, jugés emblématiques :

1. *Le scénario AIE-NP* (New Policiers = Nouvelle politique) 2012-2040 qui correspond aux orientations annoncées par avance (2014) par les nations dans la perspective de la COP 21. Ce scénario conduit à des émissions de GES nettement supérieures à celles qui permettraient de limiter le réchauffement climatique à 2°C, comme constate la COP 21.
2. *Le scénario AIE-450 2012-2040* pour lequel les émissions de GES conduisent à un réchauffement climatique de 2°C.
3. *Le scénario Greenpeace-AER* (Advanced Energy Révolution) 2012-2050 qui s'inscrit dans le cadre de la limitation à 2°C du réchauffement climatique mais qui y adjoint d'autres objectifs : fin des combustibles fossiles en 2050, sortie du nucléaire, refus des hydrocarbures non conventionnels, de l'exploitation intensive de la biomasse, des installations de capture/stockage de CO₂ et des grands projets hydrauliques.

Les trois scénarios, examinés sur la période commune 2012-2040, traitent de sujets multiples mais nous n'avons retenu que l'indicateur consommation en énergie primaire, très lié au devenir des combustibles fossiles et au niveau de vie. Ils ont été amputés de l'Énergie primaire biomasse utilisée en production de chaleur et de l'électricité, dont il n'existe aucun historique crédible, dont les deux tiers sont très mal connus (biomasse traditionnelle) et qui évolue de manière très semblable.

Les scénarios ont été raccordés aux données 1965-2012 (source BP) pour avoir une vision long terme et correspondent à des évolutions nettement différentes en matière de consommation globale d'énergie primaire par habitant.

Le scénario AIE-NP correspond à une augmentation de l'Énergie primaire par tête au rythme observe dans les 30 dernières années du 20^{ème} siècle, mais très inférieur à celui qui a accompagné le développement des pays émergents au début du 21^{ème} siècle.

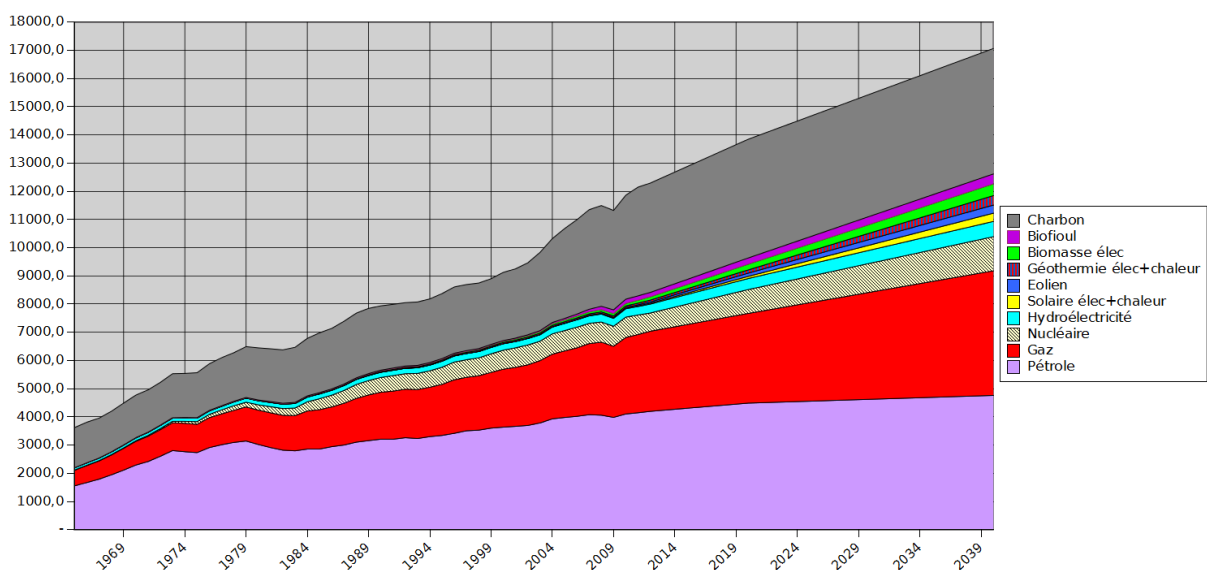


Figure I 12- Consommation mondiale d'énergie primaire (Mtep/an) - Historique + AIE New-policies [4]

Le graphique ci-dessous établi sur la base du scénario médian de population de l'ONU).

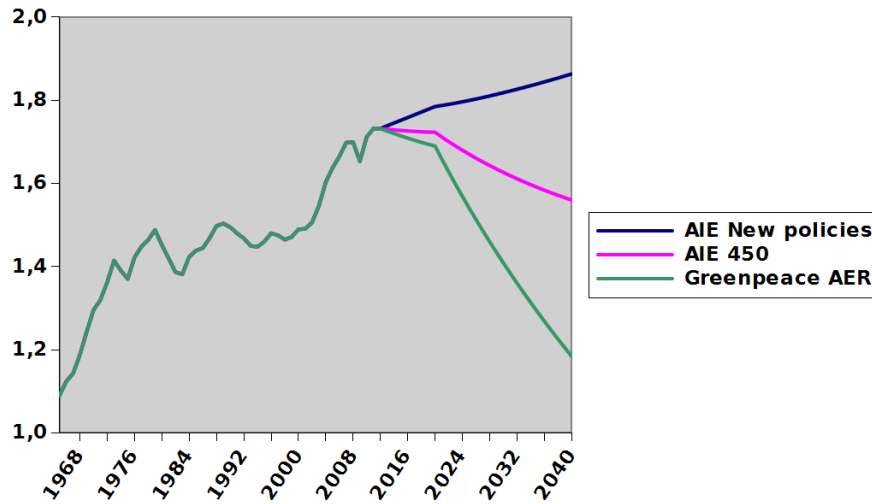


Figure I 13- Consommation Mondiale de l'énergie primaire Tep/ habitant/an [4]

Le scénario AIE-450 prévoit un retour en 2040 au niveau de consommation de 2002 et celui de Greenpeace un retour en 2040 au même niveau de l'année 1968.

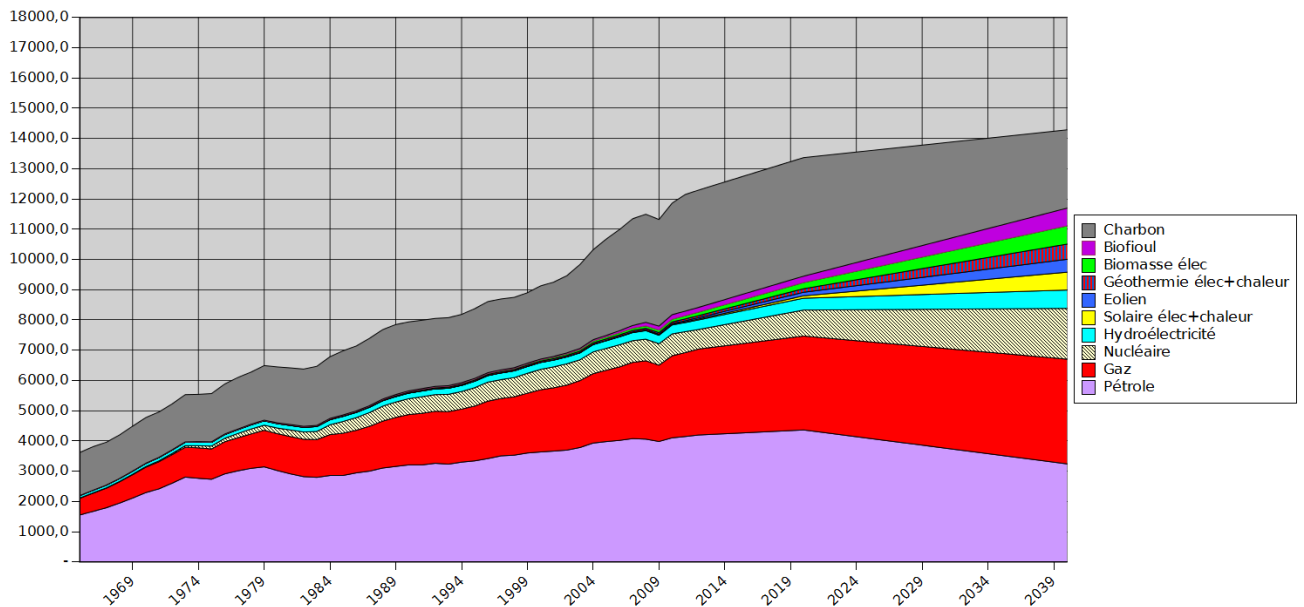


Figure I 14- Consommation mondiale d'énergie primaire (Mtep/an) - Historique + AIE scénario 450 [4]

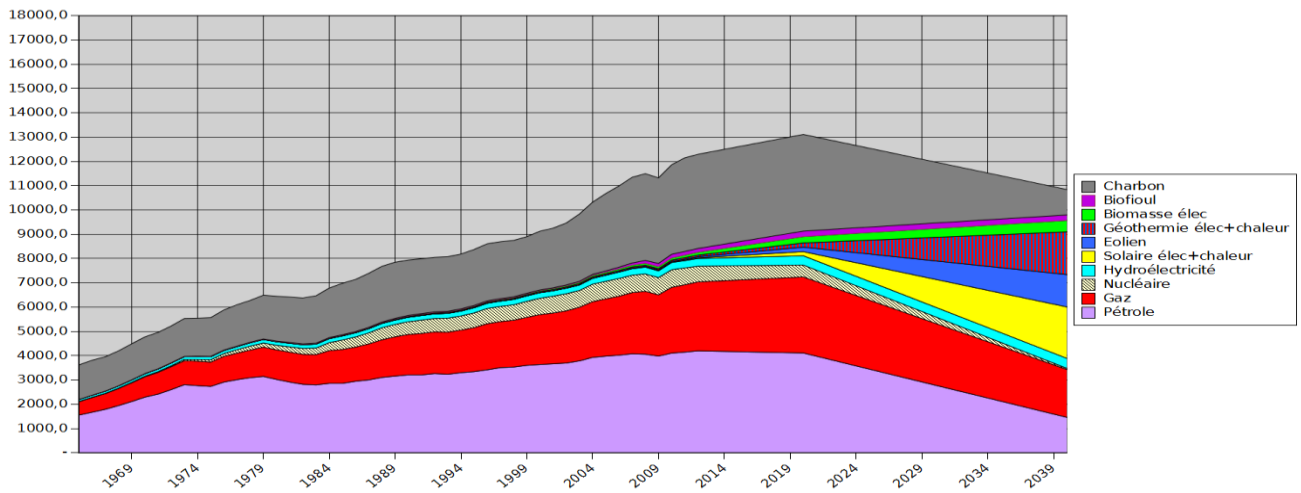


Figure I 15- Consommation mondiale d'énergie primaire (Mtep/an) - Historique + Greenspace AER [4]

4.3 - Une part croissante d'électricité... de plus en plus décarbonée [4]

L'électricité a compté pour 18,5% de la consommation finale d'énergie dans le monde en 2015 (contre 9,4% en 1973). Le mix de la production électrique mondiale reste encore largement dominé par le charbon (39,3% de la production mondiale en 2015), pourtant montré du doigt pour les fortes émissions de gaz à effet de serre associées à sa combustion.

Les énergies décarbonées progressent rapidement dans le mix électrique mais elles restent pour l'heure minoritaires dans ce mix (33,7% de la production mondiale). L'hydroélectricité a en particulier produit 3 978 TWh dans le monde en 2015 (16% du mix), soit davantage que les productions nucléaire (2 571 TWh en 2015), éolienne (838 TWh en 2015) et photovoltaïque (247 TWh en 2015) réunies.

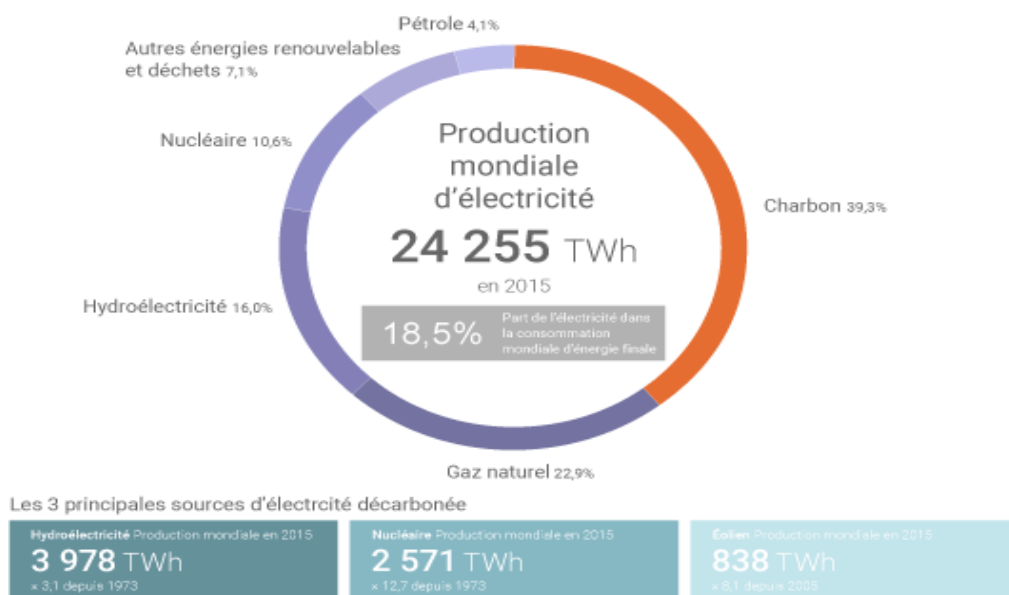


Figure I 16- Répartition de la production électrique mondiale par source d'énergie en 2015 [4]

5 - La Production de l'Électricité en Algérie

5.1 - Brève histoire [5]

Il faut savoir que la première centrale hydraulique en Algérie a été mise en service en 1910 installée au fil de l'eau dans les gorges du Rhumel à Constantine, elle développait alors une puissance de 4.2 MW, considérée pour l'époque, comme étant un ouvrage de grande ampleur. La filière connaîtra des petites réalisations sans grande envergure jusqu'à 1962 au détriment de la filière thermique, avec la parution de la première centrale thermique à vapeur (TV) en 1913 d'une puissance de 22 MW apparue à la base navale de Mers El-Kebir (Oran). L'effort sera soutenu avec pas moins de trois grandes réalisations qui verront le jour, entre 1913 et 1920 avec les mises en service successives ; du Hamma (Alger) d'une puissance de 64 MW suivit de la centrale du port (Alger) avec 34 MW et presque en même temps celle d'Annaba l'ex Bône avec 58 MW.

Cependant par la suite, l'essor de la filière hydraulique, sera spectaculaire, puisque de 1946 à 1953 on connaîtra la mise en service de pas moins de 9 ouvrages totalisant une puissance d'environ 200 MW, dont le barrage d'Erraguene, un des plus importants ouvrages de l'aménagement DJENDJEN, une belle œuvre imposante qui s'étend dans la vallée d'Oued Kébir (JIJEL) avec ses 12 voûtes et son architecture particulière qui en font un ouvrage prodigieux.

Mise à part la plupart des ouvrages hydraulique, les autres centrales seront réformées petit à petit, au profit de nouvelles installations plus puissantes et plus performantes, avec comme originalité, l'utilisation du gaz naturel, une énergie plus propre, abondante et moins chère comparée, au charbon utilisé jusqu'en 1963 pour la dernière fois dans la centrale d'Alger port.



Figure I 17- Vue d'Alger Port en 1910 [5]

Si la filière TG a fait une apparition timide dans les années 60, elle égalera la filière TV en 1970 et parviendra à évoluer côte à côte avec celle-ci quelque temps ; puis s'appropriera la première place en 2000 avec 53.1 % contre 40.7 % pour la TV Loin derrière, vient la filière hydraulique avec 3.69 %, et enfin, le complément du parc, avec 2.53 % assuré par la filière Diesel.

Il convient de signaler que cette dernière couvre paradoxalement, une demande éparpillée sur une superficie (région du sud) supérieur à 5 fois celle couverte par les autres filières.

