

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU

Faculté de génie de la construction

Département de génie mécanique



## **Mémoire de Fin d'Études**

*En vue de l'obtention du diplôme  
De master académique en génie mécanique  
Option énergétique*

*Présentée par :*

*Ghiles CHÉMROUK*

*Thème*

**Optimisation des parcs de production d'énergie électrique au  
niveau des réseaux isolés du sud : cas de l'entreprise  
SONELGAZ- Algérie**

Devant le jury d'examen composé de :

Mr. FAROUK Mohamed Président  
Mr. BELKADI Arab Encadreur  
Mr. BENALIA Karim Co-encadreur  
Mme. HADOUCHE Nawal Examinatrice

*Promotion 2016/2017*

## *Remerciements*

Je remercie le bon dieu de m'avoir aidé à arriver au terme de ce travail. Je remercie aussi ma famille qui m'a soutenue tout au long de mon parcours en mettant tous les moyens pour ma réussite.

Je tiens bien sûr à remercier mes deux encadreur de mémoire de fin d'études, BENALIA Karim et BELKADI Arab. Je leur suis infiniment reconnaissant de m'avoir fait confiance dès le début de ce travail, de m'avoir soumis des sujets passionnants, et de m'avoir encouragé tout au long de cette aventure. La qualité ainsi que la complémentarité de leur encadrement ont fait de ce travail un véritable apprentissage par la recherche. Merci pour votre disponibilité, votre patience et votre indulgence face à mes questions parfois idiotes, mes hésitations et mes doutes (parfois) existentiels.

Je suis très heureux que Mr. FAROUK MOHAMED et Mme. HADOUCHE Nawal aient accepté de faire partie de mon jury. Leurs travaux respectifs m'ont beaucoup influencé et je suis donc très honoré de leur présence.

Je profite aussi de l'occasion pour remercier tous les professeurs que j'ai pu avoir dans ma scolarité, comme je tiens également à remercier le personnel de la bibliothèque, mes amis, camarades de la promotion, ainsi que tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près.

## *Résumé*

On s'intéresse dans ce travail à l'étude du problème d'optimisation des parcs de production d'énergie électrique au niveau des réseaux isolés du sud au sein de l'entreprise SONELGEZ.

SONELGAZ produit et transporte l'énergie électrique vers ses clients dans les localités isolés du sud de l'Algérie à partir des centrales actuellement installées. Pour cela la DGDS (Direction Général du Développement et de la Stratégie) nous a proposé ce sujet.

Le sujet consiste à déterminer le meilleur parc de production d'Electricité ciblé à long terme sur un horizon de 10 a 15 ans pour assurer l'alimentation en énergie électrique des localités isolés du sud en tenant compte de l'évolution prévisionnelle de la demande.

Ce travail permet à SONELGAZ d'avoir une méthode efficace et un logiciel puissant pour définir le meilleur parc possible qui va satisfaire la demande, sans cesse en augmentation et qui va répondre aux exigences des décideurs, de simuler le fonctionnement d'une centrale pour n'importe quelle demande, et donner la meilleure façon de faire marcher les générateurs en minimisant leurs coûts de fonctionnement (en minimisant leur consommation en combustible).

On est donc conduit à avoir la possibilité d'introduire les nouvelles technologies de productions d'électricité, notamment le solaire et l'éolien.

**Mots clés :** Optimisation, énergie électrique, groupe diesel, turbine à gaz, éolien, éolienne.

***Table des matières***

Remerciements..... i  
Résumé ..... ii  
Table des matières ..... iii  
Liste des figures ..... vii  
Liste des tableaux ..... x  
Notations ..... xi  
Introduction générale ..... 1

**Chapitre I : Présentation de l’organisme d’accueil et généralités**

I.1. Introduction ..... 6  
I.2. Présentation de SONEGGAZ ..... 6  
    I.2.1. Historique ..... 6  
    I.2.2. Organisme d’accueil ..... 6  
I.3. Différentes technique d’électrifications ..... 8  
    I.3.1. Introduction..... 8  
    I.3.2. Groupe diesel ..... 9  
        I.3.2.1. Définition et principe de fonctionnement ..... 9  
        I.3.2.2. Avantages et inconvénients..... 9  
    I.3.3. Turbine à gaz..... 10  
        I.3.3.1. Définition et principe de fonctionnement ..... 10  
        I.3.3.2. Avantages et inconvénients ..... 11  
    I.3.4. Eolienne ..... 12  
        I.3.4.1. Définition et principe de fonctionnement ..... 12  
        I.3.4.2. Avantages et inconvénients ..... 14  
    I.3.5. Panneaux solaires (photovoltaïque) ..... 14  
        I.3.5.1. Les applications des énergies renouvelables en Algérie..... 14