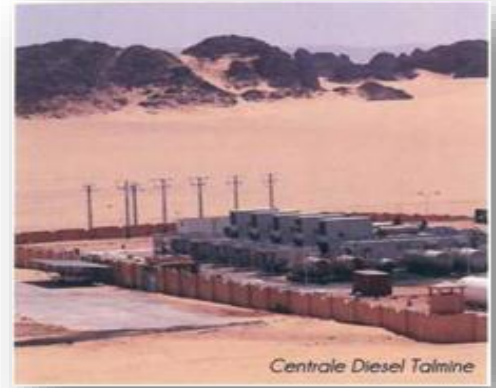


Figure I 18- Centrale Diesel de Talmine (Réseau Isolé du Sud) [5]

Le 05 février 2002 l'Algérie, venait de changer sa politique sur le monopole de la production de l'électricité, par la promulgation de la loi sur l'électricité N° 02-01 relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisation. D'autres producteurs, sont venus enrichir le paysage de production par un apport de plus de 5 000 MW.

5.2 - Le développement des capacités de production [6]

Le développement du secteur de l'énergie est incontournable pour assurer le développement social, économique et industriel de notre pays. Cela est d'autant plus crucial que la demande en énergie électrique en Algérie est sans cesse croissante avec un taux dépassant souvent les 5%. Cet état de fait a nécessité la mise en œuvre d'un vaste et ambitieux programme d'investissement qui va permettre le doublement des capacités existantes de production

Sur la période 2015-2025, la capacité de production additionnelle nationale prévue est de 27 800 MW (tous réseaux confondus) à injecter sur le réseau dont 15 385 MW décidés et 12 415 MW (12 150 MW sur le réseau interconnecté du Nord (RIN) et 265 MW sur le réseau isolé du sud (RIS)) en idée de projet.

Les 15 385 MW déjà décidés sont réparties comme suit :

- ✓ 14 150 MW en conventionnel pour le Réseau interconnecté national (RIN),
- ✓ 340 MW Turbine Gaz pour le Pôle In Salah Adrar et Timimoune (PIAT),
- ✓ 495 MW dont 153 MW en diesel et 342 MW en turbines à gaz pour les Réseaux isolés du sud (RIS) qui seront transférées à partir du RIN,
- ✓ 354,3 MW en photovoltaïques (PV) et Eolien ont été déjà réalisé par la Société SKTM.

Additivement aux capacités conventionnelles et sur la base du nouveau programme des énergies renouvelables adopté par le gouvernement, il est prévu la réalisation d'une capacité de 9.043 MW, répartie comme suit :

- ✓ Photovoltaïque : 5.443 MW sur la période 2016-2025.
- ✓ Eolien : 2.600 MW sur la période 2017-2025.
- ✓ CSP : 1.000 MW sur la période 2021- 2025.

A noter que plusieurs projets d'une capacité totale de 354,3 MW en photovoltaïque et Eolien sont déjà réalisé par la société SKTM (filiale du groupe Sonelgaz) et mis en service à la fin de l'année 2017.

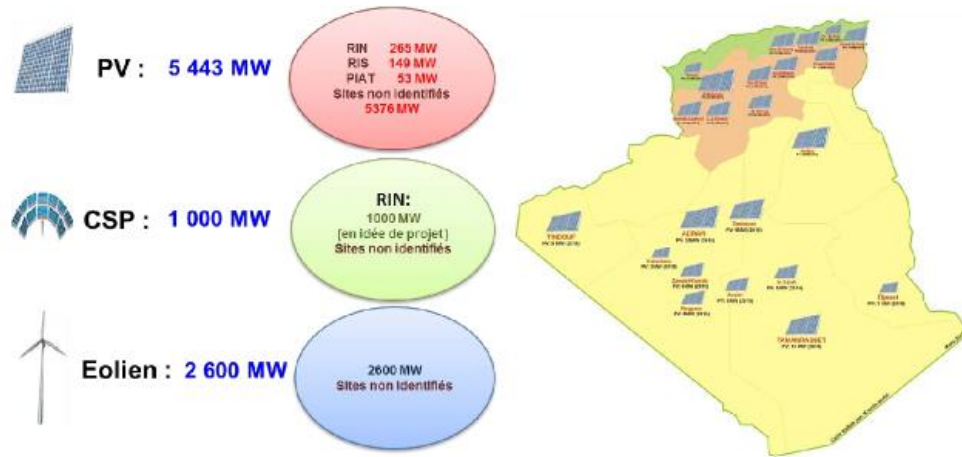


Figure I 19- Prévisions de développement en énergies renouvelables période 2016-2025 [6]

5.3 - Prévision de la demande électrique à l'horizon 2030 sur le RIN [19]

La Production d'électricité sur le Réseau national Interconnecté du Nord (RIN) de l'Algérie, évoluera au taux moyen de 5,7% sur l'ensemble de la période (2013-2030). Par sous périodes, les taux se présentent comme suit :

- 7,2 % sur la période (2013 - 2018)
- 5,5 % sur la période (2018 - 2023)
- 4,8 % sur la période (2023 - 2030)

Unité (GWh)	2010	2011	2012	2013	2014	2018	2023	2030
Production (GWh)	44 017	47 858	53 154	54 875	58 767	77 764	101 528	141 089

Et concernant la demande prévue sur le Réseau Interconnecté National Algérien, une tendance d'évolution à raison de 6,3% par an sur la période. Par sous périodes, les croissances attendues sont :

- 7,9 % sur la période (2013 - 2018)
- 6,0 % sur la période (2018 - 2023)
- 5,3 % sur la période (2023 - 2030)

Unité (GWh)	2010	2011	2012	2013	2014	2018	2023	2030
Haute Tension	7220	7817	8169	8525	9 352	12 649	17 782	24 376
Moyenne Tension	9 974	10 630	11 594	12 072	12 657	15 473	20 880	33 567
Basse Tension	17 885	19 643	22 452	23 385	25 527	36 244	47 418	65 420
Consommation TOTAL	35 079	38 090	42 215	43 982	47 536	64 366	86 080	123 363

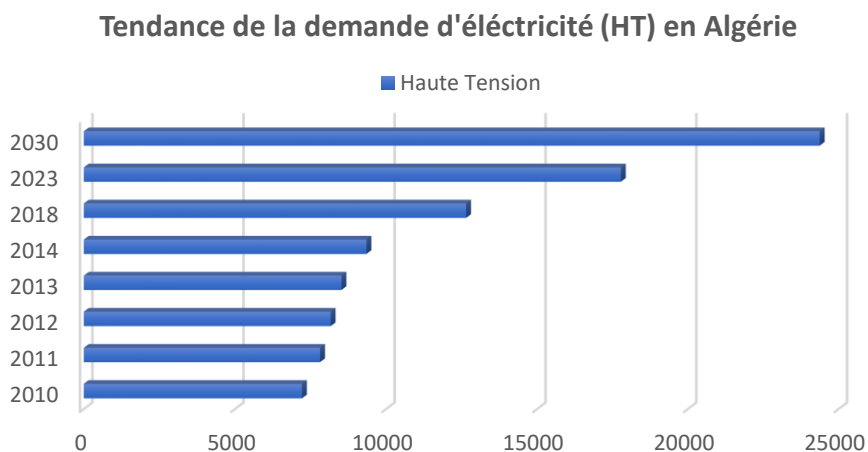


Figure I 20- Evolution de la demande d'électricité Haute Tension en Algérie à l'horizon 2030 [19]

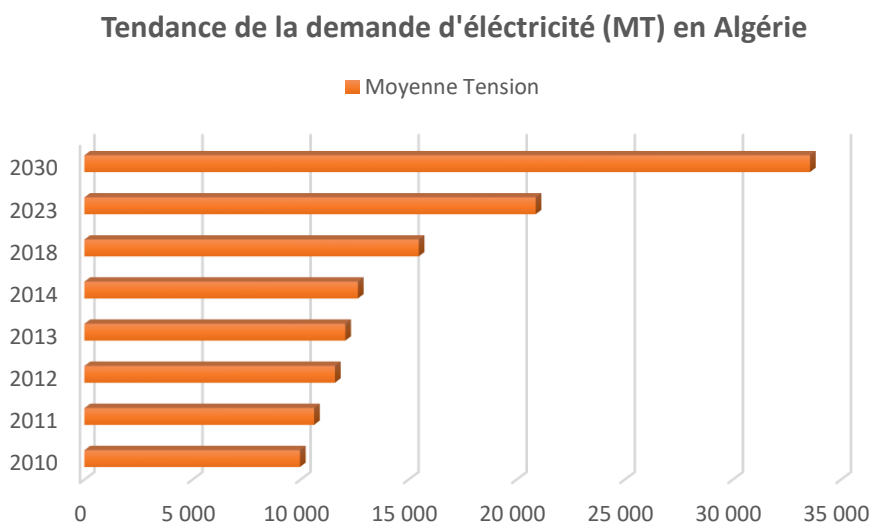


Figure I 21- Evolution de la demande d'électricité Moyen Tension en Algérie à l'horizon 2030 [19]

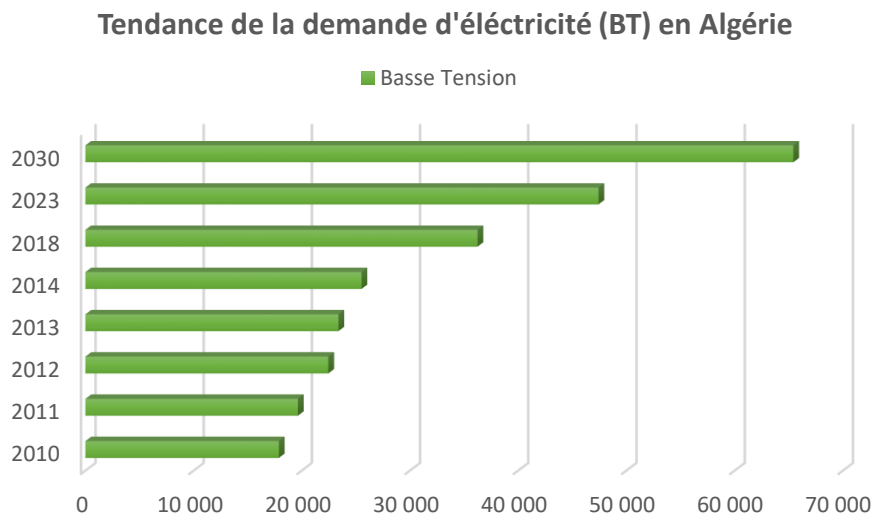


Figure I 22- Evolution de la demande d'électricité Basse Tension en Algérie à l'horizon 2030 [19]

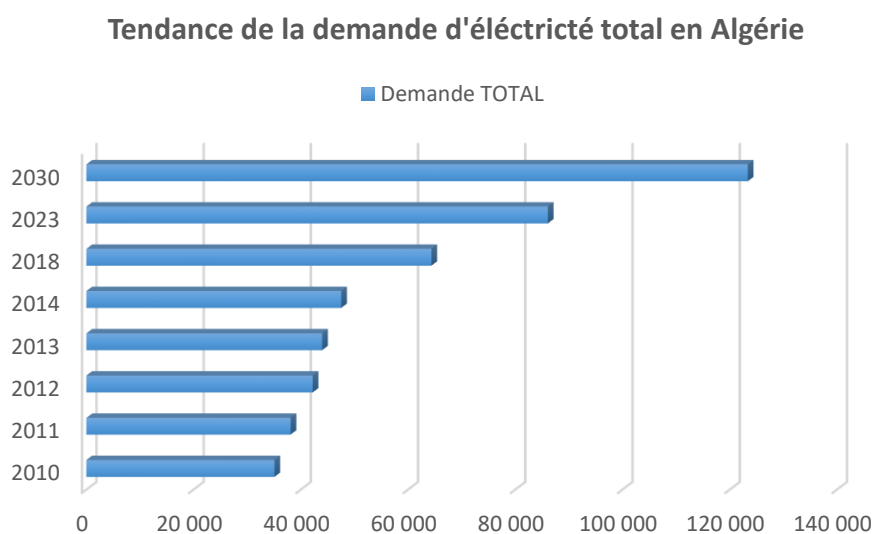


Figure I 23- Evolution de la demande totale d'électricité en Algérie à l'horizon 2030 [19]

S'agissant de la consommation d'électricité dans les réseaux isolés du Sud à l'horizon 2030, elle est présentée dans le tableau suivant :

Unité (GWh)	2018	2019	2022	2023	2026	2027	2029	2030
Consommation RIS	1 594	1 614	1 969	2 096	2 496	2 623	2 840	2 945

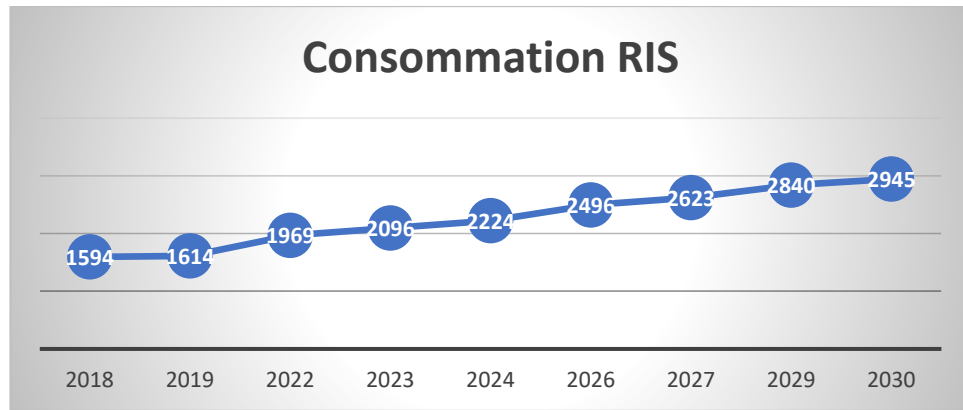


Figure I 24- Evolution de la demande totale d'électricité aux Réseaux Isolés du Sud de l'Algérie à l'horizon 2030 [19]

6 - Electrification rurale [15]

L'électrification rurale est un processus qui consiste à fournir l'énergie électrique aux zones rurales et éloignées. L'électricité est utilisée non seulement pour l'éclairage et l'électroménager, mais elle permet aussi la mécanisation de nombreuses exploitations agricoles, telles que le battage, la traite et le stockage de céréales, par conséquent une plus grande productivité à un coût réduit. Parmi les 1,6 milliard de personnes qui n'ont pas accès à l'électricité, 80% vivent dans les zones rurales. En Afrique subsaharienne, seulement 9 % de la population rurale a accès à l'électricité.

Cependant, l'extension des réseaux électriques rencontre des contraintes économiques croissantes. Tout d'abord, la demande d'électricité dans les zones rurales est relativement faible : usages essentiellement domestiques ou de petites industries. La consommation moyenne dans certain village est souvent inférieure à 30 kWh par mois par foyer. Ce qui rend impossible, à échéance raisonnable, l'amortissement des investissements de transport et distribution engagés.

Ensuite, le coût de la fourniture d'électricité est plus élevé dans les zones rurales, soit du fait des coûts de production et de distribution dans le cas de l'extension de réseau, soit des coûts de production dans le cas de production locale.

L'électrification rurale doit être conçue et optimisée en termes de coûts de la production d'électricité. Cela implique la prise en compte de l'usage efficace de l'électricité dans les équipements et appareils de consommation dans l'évaluation des alternatives techniques.

L'association de techniques efficaces de consommation d'électricité et des technologies de production adaptées à la ressource locale et à la taille des besoins, permet de développer l'électrification rurale à un coût économique inférieur à celui de l'extension de réseau.

Les technologies sont actuellement largement disponibles mais présentent encore un vaste potentiel d'amélioration et de réduction des coûts par la recherche & développement et l'accroissement du marché.

6.1 - L'impact de l'électrification rurale [16]

Il est théoriquement admis que l'électrification rurale produit un vaste éventail de bénéfices, allant de l'augmentation des revenus liée à de nouvelles opportunités d'emploi à une amélioration de la sécurité et une baisse de la fertilité (IEG, 2008). Les bénéfices recensés dans le rapport de l'IEG peuvent être résumés de la manière suivante :

- ✓ Un effet positif de l'accès à l'électricité sur le revenu, grâce à de nouvelles opportunités d'emploi, en particulier dans le secteur non agricole ;
- ✓ Des bénéfices domestiques et en termes de loisirs (éclairage et radio/télévision) ;
- ✓ Une économie de temps au niveau des tâches domestiques pouvant être convertie en activités de loisirs ou en activités productives ;
- ✓ Des effets positifs sur l'éducation, les enfants vivant dans des foyers raccordés atteignant un niveau d'éducation plus élevé leur permettant de bénéficier plus tard de salaires plus élevés ;
- ✓ Une augmentation de la productivité des personnes travaillant à domicile par la hausse du revenu des activités existantes et la création de nouvelles activités rémunératrices à domicile ;
- ✓ Une hausse de la productivité agricole induite par l'augmentation des revenus ;
- ✓ Une amélioration de l'état de santé et une baisse de la mortalité grâce à l'amélioration de la qualité de l'air intérieur entraînée par les changements de moyens d'éclairage ;
- ✓ Une réduction de la fertilité au prix d'un moindre investissement, puisqu'obtenue grâce à des canaux d'informations utilisant l'électricité à la place de programmes de santé reproductive ;
- ✓ Des effets positifs sur les biens publics, tels que l'amélioration de la sécurité et la diminution de la pollution de l'environnement.

Enfin, le gain de temps apporté par l'utilisation de l'électricité pour les tâches pénibles peut être utilisé pour d'autres activités productives améliorant ainsi le niveau de vie des populations.

7 - Présentation de SKTM [17]

7.1 - Introduction :

Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida dénommé par abréviation SKTM.Spa, est une société de production d'électricité filiale du groupe Sonelgaz, dont le capital est souscrit entièrement par la holding Sonelgaz. Créée le 07 avril 2013, par scission de la société SPE.Spa, son siège social est basé à Ghardaïa.

La société est née dans un contexte de prise de conscience généralisée des incertitudes énergétiques et de la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique, un recours massif à l'énergie solaire sous toutes ses formes, directes (photovoltaïque, thermique) ou indirectes (éolien, biomasse) doit s'imposer comme une priorité, une évidence.

En plus des enjeux liés au réchauffement climatique, l'épuisement des ressources énergétiques traditionnelles, le pétrole, le gaz naturel entre autres, le recours aux énergies propres, n'est plus une question de choix mais beaucoup plus une question de devenir des nations. D'autant plus que l'Algérie jouie d'un potentiel solaire des plus importants de par le monde, et d'un potentiel éolien également non négligeable, ajoutés à l'étendue de son territoire, lui permettant d'implanter les ouvrages de production d'électricité par les procédés renouvelables sans encombre .

7.2 - Pourquoi SKTM est créée ?

SKTM a été créée pour répondre à des enjeux stratégiques de l'heure. Il s'agit :

- Des spécificités qui caractérisent la gestion du parc de production Diesel des RIS (Réseaux Isolés du Sud).
- De satisfaire aux meilleures conditions de continuité et de qualité de service fourni aux populations des régions du sud du pays.
- De la volonté de concrétiser l'ambitieux programme national de développement des Energies Renouvelables, en mettant en valeur les potentialités énormes dont dispose notre pays, notamment l'étendue de son territoire et la durée d'ensoleillement.

7.3 - Les missions principales de SKTM

SKTM a pour missions principales :

- L'exploitation des réseaux d'énergie électrique isolés du sud (production d'électricité en conventionnel) et des énergies renouvelables pour l'ensemble du territoire national.
- Le développement des infrastructures électriques du parc de production des Réseaux Isolés du Sud, de l'Engineering, de la maintenance et de la gestion des centrales électriques relevant de son champ de compétence.
- La commercialisation de l'énergie produite pour les filiales de distribution notamment après le déploiement des Energies Renouvelables sur les réseaux interconnectés .

7.4 - Réalisations et perspectives

SKTM a participé, dès sa création, aux côtés des autres filiales de métiers de base, avec des programmes visant d'assurer de la sorte une qualité et continuité de service irréprochable au profit des populations des régions du sud du pays.

Ces programmes ont ramené la capacité totale des réseaux isolés du sud à 700 MW, alors que la puissance maximale appelée n'a pas dépassé les 400 MW, ce qui a permis d'assurer une continuité de service sans délestage, dans les différentes régions du sud du pays .

Les réalisations de SKTM ont été marquée également par :

- La réalisation de 23 centrales solaires photovoltaïques, implantées dans les hauts plateaux et les régions du sud du pays, la mise en service de la centrale expérimentale de Ghardaïa, de la ferme éolienne d'Adrar, ainsi que 10 stations de mesures météorologiques.
- La création des centrales de production d'électricité conventionnelle dans différents sites frontalière pour faire face à la demande d'énergie électrique.
- La gérance d'un parc de production conventionnelle (Groupes Diesel et TG) pour plus de 28 centrales.

8 - Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les moyennes de production d'électricité.

Dans un premier lieu, une brève historique a été présentée sur l'invention de l'électricité et les différentes distinctions à travers plusieurs savants et chercheurs conduisant à la découverte et à la définition exacte de l'électricité.

Par la suite, différents moyens connus mondialement de la production d'énergie électrique par filière de production (conventionnel et renouvelable) ont été présentés.

Finalement, la dernière section de ce chapitre est consacrée à une présentation de la société SKTM (filiale du groupe Sonelgaz) aussi à un état de l'art sur la production d'électricité dans le monde et dans l'Algérie en se basant sur les derniers statistiques fiables du développement économique ainsi que des visions et prospectives ont été présentées avec des notions de base sur l'impact de l'électrification rural.

Parmi les moyens utilisés pour les réseaux du grand sud caractérisé par l'éloignement et le relief difficile, les groupes électrogènes sont considérés le moyen le plus adéquat et robuste.

Le chapitre suivant sera consacré pour les centrales électriques diesel

Chapitre II

Centrale Electrique Diesel

1 - Introduction

Après avoir exposé dans le premier chapitre les notions d'électricité et les moyens de sa production, le présent chapitre N°2 est consacré aux généralités sur les centrales de production diesel et il donnera des détails sur les groupes diesel, leur composition, leur classification et leurs performances.

2 - Définition d'une centrale de production Diesel [22] :

Une centrale de production d'énergie électrique basée sur des moteurs diesel est constituée d'un ou de plusieurs groupes électrogènes pourvus de tous les systèmes auxiliaires mécaniques, électriques et de commande, ainsi que des installations civiles et des bâtiments associés.

Les groupes électrogènes diesel représentent l'une des technologies de production d'énergie électrique qui offre une grande souplesse d'exploitation du fait:

- De la grande variété des combustibles pouvant être utilisés. De plus en plus, les moteurs actuels sont facilement convertibles et le même moteur peut brûler deux ou trois combustibles, en régime individuel ou dual, incluant les combustibles liquides lourds, le gaz naturel, le gaz de pétrole liquéfié (GPL), le gaz de synthèse ou même le biogaz.
- La mobilité. En effet, les groupes de production d'énergie électrique comprenant le moteur, le générateur et leurs systèmes auxiliaires – admission et filtration d'air de combustion, alimentation en combustible, refroidissement, ventilation, échappement, transformateur, excitateur, commande et contrôle, etc. – peuvent être livrés en conteneurs de dimensions standard, facilement transportables et pouvant être branchés là où requis. Grâce à cette caractéristique, en Algérie, les centrales diesel sont généralement installées dans des régions isolées, desservies par des réseaux électriques régionaux, non branchés au réseau national.
- La possibilité de le fonctionner dans tous les régimes de puissance nécessaires.

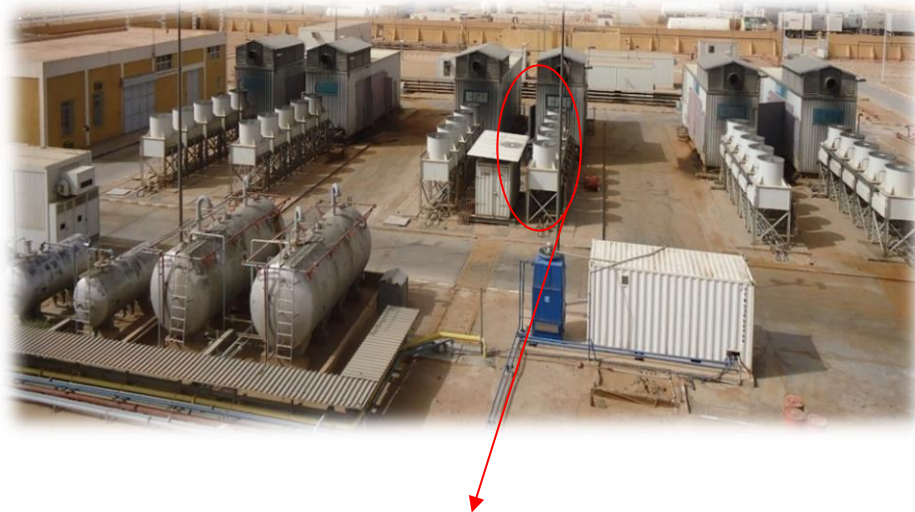
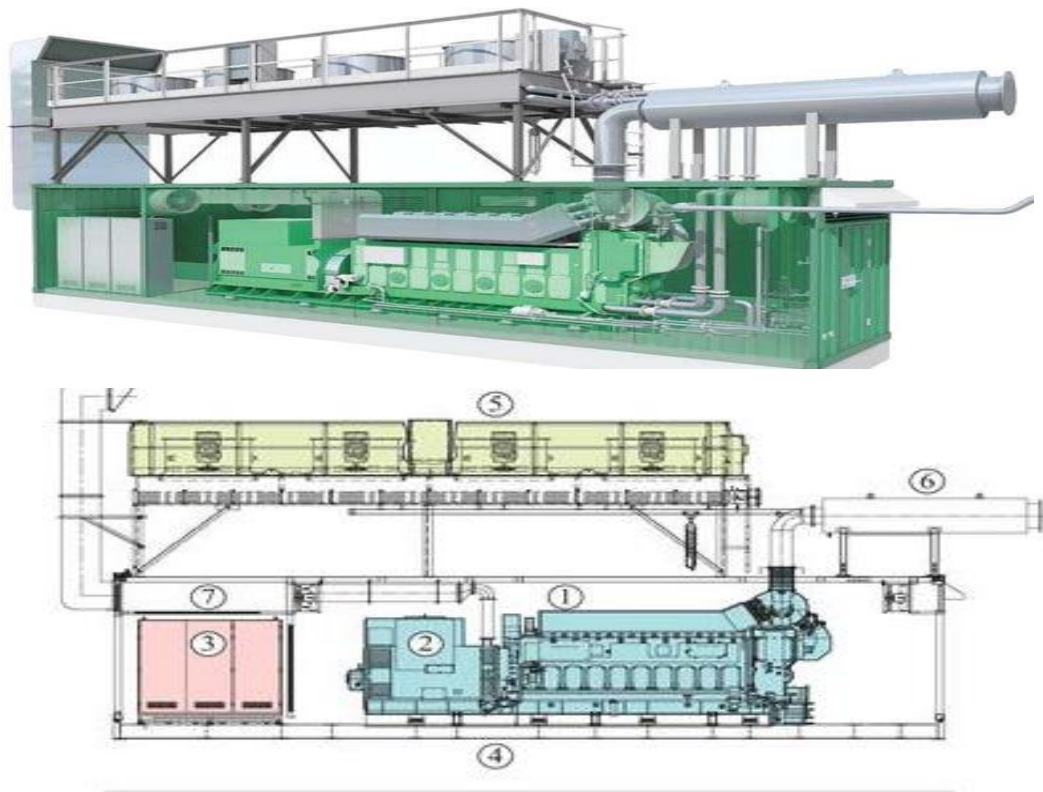


Figure II 1- Vue d'ensemble d'une centrale thermique diesel (sans salle des machines) [22]



- | | |
|-------------------------|--------------------------------|
| (1) Moteur | (5) Système de refroidissement |
| (2) Alternateur | (6) Système d'échappement |
| (3) Panneau de commande | (7) Système d'admission d'air |
| (4) Enceinte (package) | |

Figure II 2- Package d'un groupe diesel de Production [22]

3 - Différentes catégories des groupes électrogènes [23]

La gamme de puissance des groupes électrogènes couvre les besoins à partir de quelques kilowatts à presque 100 MW, avec des consommations spécifiques de combustibles pouvant atteindre des valeurs très réduites (155 g/kWh) et des rendements dépassant 50 %.

En fonction de la vitesse de rotation du vilebrequin les moteurs sont classifiés comme suit:

3.1 - Moteurs à haute vitesse

Ce sont des moteurs très rapides (high-speed) dont la vitesse de rotation est supérieure à 1500 tr/min, dérivés dans la plupart des applications hors route (moteurs de camions lourds ou locomotives).

Ces groupes sont utilisés surtout en réserve (stand-by) ou pour l'alimentation de petites communautés en régions éloignées. Ils présentent les caractéristiques suivantes :

- Compacts, faciles à transporter (en modules et parfois en remorques), l'installation demande en général peu d'ouvrages préparatoires.
- Combustible utilisé : gas-oil.
- Rendement faible 32 à 35 % impliquant un coût du kWh plus élevé.
- Entretien exigeant (il faut prévoir un groupe ou deux de réserve en plus de la capacité en puissance installée nécessaire afin de pallier au temps d'indisponibilité dû à l'entretien).

3.2 - Moteur à moyenne vitesse

Ce sont des moteurs semi rapides (medium-speed) dont la vitesse de rotation varie entre 300 et 1200 tr/min.

Ces groupes sont utilisés dans des centrales pouvant desservir d'importantes communautés en régions éloignées. Ils présentent les caractéristiques suivantes :

- L'encombrement et le poids peuvent demander des ouvrages préparatoires importants (massifs de béton, atténuation des vibrations, une salle des machines, etc.)
- Combustibles possibles : gas-oil, mazout lourd ou gaz naturel.
- Rendement concurrentiel avec les turbines à gaz : 38 à 42 %.
- Entretien exigeant (il faut prévoir groupe de réserve en plus de la capacité de puissance installée nécessaire afin de pallier au temps d'indisponibilité dû à l'entretien).

3.3 - Moteur à basse vitesse

Ce sont des moteurs lents (Low-speed), dont la vitesse de rotation varie de 100 à 300 tr/min. Ces groupes peuvent avoir une capacité avoisinant les 100 MW et être utilisés dans des centrales

de base pour desservir de grosses communautés (installés souvent près de la mer, sur des îles pour faciliter le ravitaillement en mazout). Ils présentent les caractéristiques suivantes :

- Extrêmement massifs, technologie venant de la marine.
- Combustible utilisé : mazout lourd, gaz naturel, gaz de synthèse, biogaz.
- Très bon rendement jusqu'à 50 %, donc le meilleur coût revient du kWh.
- Peuvent aussi être installés en cycles combinés avec chaudière de récupération sur les gaz d'échappement (le rendement peut atteindre jusqu'à 55 %).
- Conditions d'exploitation flexibles (50 % à 100 % de la puissance nominale), peu d'entretien (opérations d'entretien laborieuses à cause des pièces de rechange de grandes dimensions).

4 - Classification des centrales diesel en fonction du type de production d'énergie [23]

Selon le type de production d'énergie électrique, les centrales diesel sont classées en trois catégories :

4.1 - Centrales de secours :

Pour ce type d'application, les groupes électrogènes sont conçus pour livrer de l'énergie seulement pendant une panne du réseau d'alimentation électrique.

Les groupes électrogènes de secours se mettent automatiquement en route en cas d'une panne du réseau d'alimentation électrique public. En cas normal ils se trouvent dans un mode d'attente « stand-by ». Ces installations fonctionnent que quelques heures par année et ne sont pas destinées à couvrir les pointes du réseau. Ils sont installés là où une alimentation électrique continue est jugée critique (par exemple les hôpitaux) ou encore lorsqu'une interruption du courant électrique provoquerait des pertes économiques (pertes de production) ou porterait atteinte à l'intégrité d'une installation.

4.2 - Centrales de pointe

Pour ce type d'application, les groupes sont conçus pour livrer de l'énergie à la puissance maximale pour une période illimitée, avec la possibilité de livrer de l'énergie dans un régime de surcharge de 10 % pour une période limitée.

4.3 - Centrales de base

Pour ce type d'application, les groupes sont conçus pour livrer de l'énergie à la puissance maximale pour une période illimitée, sans pouvoir livrer de l'énergie en régime de surcharge.

5 - Système d'alimentation en carburant d'un groupe diesel :

5.1 - Description [23] :

Le système d'alimentation en carburant d'un groupe diesel est composé par :

- ✓ Un (1) réservoir journalier ;
- ✓ Un (1) système de comptage ;
- ✓ Un (1) filtre double (duplex) ;
- ✓ Le système d'injection ;
- ✓ Le collecteur de retour de gasoil de la pompe d'injection des groupes électrogènes vers le réservoir journalier ;
- ✓ Toute la commande et l'instrumentation requises pour le bon fonctionnement, la supervision et la maintenance du système d'alimentation en carburant.

5.2 - Principe de fonctionnement [23] :

Le carburant stocké dans les réservoirs de gasoil traité est transféré au réservoir journalier par les pompes de transfert commandées par les senseurs de niveau installés sur ce dernier.