I.3.5.2. Définition et principe de fonctionnement ..... 15  
I.3.5.3. Les Systèmes Photovoltaïque (PV) ..... 18  
I.3.5.4. Avantages et inconvénients ..... 19

**Chapitre II : Problématique et Etude économique**

II.1. Introduction ..... 21  
II.2. Position du problème ..... 21  
II.3. Données et hypothèses..... 22  
    II.3.1. Hypothèses..... 22  
    II.3.2. Calcul de puissance garantie (pg) ..... 24  
    II.3.3. Déclassement des groupes existants..... 24  
    II.3.4. Hypothèses technico-économiques ..... 24  
II.4. Etude économique ..... 24  
    II.4.1. L’annuité d’amortissement..... 25  
        II.4.1.1. Définitions ..... 25  
        II.4.1.2. Calcul de l’annuité ..... 25  
    II.4.2. L’actualisation..... 26  
        II.4.2.1. Définitions ..... 26  
    II.4.3. Calcul des Coûts ..... 26  
II.5. Conclusion..... 28

**Chapitre III : Stratégie de modélisation du problème**

III.1. Introduction..... 30  
III.2. Stratégie d’investissement ..... 30  
III. 3. Modélisation du problème du coût de fonctionnement..... 32  
    III.3.1. La courbe de charge prévisionnelle ..... 32  
    III.3.2. La courbe de consommation spécifique ..... 33

III.3.3. Modélisation du problème .....	34
III.3.3.1. Choix des variables de décisions .....	34
III.3.3.2. Contraintes .....	35
III.3.3.3. Fonction Objectif .....	36
III.3.3.4. Linéarisation des contraintes .....	37
III.4. Conclusion .....	38

## **Chapitre IV : Methode de resolution**

VI.1. Introduction .....	40
VI.2. Programmation mathématique.....	40
VI.2.1. Formulation générale de programmation mathématique.....	40
VI.2.2. Qualification des contraintes .....	41
VI.2.3. Exemple d'illustration .....	41
VI.3. Méthode de résolution d'un programme mathématique.....	42
VI.3.1. Programmation linéaire à variables mixtes .....	42
VI.3.2. Résolution des programmes linéaires en variables mixtes .....	43
VI.3.2.1. Procédure de séparation et évaluation.....	43
VI.4. Les méthodes approchées .....	49
VI.4.1. Méthode Heuristique .....	49
VI.4.2. Les algorithmes génétiques .....	50
VI.4.2. 1. Principe des algorithmes génétiques .....	50
VI.4.2.2. Organigramme de fonctionnement de la méthode génétique .....	50
VI.5. Conclusion .....	51

## **Chapitre V : Résolution du problème et application numérique**

V. 1. Introduction.....	53
V.2. Résolution du problème de coût de fonctionnement .....	53
V.2. 1. Résolution en utilisant la consommation spécifique moyenne .....	53

V.2.2. Application sur la centrale de Tamanrasset en utilisant logiciel LINGO .....	54
V.2.3. Interprétation des résultats .....	59
V.3. Résolution du Problème d'investissement .....	62
V.3.1. Adaptation des algorithmes génétiques au problème d'investissement .....	62
V.3.1.1. Codage des données .....	62
V.3.1.2. La population initiale .....	64
V.3.1.3. La sélection .....	65
V.3.2. L'Algorithme général de résolution du problème .....	66
V.3.3. Implémentation des algorithmes .....	67
V.3.4. Intérpréations des résultats .....	72
V.4. Conclusion .....	75
Conclusion générale .....	76
Annexe .....	77
Bibliographie .....	79

*Liste des figures*

**Chapitre I**

Figure I.1. Organigramme de la DGDS. .... 7

Figure I.2. Répartition de la production d'électricité – 2017. .... 8

Figure I.3. Répartition des centrales de production d'électricité dans le Sud Algérien .....8