La pompe de transfert de basse pression raccordée au réservoir journalier alimente le système d'injection. Le retour des injecteurs est dirigé vers le réservoir journalier. Advenant que la capacité du réservoir journalier soit petite et qu'il existe un risque de surchauffer le carburant, le retour peut être dirigé directement vers les réservoirs de stockage de gasoil traité.

5.3 - Système d'injection [25] :

Le système d'injection du carburant est l'un des composants les plus critiques du moteur diesel. L'injection représente le processus pendant lequel le carburant est pulvérisé à haute pression dans l'air comprimé situé dans la chambre de combustion. Le système d'injection assure :

- ✓ Une pression d'injection adéquate pour permettre au carburant de pénétrer à l'intérieur de la chambre de combustion pré-pressurisée par de l'air comprimée.
- ✓ La dissociation du carburant dans des gouttelettes très fines pour augmenter la surface de transfert de chaleur, initier l'ignition et assurer une carburation uniforme dans le volume entier de la chambre de combustion.

La pulvérisation est le résultat du passage du carburant à très grande pression (de quelques centaines de bars jusqu'à approximativement 2000 bar) au travers d'orifices de diamètres très petits de l'injecteur (parfois inférieurs à une dixième de mm).

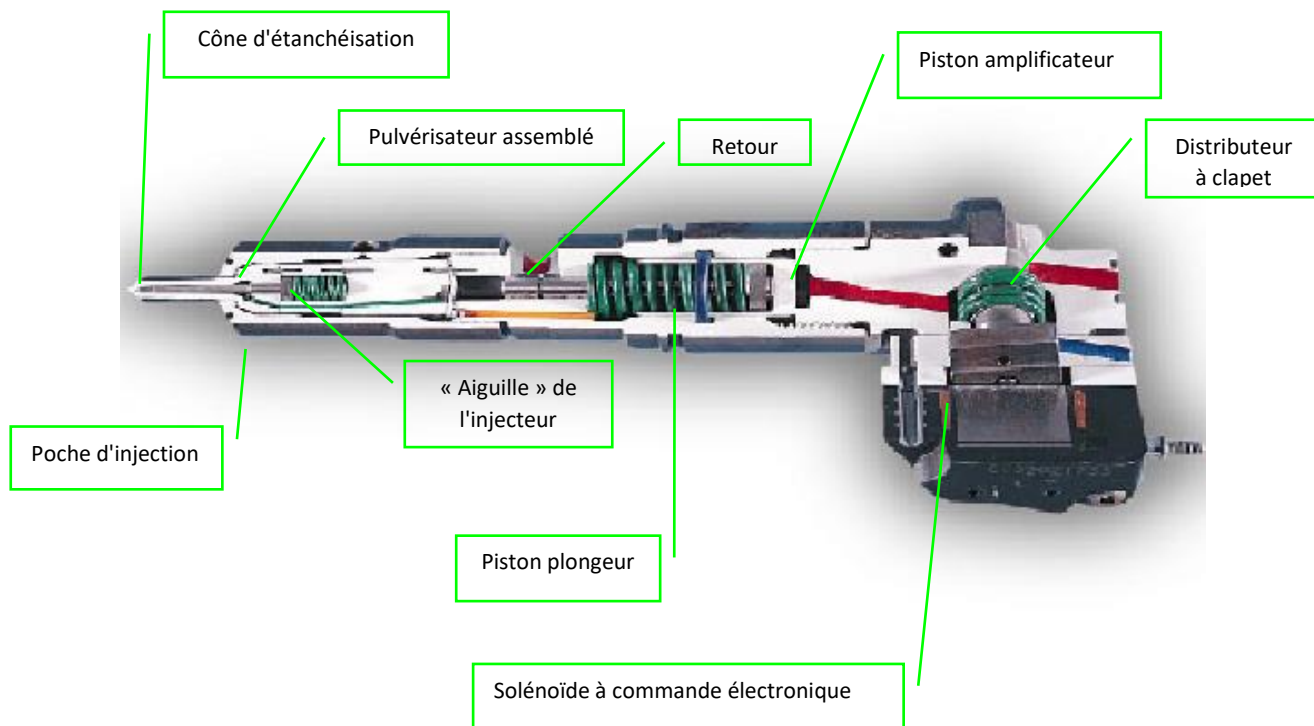


Figure II 3- Schéma de principe d'un Injecteur groupe diesel [23]

L'injecteur présenté dans la figure précédente est en effet un distributeur hydraulique à commande hydraulique, le liquide de commande étant le carburant même.

« L'aiguille » joue simultanément les rôles de soupape d'étanchéité et de piston plongeur.

Quand la valeur de la pression d'injection est atteinte, la force exercée par le carburant comprimé sur la surface transversale de l'aiguille dépasse la force des ressorts et déplace ce dernier vers la droite.

Les orifices sont maintenant ouverts permettant ainsi l'injection d'une certaine quantité de carburant dans le cylindre.

La quantité de combustible est en fonction de la pression d'injection et du temps d'ouverture, étant contrôlée électroniquement d'une façon très précise.

La durée d'ouverture de l'injecteur est calculée et contrôlée à partir d'une multitude d'informations fournies par différents senseurs, en fonction de la stratégie de contrôle et du type d'installation d'injection adoptés par chacun des manufacturiers.

La pression d'injection peut être obtenue par différents procédés : pompes d'injection en ligne ou rotatives, injecteurs-pompes commandés par solénoïde ou par l'utilisation d'un circuit à huile hydraulique.

L'utilisation d'un circuit hydraulique pour créer et contrôler la pression d'injection, présente des avantages certes par rapport aux installations classiques (à pompe d'injection mécanique) :

- ✓ L'obtention d'une pression d'injection nettement supérieure ;
- ✓ Le contrôle très précis à cause des temps de réponse réduits ;
- ✓ L'élimination des inconvénients liés à l'influence des vibrations propres des ressorts vers la fin de l'injection.

La figure suivante présente un exemple d'installation d'injection et les paramètres qui régissent la stratégie d'opération.

Dans ce type d'installation, la fréquence de l'ouverture des injecteurs est contrôlée par la pression de l'huile hydraulique tandis que le temps d'ouverture et implicitement la quantité de carburant injectée est commandé par le module de contrôle électronique.

Les pressions très élevées rendent pratiquement impossible l'utilisation des joints d'étanchéité non métalliques. L'étanchéité est réalisée seulement par le contact métal sur métal, ce qui demande une précision de fabrication très élevée ainsi qu'une filtration très fine des particules solides pouvant contaminer le carburant. Le dernier étage de filtration est composé des filtres ayant une finesse de filtration de 2 μm .

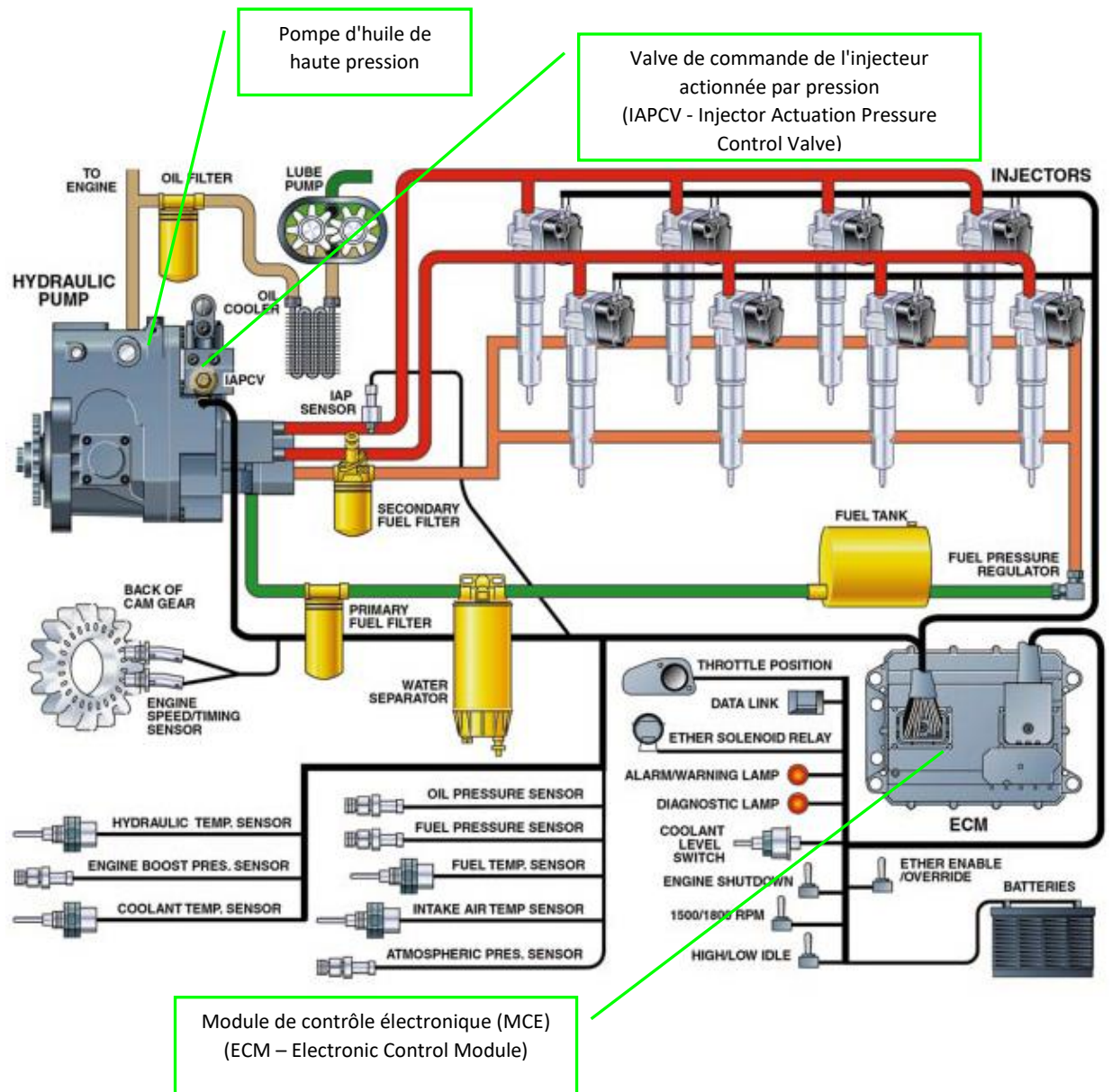


Figure II 4- Exemple d'installation d'injection (HEUI Fuel System – Caterpillar) [23]

6 - Agencement général de la centrale [23]

De façon générale, on peut répertorier toutes les installations constituant une centrale diesel comme suit :

6.1 - Îlot de puissance (Power Island)

Une centrale diesel est composée d'une ou de plusieurs « tranches », chaque tranche consistant en une unité complète et autonome de production d'électricité.

Les équipements principaux de chaque tranche constituent le bloc usine (équipements de production d'électricité) qui comprend notamment :

- ✓ Le moteur diesel et ses auxiliaires propres.
- ✓ L'alternateur et ses auxiliaires propres.
- ✓ Le transformateur principal.
- ✓ Le disjoncteur principal.
- ✓ Le système de contrôle commande.

6.2 - Les auxiliaires de la centrale (BOP - Blance Of Plant)

La centrale dispose de plusieurs systèmes auxiliaires qui ne rentrent pas directement en ligne de production d'énergie, mais qui sont indispensables à son bon fonctionnement, dont notamment :

- ✓ Le système de détection et de protection incendie qui doit assurer d'une manière continue et fiable la protection du personnel, des bâtiments et des biens matériels, ainsi que la continuité des activités de production d'énergie ;
- ✓ Le système d'air comprimé qui doit couvrir les besoins d'air de démarrage et d'air de service de la centrale ;
- ✓ Les systèmes d'eau qui doivent fournir d'une façon continue, fiable et autonome l'eau de service, l'eau adoucie, l'eau d'incendie et l'eau potable. De plus, ils doivent assurer le traitement des eaux usées.
- ✓ Le système de chauffage, ventilation et conditionnement d'air pour filtrer et maintenir les conditions de l'air à l'intérieur des bâtiments et locaux conformément aux besoins du matériel et aux exigences nécessaires pour assurer le confort du personnel d'exploitation.
- ✓ Les moyens de manutention prévus pour faciliter le levage des équipements et pièces lourdes lors des opérations d'entretien.
- ✓ Le poste d'évacuation de l'énergie électrique et les tableaux MT, BT.
- ✓ Les transformateurs de soutirage et les transformateurs auxiliaires.
- ✓ Les systèmes de distribution courant AC, CC, onduleurs, redresseurs.
- ✓ Le système de comptage, les systèmes de protections et appareils de mesures.
- ✓ Le d'éclairage et de surveillance de site.
- ✓ Le réseau de terre.

Un plan d'ensemble d'agencement (ou plan de masse) typique d'une centrale diesel figure ci-dessous :

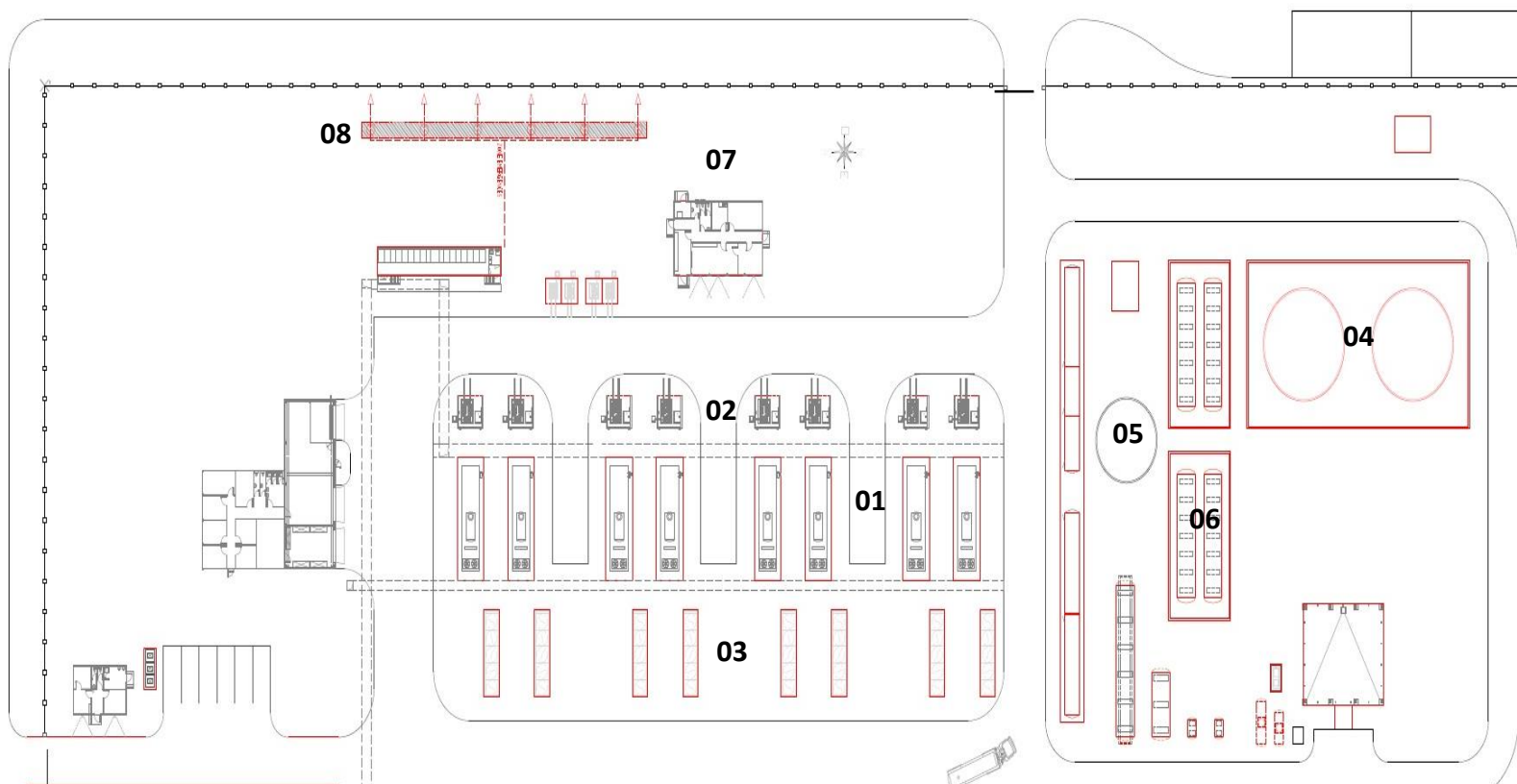


Figure II 5 – Plan de masse d'une centrale électrique à base des groupes électrogènes [23]

Légende

01 : Groupe électrogène 02 : Transformateur principal 03 : Aéro réfrigérant 04 : Réservoir gasoil brut
 05 : Réservoir eau incendie 06 : Réservoir gasoil traité 07 : Salle de commande 08 : Départs

7 - Principe de fonctionnement et performances [23]

7.1 - Fonctionnement de la centrale

Un groupe électrogène est un dispositif autonome de production de l'électricité qui convertit l'énergie emmagasinée dans le carburant en énergie mécanique de rotation, à la suite de la combustion dans le moteur et finalement en énergie électrique en utilisant le phénomène d'induction électromagnétique, dans l'alternateur.

Le courant électrique produit est acheminé vers un transformateur principal qui élève la tension au niveau requis par le réseau. L'électricité est ensuite envoyée via des câbles MT vers le poste d'évacuation d'électricité raccordé au réseau de distribution d'électricité.

Une partie de l'électricité produite est soutirée par des transformateurs dédiés à cet effet afin d'assurer l'alimentation électrique des différents systèmes auxiliaires de la centrale.

Le groupe électrogène fonctionne en utilisant le gas-oil comme combustible principal. De ce fait, la centrale est dotée d'un système devant assurer le dépotage, le stockage, le traitement, la distribution du gas-oil ainsi que l'alimentation en carburant des groupes électrogènes de la centrale.

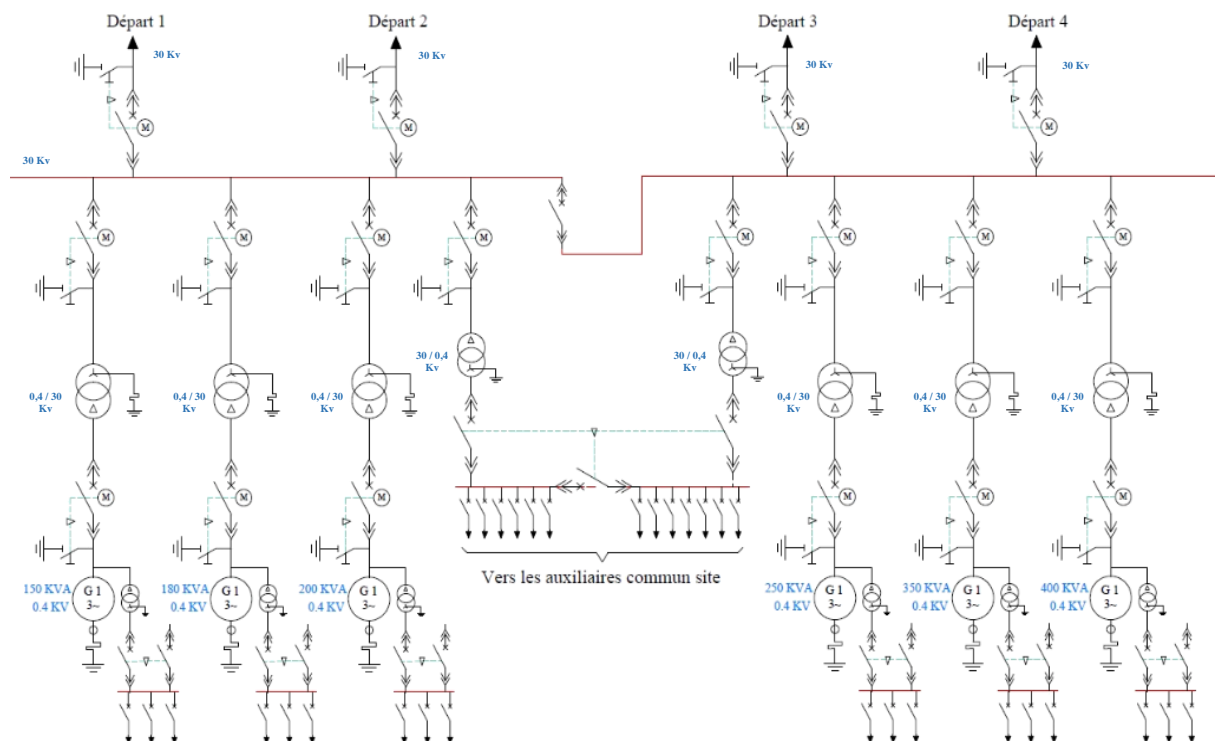


Figure I 26- Exemple d'un schéma unifilaire d'une centrale Diesel [23]

7.2 - Paramètres influant les performances moteur diesel

Les performances du moteur diesel doivent être mesurées selon les exigences des normes ISO 3046, dans les conditions d'essais spécifiés dans la norme ISO 15550 : Détermination et méthodes de mesure de la puissance du moteur – Exigences générales, soit :

- Température de l'air : 25 °C (77 °F) – conditions ISO.
- Pression atmosphérique : 100 kPa (1 bar).
- Température de l'air à l'entrée du refroidisseur intermédiaire d'air : 25 °C (77 °F);
- Température de liquide de refroidissement de l'air : 25 °C (77 °C);
- Humidité relative : 30 % :
- Le combustible liquide d'essais ayant les caractéristiques suivantes :
 - Densité relative $0.840 \pm 0,005$.
 - Pouvoir calorifique inférieur (ou la puissance calorifique nette) 42 700 KJ/Kg.

7.3 - Possibilités d'amélioration du rendement et augmentation de la puissance électrique produite

Le rendement des très grands moteurs à vitesse lente peut être augmenté en extrayant le maximum d'énergie mécanique et thermique des gaz d'échappement. L'énergie mécanique des gaz d'échappement récupérée peut être utilisée pour produire directement de l'énergie électrique supplémentaire avec un turbogénérateur (TCS – Turbo Compound System). Une bonne partie de l'énergie thermique peut être récupérée dans une chaudière de récupération qui produit de la vapeur pour l'entraînement d'une turbine (en général de basse pression), similairement à un cycle combiné d'une centrale composé de turbine à gaz.

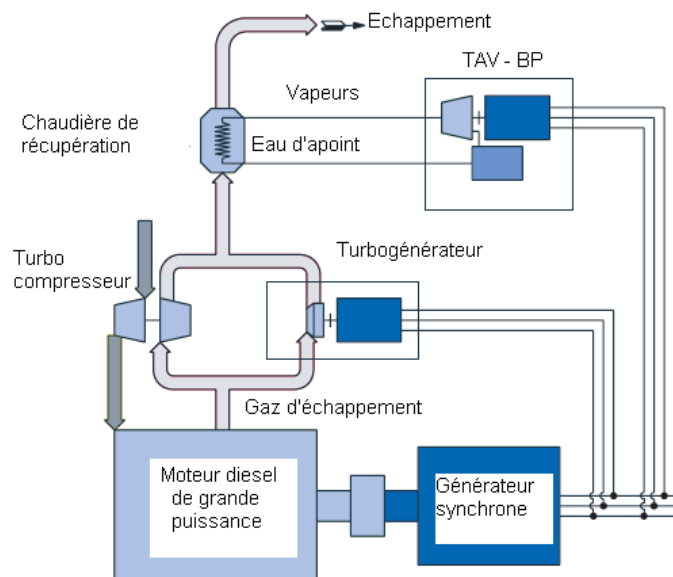


Figure II 6- Schéma de principe d'une application en cycle combiné d'une centrale diesel [23]

7.4 - Bilan énergétique

7.4.1 - Bilan énergétique typique

En synthétisant, le rendement global des centrales diesel peut varier entre 32-35 % pour les moteurs rapides à quatre temps, à 50 % pour les moteurs lents à deux temps et entre 54-55 % pour une installation en cycle combiné.

7.4.2 - Bilan énergétique d'une tranche

Le schéma ci-dessous illustre les différents points de mesurage possible pour déterminer les puissances et rendements à différents niveaux de production d'une tranche d'une centrale diesel et selon les charges auxiliaires impliquées.

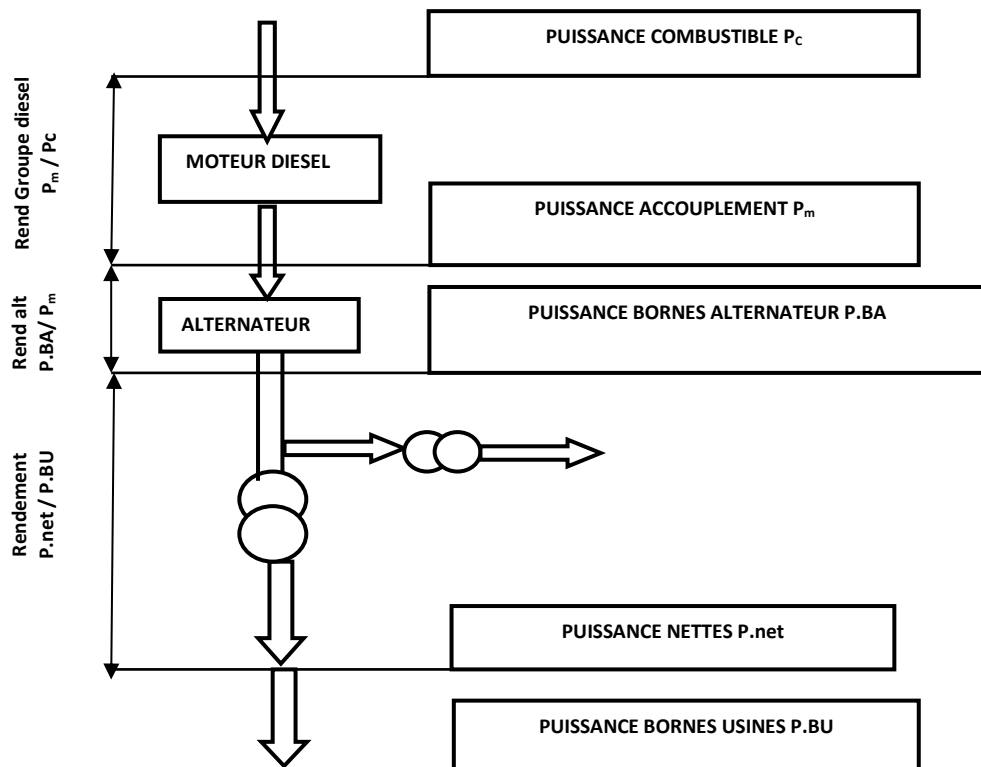


Figure II 7- Bilan énergétique d'une tranche de production diesel [23]

8 - Procédure de vérification des performances de la centrale

La phase de réception d'une installation constitue une étape importante dans la réalisation d'une centrale.

Les procédures de mise en service et de vérification des performances de chaque tranche et de la centrale sont détaillées dans une annexe au cahier des charges de réalisation de ladite centrale

appelée : « garanties et vérifications des garanties ». Ce qui suit n'en est qu'un résumé donné aux fins d'information seulement.

Les procédures de Mise en Service comprennent deux séries d'essais applicables à chaque tranche et à la centrale : les Essais de Démarrage et les Essais d'Achèvement.

8.1 - Les essais de démarrage

Les Essais de Démarrage auront lieu après la fin des travaux de montage, durant les périodes de Mise au point et de Marche Semi-Industrielle. Ces essais comprennent, dans l'ordre qui suit :

- Les Essais Mécaniques (effectués durant la période de Mise au point) consistant à faire fonctionner chaque système séparément puis de façon intégrée.
- Les Essais de Raccordement au réseau (effectués durant la période de Mise au point et de Marche Semi-Industrielle), comprenant les Essais de synchronisation, les Essais à pleine charge et les Essais des protections.
- Les Essais de Fonctionnalité (effectués durant la période de Marche Semi-Industrielle) consistant en une marche continue pendant un certain nombre de jours fixé au contrat.

8.2 - Les essais d'achèvement

Ces essais comprennent :

8.2.1 - Les Essais de Fiabilité

Ces essais sont effectués durant la Marche Semi-Industrielle consistant en une marche continue au régime nominal pendant 10 jours.

8.2.2 - Les Essais de Performance

Les Essais de Performance seront réalisés après les Essais de Démarrage.

Les performances réelles sont mesurées et comparées aux engagements contractuels du constructeur. Les performances des équipements sont relevées et serviront, durant toute la vie de la centrale, de valeurs repères pour identifier les dérives de fonctionnement liées au vieillissement ou à des réglages inadaptés. La surveillance des performances globales de l'installation s'effectue également en comparant les valeurs issues de la mise en service industrielle.

De manière générale, les Essais de Performance doivent suivre les lignes directrices et critères dictés par les normes suivantes :

- ISO 3046 : Moteurs alternatifs à combustion interne – performances.
- ISO 8528 : Groupes électrogènes à courant alternatif entraînés par des moteurs alternatifs à combustion interne.

Les valeurs mesurées pendant les essais de performance (Puissance Électrique Nette Borne Usine et la Consommation Spécifique Nette de chaque Groupe et de la Centrale) seront rectifiées pour tenir compte des différences entre les conditions réelles du site lors des essais et celles indiquées au contrat comme conditions applicables pour les Garanties de Performance.

Les rectifications seront effectuées à l'aide de facteurs de corrections extraits des courbes de correction fournies par le Constructeur, et ce, afin de déterminer un coefficient global de correction.

8.2.3 - La consommation spécifique [26]

La consommation spécifique est la quantité de combustible nécessaire à la production par le groupe diesel d'une quantité d'énergie d'un kWh.

La consommation spécifique du moteur définit la qualité de la transformation de l'énergie au sein du moteur. C'est la quantité du combustible d'un pouvoir calorifique donné qui doit être dépensée pour la production d'une unité d'énergie.

8.2.3.1- Le combustible :

Dans les moteurs Diesels, le combustible est injecté dans l'air préchauffé grâce à la compression dans le cylindre. L'exigence principale que le gazole doit satisfaire est la facilité d'auto inflammation par contact avec l'air comprimé. La durée de temps du moment d'injection de combustible jusqu'à son auto inflammation est nommé délai d'allumage. Le délai dépend de plusieurs facteurs, en particuliers, de la nature de combustible ou de son indice de cétane.

- L'indice de cétane est le pourcentage en volume de cétane dans un combustible de référence qui a le même délai d'allumage que le gazole à éprouver.

L'indice de cétane (IC) pour les moteurs Diesels doit être supérieur à 50.

- Pouvoir calorifique du combustible P_c

On appelle pouvoir calorifique du combustible la quantité de chaleur dégagée par une unité de masse ou de volume de ce dernier par suite de sa combustion complète.

8.2.4 - Les Essais des Émissions atmosphériques

Ces essais sont effectués simultanément aux Essais de Performance pour vérifier la conformité aux valeurs spécifiées dans les normes en vigueur et indiquées dans le cahier des charges.

Les moteurs diesel actuels sont soumis à une réglementation très sévère en ce qui concerne les émissions polluantes. Les législations européenne (Directive 2004/26/EC) et nord-américaine (EPA 40 CFR) spécifient des limites de pollution comparables.

Les valeurs limites des émissions atmosphériques (Hydrocarbures HC, CO, NO_x, poussières PM) à prendre en considération et à respecter par le Constructeur sont celles imposées par le règlement « 40 CFR parts 60, 85 » du 11 juillet 2006 (ou un règlement plus récent si applicable) de l'agence Américaine de Protection de l'Environnement (EPA).

Les émissions de SO₂ doivent être contrôlées par l'emploi d'un combustible approprié (gas-oil à faible teneur en soufre).

Un résumé de ces normes est donné dans le Tableau ci-dessous :

PUISSANCE NETTE MAXIMALE - KW	ANNEE DU MOTEUR	NO _x +HC	HC	NOX	CO	PM
P > 560	2007-2010	6,4	-	-	3,5	0,20
	2011-2014	NA	0,40	0,67	3,5	0,10
	2015 et après	NA	0,19	0,67	3,5	0,03
130 ≤ P ≤ 560	2007-2010	4,0	-	-	3,5	0,20
	2011-2013	NA	0,19	0,40	3,5	0,02
	2014 et après	NA	0,19	0,40	3,5	0,02
75 ≤ P < 130	2008-2011	4,0	-	-	-	0,30
	2012-2013	NA	0,19	0,40	5,0	0,02
	2014 et après	NA	0,19	0,40	5,0	0,02
56 ≤ P < 75	2008-2011	4,7	-	-	-	0,02
	2012-2013	NA	0,19	0,40	5,0	0,02
	2014 et après	NA	0,19	0,40	5,0	0,02

Tableau II 1- Emissions maximales en g/KWh

9 - Conclusion

Dans ce chapitre, différents aspects liés aux centrales de production diesel ont été étudiées à savoir principe de fonctionnement, classification, décomposition, ainsi que les indices de performance.