Figure I.4. Schéma de fonctionnement global d'un GD. .... 9

Figure. I.5. Schéma d'une turbine à gaz simple ..... 11

Figure. I.6. Schéma d'une éolienne ..... 12

Figure. I.7. Principe de la conversion d'énergie d'une éolienne ..... 13

Figure I.8. Générateur asynchrone à cage d'écureuil ..... 13

Figure I.9. Cellule solaire ..... 16

Figure I.10. Couches d'une cellule solaire ..... 17

Figure I.11. Système d'alimentation PV autonome. .... 18

Figure I.12. Système d'alimentation hybride PV/Groupe Electrogène ..... 18

**Chapitre III**

Figure III.1. Forme d'une courbe de demande prévisionnelle..... 29

Figure III.2 : La forme de la courbe de CS/P ..... 30

**Chapitre IV**

Figure IV.1. Représentation graphique pour l'exemple proposé ..... 42

Figure IV.2. Coupe simplifiée de bac de stockage; source ..... 45

Figure IV.3. L'arborescence obtenue pour notre exemple ..... 48

Figure IV.4. Etapes d'un algorithme génétique ..... 50

## Chapitre V

Figure V.1. La centrale de Tamanrasset .....	54
Figure V.2. Fonctionnement optimale de la centrale à 14H00 .....	60
Figure V.3. Algorithme pour générer la population initiale.....	64
Figure V.4. Onglet paramètre.....	67
Figure V.5. Menu principale .....	68
Figure V.6. Chargement des données .....	69
Figure V.7. Onglet des générateurs disponible.....	69
Figure V.8. Ajout d'un générateur candidat a l'installation.....	70
Figure V.9. Les demandes prévisionnelles de 12 ans .....	71
Figure V.10. Les résultats obtenus .....	71

*Liste des tableaux*

Tableau I.1. Puissances PV installées dans les wilayas du sud .....	15
Tableau II.1. Les durées de vie des GD .....	23
Tableau II.2. Les coûts d’Ouvrages de production .....	24
Tableau.IV.1. Tableau des contraintes.....	41
Tableau V.1. Les données utilisées pour l’exemple.....	56
Tableau V.2. Demandes prévisionnelles du 11/07/2019 de 00H00 à 23H00 .....	57
Tableau V.3. Programme en LINGO .....	58
Tableau V.4. Résultats d’exécution du programme Lingo.....	59
Tableau V.5. Le fonctionnement optimal de la centrale durant 24H.....	62
Tableau V. 6. Les générateurs disponibles dans le marché.....	70
Tableau V.7. Les résultats obtenus.....	72
Tableau. V.8. Les générateurs à installer dans la centrale de Tamanrasset .....	72
Tableau V.9. Les coûts de fonctionnement actualisés .....	73
Tableau V.10. Représentation des coûts de fonctionnement actualisés engendré par chaque générateur annuellement .....	74

## *Notations*

### Les paramètres et les variable du sujet :

Ng: Nombre de groupe.

Pg: La puissance du groupe.

$C_f$ : Le coût du fonctionnement du générateur.

CS: Consommation spécifique

CE: Coûts d'exploitation.

CC: Le coût du combustible.

Pdc: Puissance développable de la centrale.

TG: Turbine à gaz.

GD : Groupe diesel.

CA : Calcul de l'annuité.

CMA : Le coût moyen actualisé.

CT(t) : Le coût total pour l'année t.

CA(t) : L'annuité d'amortissement pour l'année t.

CE(t) : Coût d'exploitation pour l'année t.

CC(t) : Coût du combustible pour l'année t.

ET(t) : Energie totale produite l'année t.

D: La demande maximale de toute l'année.

Dt: La demande à l' instant t.

$D_{add}$ : La Demande additionnelle.

$D_{max}$ : La demande maximale durant toute la période d'investissement.

$C_{ij}$  : Coût d'investissement d'un générateurs de type i de taille j.

P: Durée de vie de l'annuité.

x : Valeur après actualisation.

y : Valeur avant actualisation.

$\alpha$  : Taux d'actualisation.

i: Type de générateur.

j: Taille de générateur.

n: Le nombre de type de générateurs dans la centrale

$m_i$ : Le nombre de tailles des générateurs de type i dans la centrale.

$r_{ij}$ : Le nombre de générateurs de type  $i$  de tailles  $j$  dans la centrale.

*Min*: La puissance minimale délivrée par le générateur.

*Max*: La puissance maximale délivrée par le générateur.