Parmi ces indices, la consommation du combustible revête un caractère important pour la définition des performances du groupe diesel ainsi que de la centrale du moment qu'il influence directement sur le prix de kWh produit.

Le prochain chapitre étudie en détail cet indice en établissant une fonction donnant la consommation combustible en fonction de la puissance produite et en essayant de minimiser cette consommation pour avoir en sortie un prix du kWh le plus bas.

Chapitre III

Modélisation de la consommation combustible du groupe diesel

1 - Introduction :

La consommation combustible est un indicateur très important pour évaluer les performances du groupe diesel et de la centrale en conséquence, en Algérie La production d'électricité par moyen conventionnel (diesel) connaîtrait une forte croissance allant d'environ 3,7 Mtep en 2008 à 9,4 Mtep en 2030, avec un taux de croissance de 4,92 % et un rythme de croissance annuel de 0,22 %. Les parts de consommations de l'électricité passent de 17 % en 2008 à 20% en 2030 vue sa forte utilisation sans exception dans tous les secteurs et tous les usages surtout dans le résidentiel. [24]

Ce chapitre étudiera la modélisation de la consommation d'un groupe diesel en fonction de la puissance produite en basant sur les données de constructeur.

Cette modélisation servira par la suite pour décider du programme de marche à adopter par l'exploitant de la centrale d'une manière à l'optimiser afin d'avoir le prix du kWh produit le plus bas.

2 - Notions sur la modélisation :

2.1 - Introduction :

Dans l'étude d'un phénomène comportant une ou plusieurs variables d'entrée $X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(k)}$ et une variable de sortie Y, la modélisation a pour but de tenter d'expliquer, par une relation mathématique, la valeur de Y en fonction des variables d'entrée :

$$Y_i = g(X^{(1)} + X^{(2)}, \dots, X^{(k)}) \dots\dots\dots(1)$$

D'où :

- Y_i : variable de sortie
- $X^{(k)}$: Variables d'entrées
- g : La fonction du modèle

Le modèle essaie de refléter le plus fidèlement possible la réalité. Il a pour but de mieux comprendre le phénomène étudié, et aussi de permettre de prédire Y sans devoir nécessairement réaliser des expériences [21].

On distingue deux types de modèles :

- 1- Le **modèle théorique**, ou déterministe, est une équation qui émane souvent de lois physiques, chimiques, ou économiques, et représente le comportement attendu du phénomène ;
- 2- Souvent, il est difficile de développer un modèle théorique car le phénomène étudié est trop complexe. On a alors recours à un **modèle statistique** basé non pas sur une théorie mais sur des données observées.

2.2 - Ajustement du modèle [21] :

Une classe de modèles fréquemment utilisée en expérimentation est celle des modèles polynomiaux du type:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^{(2)} + \dots + \beta_k X_i^{(k)} + \varepsilon_i \dots \dots (2), \quad i = 1 \dots \dots, n.$$

D'où :

- β_k : Vecteur des paramètres du modèle,
- ε_i : Variables aléatoires

Pour ajuster le modèle, on utilise la méthode des moindres carrés : on cherche les estimateurs ($\hat{\beta}_1 \dots \hat{\beta}_p$) qui minimisent la somme des carrés des distances des observations Y_i à la courbe ajustée : on doit minimiser f .

$$f(\beta_1, \dots, \beta_k) = \sum_{i=1}^n \left(Y_i - \beta_1 X_i^{(1)} - \beta_2 X_i^{(2)} - \dots - \beta_k X_i^{(k)} \right)^2 \dots \dots (3)$$

3 - Modélisation de la consommation

3.1 - Principe :

Dans le cadre de l'optimisation des programmes de marche des centrales diesel, nous avons utilisé la consommation en carburant sur différents pourcentages de la puissance des groupe diesel comme étant une caractéristique remarquable afin d'obtenir un modèle de consommation gasoil commun.

Il existe plusieurs modèles de consommation, parmi lesquels :

- **Modèle linéaire** : la consommation en carburant (en Litres/h) est supposée croître linéairement avec la puissance utile demandée par la charge. Cependant, il apparaît que la consommation de carburant, en approchant la puissance nominale du groupe électrogène, augmente plus rapidement que l'approximation linéaire (dégradation du rendement).
- **Modèle polynomial** : un modèle polynomial d'ordre 2 apparaît comme un modèle plus précis pour décrire le comportement du groupe électrogène sur l'ensemble de sa plage de puissance. [20]

La consommation du groupe s'exprime donc de la manière suivante :

$$\text{Consum } GE = \alpha_{GE} \cdot P_{GE}^2 + \beta_{GE} \cdot P_{GE} + \gamma_{GE} \dots \dots (4)$$

Où :

- $\text{Consum } GE$: La consommation en gasoil du Groupe Électrogène diesel en L/h.
- P_{GE} : La puissance délivrée par le Groupe Électrogène diesel (GE).
- α_{GE}, β_{GE} et γ_{GE} : Les coefficients du polynôme de deuxième degré.

3.2 - Gamme des groupes choisie et données constructeur utilisé :

De façon à modéliser la consommation du groupe électrogène en fonction de la puissance électrique qui lui est demandée, nous nous sommes basés sur les données constructrices fournies par la société CATERPILLARD concernant six (06) groupes électrogènes Diesel 50Hz, de puissance nominale allant de (150 à 400 kVA). Les données de consommation fournies sont exprimées en fonction du pourcentage de la puissance nominale du groupe électrogène (50%, 75%, 100% et 110%).

A partir de ces quatre points, un modèle polynomial de consommation pour chaque groupe électrogène considéré a pu être exprimé. De façon à obtenir un modèle générique intégrant la puissance nominale, l'évolution des paramètres en fonction de la puissance apparente du groupe électrogène a été étudiée.

Ces données sont récapitulées dans le tableau ci-après :

Puissance Groupe (KVA)	Consommation L/h A 50%	Consommation L/h A 75%	Consommation L/h A 100%	Consommation L/h A 110%
150	21,1	31,2	40,9	44,7
180	20,7	30,5	39,7	43,5
200	23,4	34,7	45,4	49,5
250	31,7	42,1	53,3	58,1
350	43,6	60,8	76,3	84,4
400	48,3	67,3	85,5	94,2

Tableau III 1- Les données constructeur de consommation des groupes électrogène

3.3 - Modélisation

3.3.1 - Obtention des Paramètres du modèle de consommation du groupe diesel

$$\alpha_{GE} \beta_{GE} \gamma_{GE}:$$

En utilisant une fonction de *MATLAB* nous avons obtenu les coefficients $\alpha_{GE} \beta_{GE} \gamma_{GE}$ d'un polynôme de deuxième degré qui représente la variation de la consommation du carburant en fonction du pourcentage de la puissance délivré pour chaque groupe électrogène :

Puissance nominal (Kva)	α_{GE}	β_{GE}	γ_{GE}
150	-0,0003	0,4411	-0,2044
180	-0,0003	0,4259	0,1600
200	-0,0005	0,5131	-1,0358
250	0,0007	0,3273	13,5867
350	0,0002	0,6424	11,1949
400	0,0004	0,6908	12,8091

Tableau III 2 Les valeurs de $\alpha_{GE} \beta_{GE} \gamma_{GE}$ pour les différentes puissances nominales.

3.3.2 - Diagramme de variation de α_{GE} β_{GE} γ_{GE} en fonction de la puissance nominale de chaque groupe :

En examinant la variation des paramètres du modèle de consommation du groupe diesel α_{GE} β_{GE} et γ_{GE} en fonction de la puissance nominale, on peut tracer les graphes suivants :

Variation de α_{GE} :

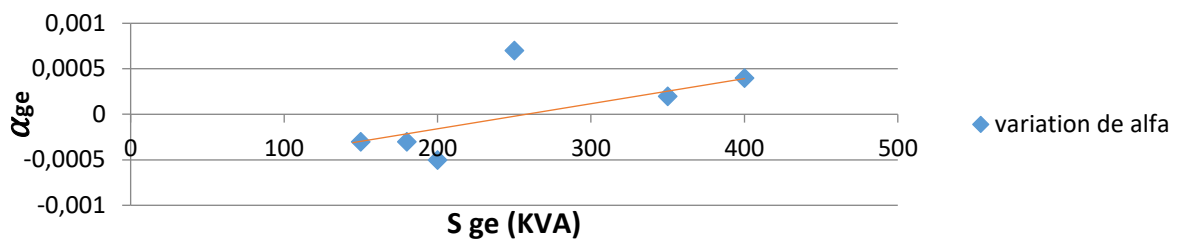


Figure III 1- variation de α_{GE} en fonction des puissances nominales des groupes

Variation de β_{GE} :

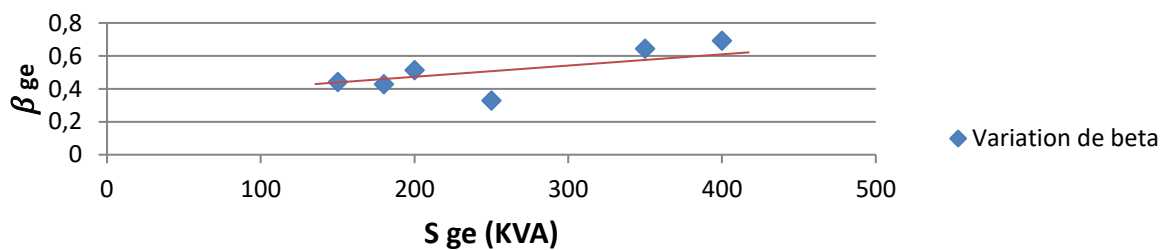


Figure III 2- variation de β_{GE} en fonction des puissances nominales des groupes

Variation de γ_{GE} :

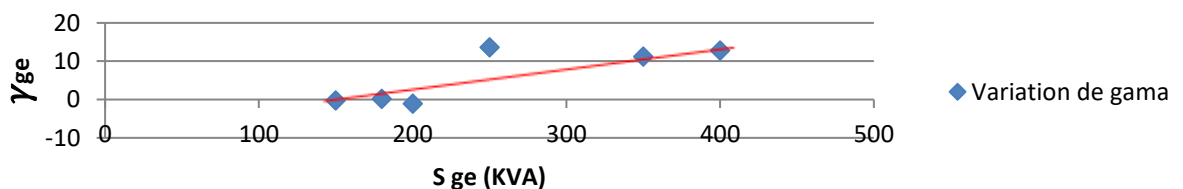


Figure III 3- variation de γ_{GE} en fonction des puissances nominales des groupes

Nous remarquons donc que les trois paramètres varient linéairement sur la plage des puissances nominales.

Nous procédons par la suite à l'étude de cette variation afin de trouver une corrélation qui donne chacun des paramètres de consommation en fonction de la puissance nominale du groupe électrogène.

3.3.3 - Calcule des coefficients de variation des paramètres α_{GE} β_{GE} et γ_{GE} :

Pour présenter la variation de chacun des paramètres du modèle de la consommation en fonction de la puissance nominale du groupe, des modèles d'évolution linéaires ont été retenus.

D'où :

$$\alpha_{GE} = a_{GE} \cdot S_{GE} + b_{GE} \dots \dots \dots (5)$$

$$\beta_{GE} = c_{GE} \cdot S_{GE} + d_{GE} \dots \dots \dots (6)$$

$$\gamma_{GE} = e_{GE} \cdot S_{GE} + f_{GE} \dots \dots \dots (7)$$

Nous avons utilisé la fonction MATLAB « *Polyfit* » pour obtenir les coefficients des polynômes de premier degré ci-dessus.

Les résultats obtenus sont :

Paramètre	Valeur	Unité
α_{GE}	$0,0031 \cdot 10^{-3}$	[SI]
b_{GE}	$-0,7611 \cdot 10^{-3}$	
c_{GE}	0,0011	
d_{GE}	0,2347	
e_{GE}	0,0587	
f_{GE}	-8,8783	

Tableau III 3- Paramètres du modèle polynomial de la consommation des groupes électrogènes Diesel

D'où les fonctions suivantes :

$$\alpha_{GE} = 0,0031 \cdot 10^{-3} \cdot S_{GE} - 0,7611 \cdot 10^{-3} \dots \dots \dots (8)$$

$$\beta_{GE} = 0,0011 \cdot S_{GE} - 0,2347 \dots \dots \dots (9)$$

$$\gamma_{GE} = 0,0587 \cdot S_{GE} - 8,8783 \dots \dots \dots (10)$$

On remplace les équations (8), (9) et (10) dans l'équation (4) et on obtiendra le modèle (11) :

$$\begin{aligned} \text{Conso}(L \setminus h) = & (0,0031 \cdot 10^{-3} \cdot S_{ge} - 0,7611 \cdot 10^{-3}) P_{ge}^2 + (0,0011 \cdot S_{ge} + 0,2347) P_{ge} \\ & + (0,0587 \cdot S_{ge} - 8,8783) \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

4 - Résultats de la modélisation :

A partir de modèle polynomial obtenu dans le paragraphe 3.3., la consommation d'un groupe électrogène peut être évaluée sur l'ensemble de sa plage de puissance, et la figure III 4 suivante, représente l'évolution de la consommation en litres par heure sur l'ensemble de la plage de puissance pour les six (06) groupes électrogènes étudiés.

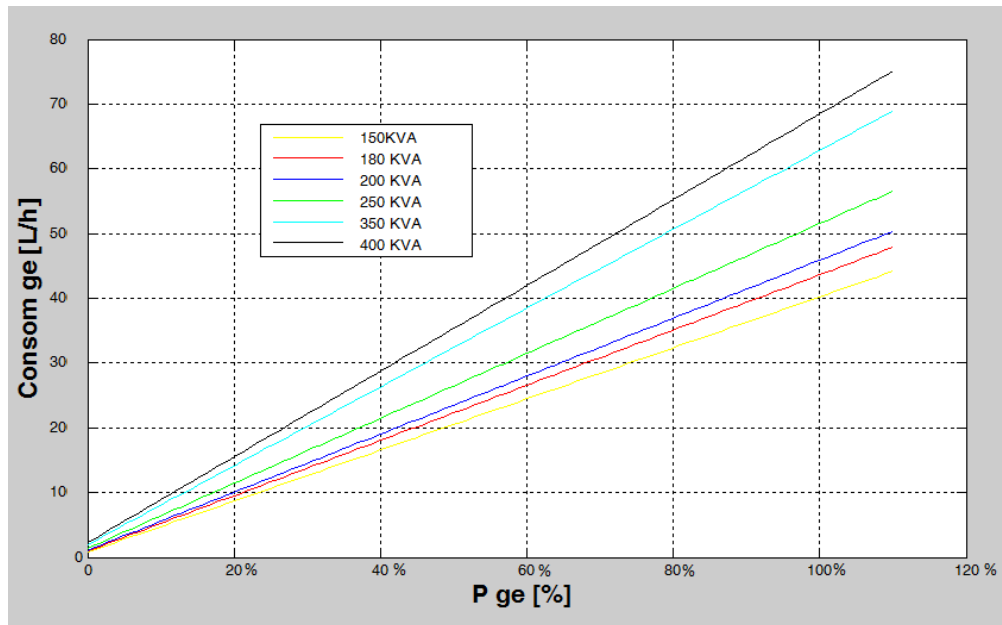


Figure III 4- Les courbes de consommation de chaque groupe électrogène

Donc, pour obtenir la consommation en L/h d'un groupe électrogène de puissance nominale S_{GE} et d'une puissance à la sortie $P_{GE}\%$, on introduit la puissance nominale S_{GE} du groupe électrogène ce qui donne les paramètres α_{GE} , β_{GE} et γ_{GE} qu'on les utilise par la suite dans le modèle de consommation pour déduire la consommation en fonction de la puissance délivrée en pourcentage.

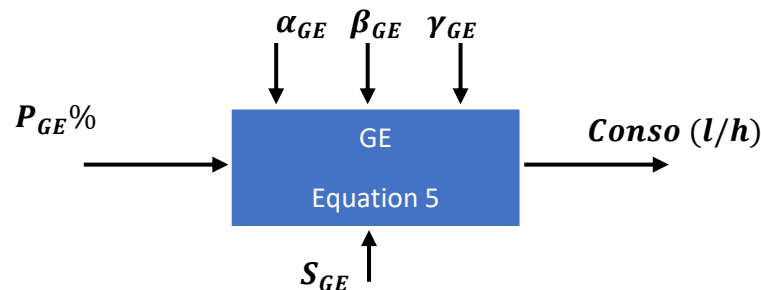


Figure III 5- Modélisation de la consommation du groupe électrogène

5 - Interprétation des résultats

En utilisant le modèle développé ci-dessus, on obtient les valeurs de consommation combustible du groupe diesel comme suit :

Puissance Groupe (KVA)	Consommation L/h à 50%	Consommation L/h à 75%	Consommation L/h à 100%	Consommation L/h à 110%
150	19,17	28,24	36,94	40,31
180	22,82	33,00	42,93	46,83
200	25,24	36,17	46,92	51,17
250	31,32	44,10	56,91	62,03
350	43,46	59,97	76,88	83,75
400	49,53	67,90	86,86	94,61

Tableau III 4- Les valeurs de la consommation combustible calculées par le modèle

Pour comparer les valeurs obtenues par le modèle et celles affichées dans le tableau III 1, nous calculons les écarts entre les valeurs de consommation pour chaque groupe et sur les différents paliers de puissance (50% 75% 100% et 110%).

Puissance groupe	50%	75%	100%	110%	Total
150	1,93	2,96	3,96	4,39	13,24
180	-2,12	-2,50	-3,23	-3,33	-11,18
200	-1,84	-1,47	-1,52	-1,67	-6,5
250	0,38	-2,00	-3,61	-3,93	-9,16
350	0,14	0,83	-0,58	0,65	1,04
400	-1,23	-0,60	-1,36	-0,41	-3,6
Total Général					-16,16

Tableau III 5- Les écarts entre les valeurs données par le constructeur et celles calculées par le modèle en (L/h)

On obtient ainsi, les résultats suivants :

- ✓ La somme des écarts positifs 15,244535
- ✓ La somme des écarts négatifs -31,399055
- ✓ La différence -16,15452

Nous avons obtenu des résultats satisfaisants, comme le montre le tableau III 4, avec une différence entre les écarts positifs et négatifs qui est de l'ordre de 16 L /h.

Nous remarquons aussi que, plus que on se rapproche des puissances nominales des groupes, plus les écarts diminuent.

6 - Conclusion :

L'objectif principal initial de ce travail était de contribuer au développement d'un modèle qui nous aide à améliorer le programme de marche dans le but de minimiser la consommation en gasoil des centrales des sites isolés, donc réduire le prix de kilowattheure ainsi que minimiser les effets nuisibles dans les sites isolés de l'Algérie.

Donc Le modèle obtenu sert à calculer la consommation de chacun des unités de production d'une centrale électrique diesel et d'en déduire la consommation globale de la centrale.

En fait ce modèle peut être utilisé pour choisir un programme de marche des groupes électrogène optimale.

Ce modèle basée sur des données de consommation donné par le constructeur va nous permis de mettre en évidence de façon relativement simple l'impact considérable du programme de marche de la centrale sur la consommation du carburant.

Chapitre IV

**Optimisation de programme de marche des groupes
Diesels**

1 - Introduction

Les centrales de production implantées dans les réseaux du grand sud algérien comportent un nombre plus ou moins important d'unités de production diesel et/ou Turbines à gaz.

Le but recherché par l'exploitation d'une centrale de production est d'assurer la continuité et la qualité de l'approvisionnement en électricité tout en réduisant le prix du kWh produit.

Le modèle de consommation du combustible du groupe diesel établi dans le chapitre précédent sera utilisé ci-après afin de minimiser la consommation combustible d'une centrale constituée de Six (06) unités de production.

Le présent chapitre mettra en évidence l'importance de tenir compte du modèle de consommation de chacune des unités de production pour établir un programme de marche permettant en résultat d'avoir la moindre quantité de combustible consommée.

2 - Explication du cas d'étude :

Notre cas étudié ci-dessous consiste à une centrale comportant les six (06) groupes diesel présentés dans le chapitre précédent.

Pour ce cas d'étude, on évaluera la consommation combustible dans deux cas de figure : avec et sans établissement d'un programme de marche.

3 - Evaluation de la consommation combustible de la centrale

3.1 - Cas de l'établissement d'un programme de marche :

Le programme de marche est établi à l'aide d'un algorithme (figure IV 1) donnant pour chaque pas de la courbe de charge la combinaison Y optimale des unités de production.

Le principe de cet algorithme est de faire fonctionner chaque groupe dans la plage de fonctionnement optimale à savoir 80 à 90 % de sa puissance nominale

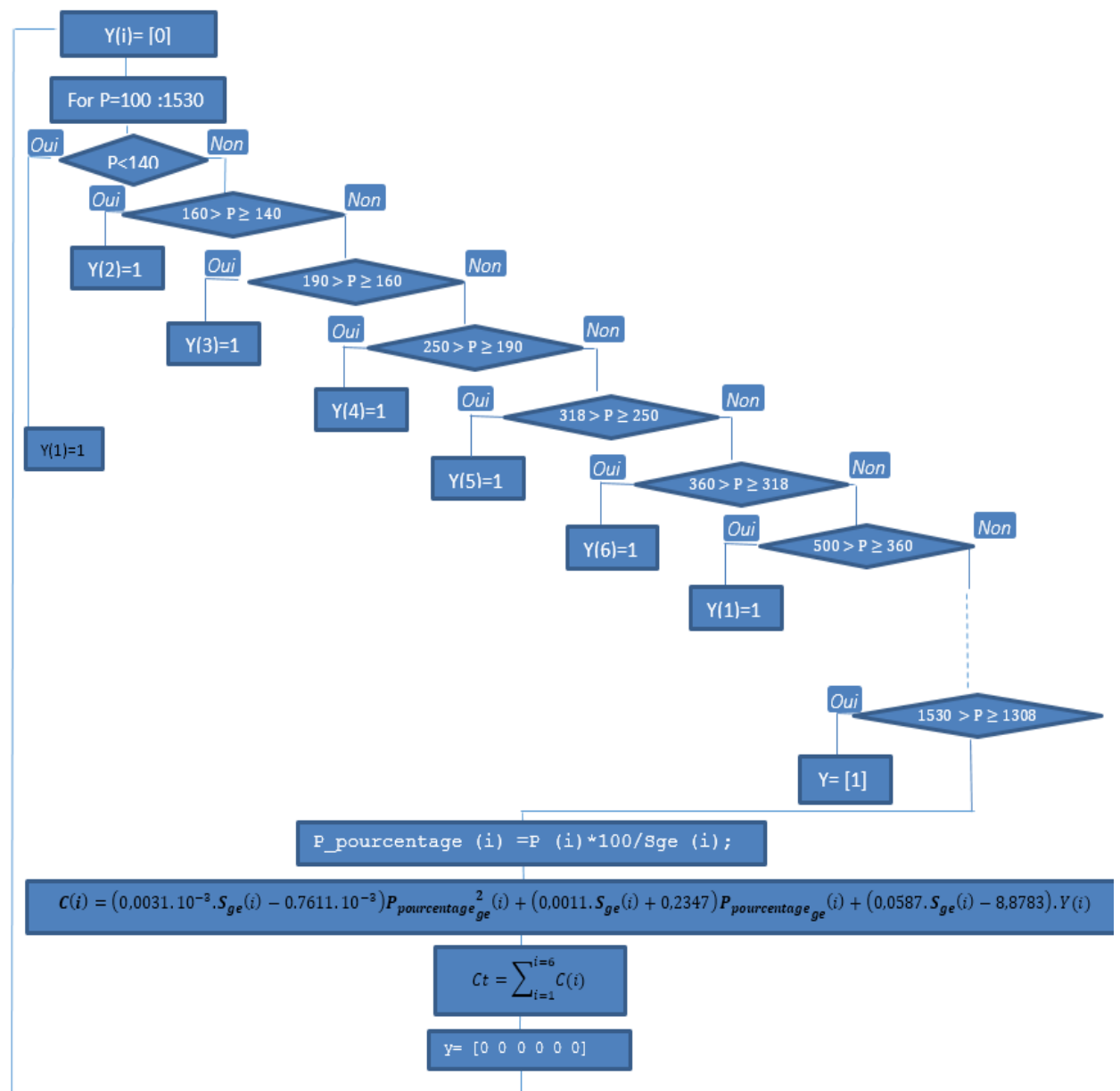


Figure IV 1- structure de l’algorithme de programme de marche

D’où :

- Y : vecteur combinaison qui représente les groupes en marche par 1 et celle en arrêt par 0.
- P : Puissance demandé (charge).
- $P_{pourcentage}(i)$: Puissance demandé par chaque groupe.
- $C(i)$: Consommation en gasoil par chaque groupe (i).
- Ct : Consommation totale en gasoil.

En utilisant le modèle de consommation, on obtient la courbe ci-dessous donnant la consommation globale en fonction de la puissance délivrée.

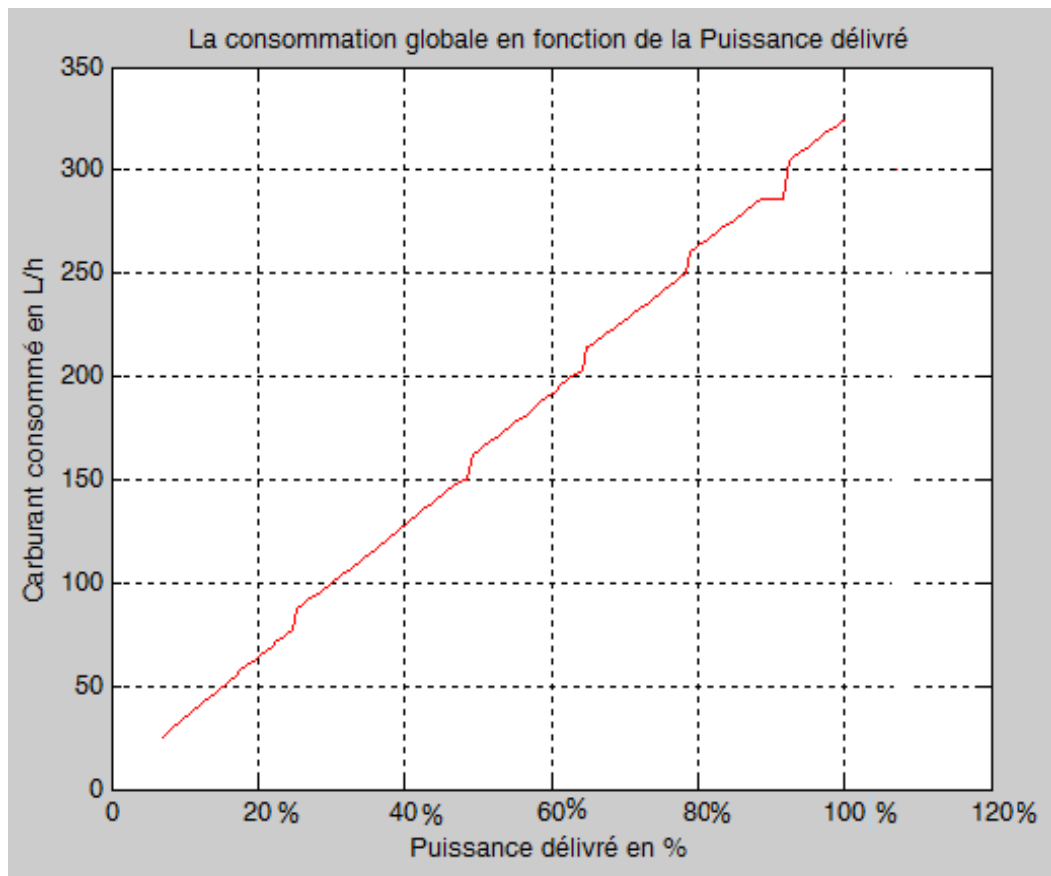


Figure IV 2- La consommation de la centrale en utilisant un programme de marche

D'où les résultats de répartition de charge sur les unités production (en %) et la consommation globale donnés dans le tableau suivant :

Combinaison							P. (%)	P. (KVA)	Ct (L/h)	Pg1	Pg2	Pg3	Pg4	Pg5	Pg6
1	0	0	0	0	0	0	6,54	100,00	25,26	66,67	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	9,15	140,00	34,11	0	77,78	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	10,46	160,00	38,33	0	0	80,00	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	12,42	190,00	44,61	0	0	0	76,00	0	0
0	0	0	0	1	0	0	16,34	250,00	57,58	0	0	0	0	71,43	0
0	0	0	0	0	1	1	20,92	320,00	71,64	0	0	0	0	0	80,00
1	0	0	0	0	1	1	23,53	360,00	87,81	93,33	0	0	0	0	55,00
1	0	0	0	0	1	1	27,45	420,00	98,83	93,33	0	0	0	0	70,00
0	0	1	0	0	1	1	32,68	500,00	114,55	0	0	95,00	0	0	77,50
0	0	0	1	0	1	1	35,95	550,00	124,80	0	0	0	100,00	0	75,00
0	0	0	0	1	1	1	39,22	600,00	135,19	0	0	0	0	90,86	70,50
1	0	0	0	1	1	1	45,75	700,00	162,47	93,33	0	0	0	90,86	60,50
0	0	1	0	1	1	1	53,59	820,00	185,57	0	0	95,00	0	90,86	78,00
0	0	0	1	1	1	1	56,86	870,00	195,82	0	0	0	100,00	90,86	75,50
1	0	0	1	1	1	1	60,13	920,00	213,91	93,33	0	0	100,00	90,86	53,00
0	0	1	1	1	1	1	69,93	1070,00	242,48	0	0	95,00	100,00	90,86	78,00
1	0	1	1	1	1	1	73,20	1120,00	260,51	93,33	0	95,00	100,00	90,86	55,50
1	0	1	1	1	1	1	84,31	1290,00	286,19	93,33	0	95,00	100,00	90,86	90,00
1	1	1	1	1	1	1	85,62	1310,00	304,54	93,33	88,89	95,00	100,00	90,86	63,00
1	1	1	1	1	1	1	99,35	1520,00	324,74	93,33	88,89	95,00	100,00	90,86	90,00

Tableau IV 1- calcul de la consommation en gasoil de la centrale (cas avec programme de marche)

D'où :

- Combinaison : état de chaque groupe diesel de la centrale (0 : en arrêt, 1 : en marche)
- P. (%) : le pourcentage de la puissance demandé.
- P. (KVA) : La puissance demandé en (KVA) de l'ensemble des groupes en fonction.
- Ct. (L/h) : La consommation totale de la centrale en (L/h).
- Pg_n : La Puissance demandé par le groupe (g) numéro (n) en (%).

3.2 - Cas sans l'établissement d'un programme de marche

Pour ce cas, il n'y a pas un programme de marche à suivre et les groupes fonctionneront au même temps et la puissance demandée sera, pour chaque pas de la courbe de charge, répartie sur l'ensemble des groupes en marche.

Pour ce cas, Ci-après la courbe donnant la consommation globale en fonction de la puissance délivrée.

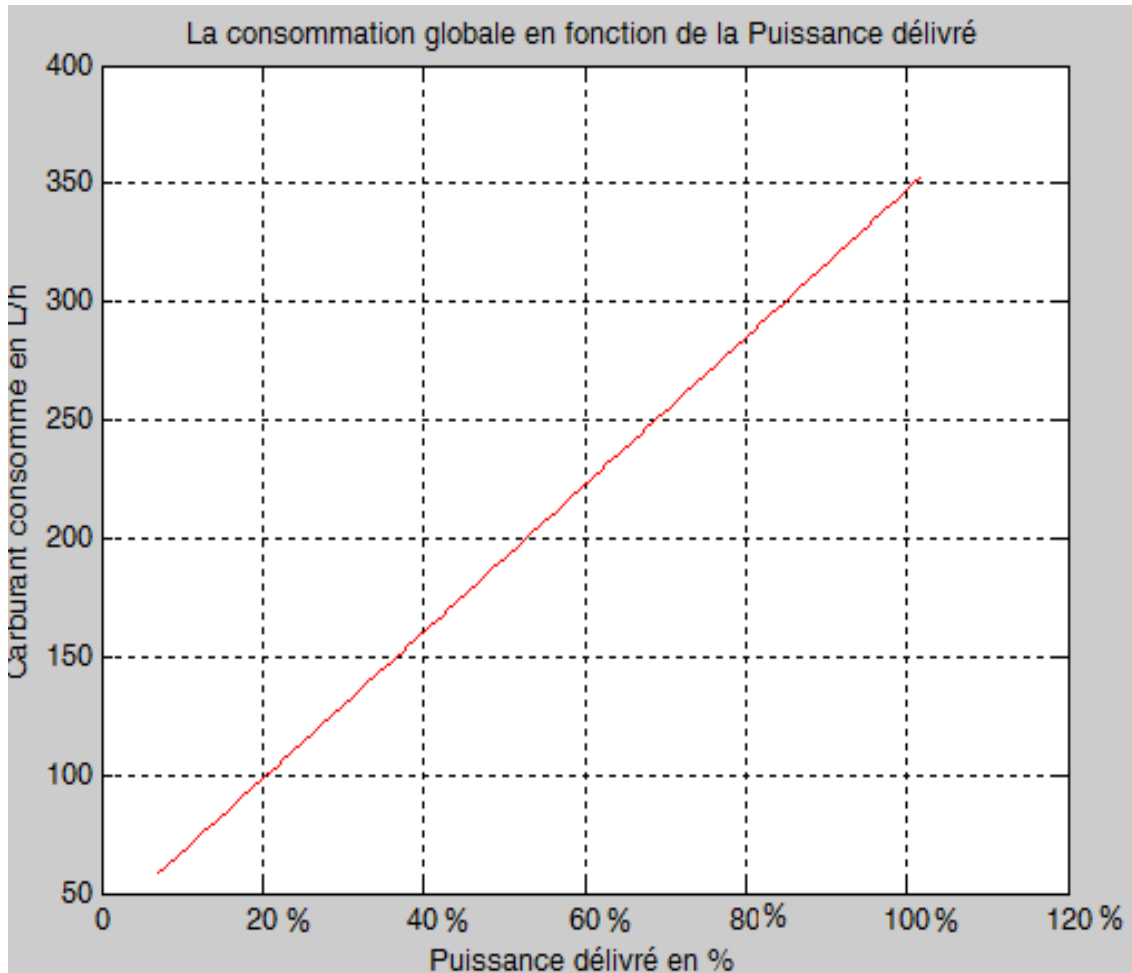


Figure IV 3- La consommation de la centrale sans utilisation d'un programme de marche

Dans ce cas, les résultats de la consommation gasoil totale de la centrale ainsi que la répartition de charge sont donnés comme suit :

Combinaison						P. (%)	P. (KVA)	Ct (L/h)	Pg1	Pg2	Pg3	Pg4	Pg5	Pg6
1	1	1	1	1	1	6,54	100	58,35	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05
1	1	1	1	1	1	13,07	200	80,18	14,10	14,10	14,10	14,10	14,10	14,10
1	1	1	1	1	1	19,61	300	102,02	21,16	21,16	21,16	21,16	21,16	21,16
1	1	1	1	1	1	26,14	400	123,88	28,21	28,21	28,21	28,21	28,21	28,21
1	1	1	1	1	1	32,68	500	145,76	35,26	35,26	35,26	35,26	35,26	35,26
1	1	1	1	1	1	39,22	600	167,66	42,31	42,31	42,31	42,31	42,31	42,31
1	1	1	1	1	1	45,75	700	189,57	49,37	49,37	49,37	49,37	49,37	49,37
1	1	1	1	1	1	52,29	800	211,50	56,42	56,42	56,42	56,42	56,42	56,42
1	1	1	1	1	1	58,82	900	233,45	63,47	63,47	63,47	63,47	63,47	63,47
1	1	1	1	1	1	65,36	1000	255,42	70,52	70,52	70,52	70,52	70,52	70,52
1	1	1	1	1	1	71,90	1100	277,40	77,57	77,57	77,57	77,57	77,57	77,57
1	1	1	1	1	1	78,43	1200	299,40	84,63	84,63	84,63	84,63	84,63	84,63
1	1	1	1	1	1	84,97	1300	321,42	91,68	91,68	91,68	91,68	91,68	91,68
1	1	1	1	1	1	91,50	1400	343,46	98,73	98,73	98,73	98,73	98,73	98,73
1	1	1	1	1	1	98,04	1500	365,51	105,78	105,78	105,78	105,78	105,78	105,78
1	1	1	1	1	1	98,69	1510	367,72	106,49	106,49	106,49	106,49	106,49	106,49
1	1	1	1	1	1	99,35	1520	369,92	107,19	107,19	107,19	107,19	107,19	107,19

Tableau IV 2- calcule de la consommation en gasoil de la centrale (cas sans programme de marche)

D'où :

- Combinaison : état de chaque groupe diesel de la centrale (0 : en arrêt, 1 : en marche)
- P. (%) : le pourcentage de la puissance demandé.
- P. (KVA) : La puissance demandé en (KVA) de l'ensemble des groupes en fonction.
- Ct. (L/h) : La consommation totale de la centrale en (L/h).
- Pg_n : La Puissance demandé par le groupe (g) numéro (n) en (%).

4 - Interprétation des résultats :

En analysant les résultats obtenus dans les deux cas, nous remarquons que la consommation de gasoil est moins élevée lorsqu'on fait fonctionner les groupes électrogènes avec un programme de marche par rapport au cas sans programme de marche pour la même puissance débitée. La figure IV.4. Ci-dessous montre la comparaison des valeurs.

Aussi, les résultats obtenus montrent l'impact du programme de marche sur le facteur de charge des groupes qui est un indice important pour la réduction de la consommation du gasoil ainsi que pour le maintien en bon état des moyens de production.

Consommation en carburant de la centrale en fonction de la charge

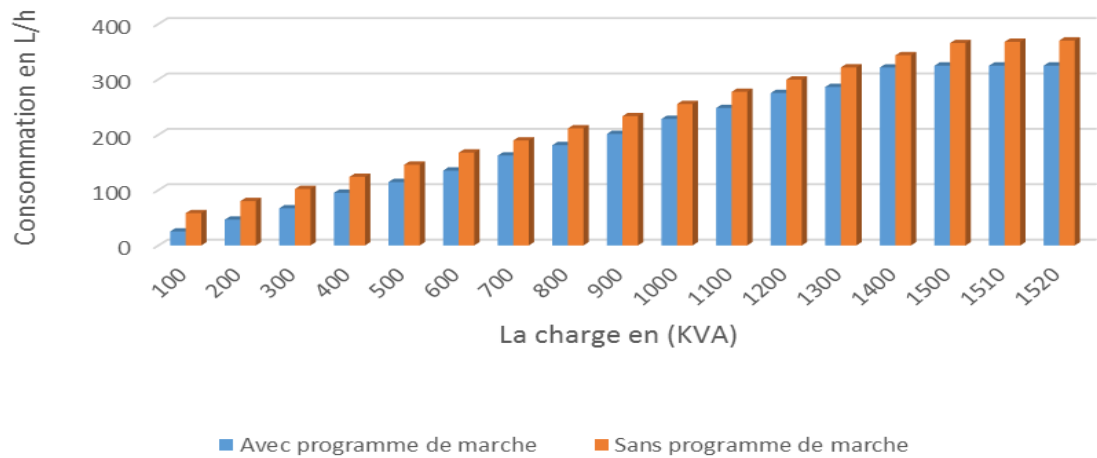


Figure IV 4- La consommation de la centrale sans et avec programme de marche

5 - Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré une application de la modélisation de la consommation combustible du groupe diesel établi dans le chapitre précédent.

En effet, en utilisant cette modélisation, on a essayé de mettre en évidence l'impact considérable du programme de marche de la centrale sur la consommation du carburant et le facteur de charge des groupes. Les résultats ont confirmé l'intérêt de fixer un programme de marche optimisé des unités de production afin de réduire considérablement la quantité de gasoil consommée et le prix du kWh en conséquent.

Conclusion Générale

Le contexte énergétique mondial actuel nous impose de réduire nos consommations en sources d'énergie fossiles et favoriser le recours aux énergies nouvelles et renouvelables.

Dans cette optique, la problématique principale traitée dans le cadre de ce mémoire est comment maîtriser et optimiser la consommation en gasoil des centrales électrique diesel des réseaux du grand sud afin de préserver les ressources naturelles et de protéger l'environnement.

Pour ce faire, nous avons commencé notre travail par un état de l'art sur l'énergie électrique et les moyens de sa production ainsi que les perspectives de l'évolution de la demande en cette source d'énergie vitale dans le monde et en Algérie.

Puis, une modélisation de la consommation du groupe diesel sur la base des données constructeur a été établie ; Et, en se basant sur ce modèle, une proposition d'algorithme permettant d'établir un programme de marche des unités de production d'une centrale diesel a été présentée et élaborée sous MATLAB.

En examinant les résultats issus de l'application du programme de marche, nous avons pu constater le net avantage de l'adoption du programme de marche pour la réduction de la quantité du gasoil consommée et l'amélioration des conditions de fonctionnement des groupes diesel.

A l'issu de ce travail, des perspectives peuvent être dégagées comme suite et amélioration à notre travail de mémoire à savoir :

- ✓ L'utilisation des données des unités de production existant actuellement dans le parc de production diesel de SKTM ;
- ✓ L'examen du cas de présence d'une autre source de production renouvelables tel que le PV et l'éolien ;
- ✓ L'exploration d'autres sorts d'algorithme d'optimisation de programme de marche qui tient compte des contraintes et des coûts tels que ceux liés à l'allumage et à l'extinction des unités de production.

Bibliographie

- Ouvrage de « *Le Trésor, dictionnaire des sciences* » © Flammarion 1997 », 1 Avril 1998. Par Equipe La main à la pâte. (<https://www.fondation-lamap.org/fr/page/12064/histoire-de-lelectricite>)
- [1] Gérard Borvon : « *histoire de l'électricité De l'ambre à l'électron* » 1^{ère} édition | septembre 2009.
- [2] Observ'ER « *La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde* », Quinzième inventaire |Édition 2013.
- [3] Une contribution de l'Institut Énergie et Développement au débat public sur l'énergie « *L'avenir de la production D'électricité à basse de Combustibles fossiles* », | Février 2016.
- [4] Dossier presse, « *Rapport d'activité et comptes de gestion consolidée du groupe Sonelgaz 2009* », Conférence de presse du 21 juin 2010.
- [5] Rapport d'activités et comptes sociaux consolidés Sonelgaz 2016
- [6] Rassemblons nos énergies « *Les moyens de production d'énergie électrique* »,|Mai 2014.
- [7] Commission européenne, « *Technology Map of the European Strategic Energy Technology Plan* » | 2011.
- [8] NREL, « *Cost and Performance Assumptions for Modeling Electricity Generation Technologies* » | 2010. Et EDF, « *Les TAC, une production de pointe* », | 2012.
- [9] J'apprends l'énergie (<http://www.japprends-lenergie.fr/ressources/wiki-energie>)
- [10] O. FEDDAOUI, « *Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Énergies Renouvelables* », Thèse de Magistère, Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras|2013-2014.
- [11] La grenelle de la mer, « *Le Livre Bleu des engagements du Grenelle de la Mer* », | Année 2009.
- [12] T. Zhou, « *Commande et Supervision Énergétique d'un Générateur Hybride Actif Éolien incluant du Stockage sous forme d'Hydrogène et des Super-Condensateurs pour l'Intégration dans le Système Électrique d'un Micro Réseau* », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, | 2009.
- [13] S. Haffen, « *Caractéristiques Géothermiques du Réservoir Gréseux du Buntsandstein d'Alsace* », Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, | Septembre 2012.
- [14] M. Munasinghe, « *Rural electrification in the Third World* », Power Engineering Journal [see also Power Engineer], vol. 4, pp. 189-202, 1990.
- [15]

- [16] Maximo Torero, « *L'impact de l'électrification rurale : enjeux et perspectives* », Revue d'économie du développement | 2015/3 (Vol. 23), p. 55-83.
- [17] Site officiel de SKTM.Spa, « <http://www.sktm.dz/?page=article&id=11> », avec enrichissement.
- [18] IFP & CEA, « *Panorama 2010 - Quelles ressources en combustibles nucléaires* », |2010.
- [19] Document Sonelgaz, « *Prévision de la demande du Système électrique national Période 2014-2030* », Juin 2014.
- [20] Yaël Thiaux. « *Optimisation des profils de consommation pour minimiser les couts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides* » – *Evaluation de la technologie Li-ion. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2010.*
- [21] Cours sur <http://www.wikistat.fr> « *Introduction aux modèle linéaire* »
- [22] Mr MAAMMEUR Hocine, « *Simulation et dimensionnement d'une minicentrale électrique multi-source alimentant des fermes agricoles* » Mémoire Magister, Université Hassiba Benbouali Chlef, Décembre 2011.
- [23] Document Sonelgaz sur les centrales Diesels
- [24] Melle CHABANI Zeyneb, « *La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030* » (Mémoire de Magister) UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES
- [25] Robert Bosch GmbH; « *Technique d'injection diesel* » Édition : 1^{ère} édition (1 septembre 2005)
- [26] HASSEYE Badou Djahara ; « *Diagnostic du fonctionnement de la centrale de Goudel* » Mémoire pour l'obtention du master d'ingénierie en sciences de l'eau et de l'environnement option : génie énergétique / Octobre 2013.

Résumé

De nos jours, l'électricité est une source d'énergie vitale et indispensable pour les activités de l'être humain, et il y a tendance à diversifier ses moyens de production entre ceux conventionnels et renouvelables.

Parmi les moyens de production conventionnels existant, les centrales basées sur des groupes électrogènes diesel qui sont largement utilisées pour l'alimentation des petites communautés dans les régions éloignées et isolées.

Dans l'objectif de mieux maîtriser la consommation en ressources fossiles de ces centrales électrique, le travail mené dans le cadre de ce mémoire a concerné l'élaboration d'un modèle de consommation en carburant des groupes diesels, puis son utilisation dans un algorithme établi sous logiciel MATLAB pour montrer l'importance de faire fonctionner les unités de production selon un programme de marche bien déterminé.

Les résultats obtenus ont confirmé l'utilité de faire fonctionner les groupes suivant un programme de marche pour réduire la quantité de gasoil consommée et pour améliorer les facteurs de charge des groupes diesels toute en assurant la qualité et la continuité d'approvisionnement en électricité exigées.

Mots clé

Groupe Electrogène Diesel, Consommation combustible, Programme de marche, Réseaux isolés, Optimisation, Modélisation, Production de l'énergie électrique

Abstract

Nowadays, electricity is a vital and indispensable source of energy for human activities, and there is a tendency to diversify its power production means between conventional and renewable ones.

Among the existing conventional power means of production are diesel-based power stations that are widely used for powering small communities in remote and isolated areas.

In order to better control the fossil fuel consumption of these power plants, the work carried out as part of this thesis focused on the development of a diesel fuel consumption model, then its use in an algorithm under MATLAB software to show the importance of running the production units according to a well-defined walking program.

The results obtained confirmed the utility of operating the groups following a walking program to reduce the amount of diesel consumed and to improve the load factors of the diesel generators while ensuring the required quality and continuity of electricity supply.

Keywords

Diesel generator, Fuel consumption, Walking program, Insulated electrical networks, Optimization, Modeling, Electric power generation

ملخص

في الوقت الحاضر، تعد الكهرباء مصدرًا حيويًا للطاقة لا غنى عنه للأنشطة البشرية، وهناك اتجاه لتنوع وسائل إنتاجها بين الوسائل التقليدية والمتجددة. ومن بين وسائل الإنتاج التقليدية الحالية، استخدام محطات الطاقة التي تعتمد على مولدات الديزل من أجل امدادات الكهرباء خاصة للمجتمعات الصغيرة في المناطق النائية والمعزولة.

في إطار التحكم بشكل أفضل في استهلاك الوقود الأحفوري لهذه المحطات الكهربائية، فإن العمل المنجز في هذه المذكرة يتعلق بتطوير نموذج استهلاك الوقود لمولدات الديزل من أجل إنتاج الكهرباء، ثم استخدامه في خوارزمية أنشأت تحت منصة MATLAB لإظهار أهمية تشغيل وحدات الإنتاج وفق برنامج تشغيل محدد مسبقًا.

وأكدت النتائج التي تم الحصول عليها أهمية تشغيل مولدات الديزل وفق برنامج تشغيل محدد مسبقًا وهذا من أجل تقليل كمية وقود الديزل المستهلك ولتحسين عوامل الحمولة لوحدات الإنتاج الديزل مع ضمان الجودة المطلوبة وكذا استمرارية إمدادات الكهرباء.

كلمات البحث

مولدات الديزل، استهلاك الوقود، برنامج تشغيل، الشبكات الكهربائية المعزولة، التحسين، نموذج الاستهلاك، توليد الطاقة الكهربائية.