**Notations mathématiques :**

PM: Programme mathématique.

Max: Maximum.

$x_j$ : Variables.

$\Omega$ : ensemble réel

$w$  : un sous ensemble de  $\Omega$

$\exists$  : Existe.

loc: Local.

$\wedge$ : Quelque soit.

Min: Minimum

$f(x)$  : Fonction réel

$\mathbb{R}$  : Ensemble des valeurs réel.

$\mathbb{N}$  : Ensemble des valeurs entiers.

## *Introduction générale*

L'optimisation consiste en l'application des méthodes scientifiques et techniques pour résoudre les problèmes complexes rencontrés dans la direction et la gestion de grands systèmes d'hommes, de machines, de matériaux et d'argent dans l'industrie, construction mécanique, civil, commerce, l'administration et la défense [9].

C'est pour cela que beaucoup d'entreprise s'intéressent à cette discipline, dont le but est d'aider les directions à déterminer leur politique de manière scientifique. C'est dans ce contexte, que nous nous intéressons à étudier un types de problèmes d'optimisation dans le domaine d'énergétique à savoir : « Optimisation des parcs de production d'énergie électrique au niveau des réseaux isolés du sud de l'Algérie. ».

L'Algérie a une superficie de 2,4 millions de km<sup>2</sup> dont une très grande partie est désertique (le Sahara représente 87 % de la superficie totale du pays) et une population d'environ 34 millions habitants, concentrée dans les régions proches du littoral méditerranéen sur une longueur de 1200 km environ. D'après les estimations, la population algérienne devrait atteindre 52 millions d'habitants à l'horizon 2025 [11].

Cette forte croissance démographique, associée au développement économique indispensable, conduira inévitablement à une très forte croissance de la demande en électricité.

Or, les schémas actuels de développement énergétique ne sont pas durables. Ils se heurteront tôt ou tard à des contraintes insurmontables telles que l'épuisement des ressources en énergies fossiles, la difficulté d'acheminement de ces combustibles sur les lieux d'exploitation et les nuisances cumulées à l'environnement.

## Introduction générale

---

Grâce aux technologies actuelles et à leur perfectionnement à venir, les énergies renouvelables, qui présentent l'énorme avantage d'être durables et propres, peuvent contribuer à surmonter ces contraintes en particulier les centrales Diesel du Sud qui posent des contraintes d'exploitation et d'approvisionnement en fuel. Pour alléger et diminuer ces contraintes, il est intéressant, voire nécessaire d'examiner la contribution des énergies renouvelables dans le fonctionnement de ces centrales.

Le développement socioéconomique d'un pays requiert la disponibilité de l'énergie et plus particulièrement l'énergie électrique. De nos jours, les producteurs de cette énergie utilisent des moyens de production diversifiés et s'orientent de plus en plus vers l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables propres [4].

L'objectif étant double puisqu'il s'agira non seulement de satisfaire une demande toujours croissante en énergie électrique mais aussi, de réduire le taux des émissions de gaz à effet de serre issu de la combustion des ressources fossiles.

En Algérie, la production de l'énergie électrique, à charge de la SONELGAZ, est assurée par les moyens traditionnels basés sur la combustion des ressources fossiles. Cette production est distribuée à travers le territoire national par le biais du réseau interconnecté Nord qui alimente les régions du Nord et les centrales Diesel non interconnectées desservant les régions du Sud [4, 11].

Le fonctionnement des centrales Diesel exige le transport du combustible sur de longues distances, et l'approvisionnement en pièces nécessaires pour le fonctionnement et la maintenance ; il demande un temps considérable, générant ainsi des frais très élevés pour la SONELGAZ. Le raccordement de ces centrales au réseau du Nord aurait pu résoudre ce problème, mais il requiert des coûts importants et risque de causer des surcharges au niveau du réseau. De ce fait, la SONELGAZ doit s'orienter vers d'autres moyens de production de l'énergie électrique [4].

## Introduction générale

---

Dans cette perspective, l'implantation de moyens de production d'électricité décentralisés, pourrait représenter une alternative intéressante. En effet, l'Algérie bénéficie d'un gisement solaire important, principalement au Sud, avec un ensoleillement dépassant 6 kWh/m<sup>2</sup>.jour. Cette valeur est à comparer avec l'ensoleillement de 2 kWh/m<sup>2</sup>.jour en Europe du Nord [5].

Les centrales photovoltaïques [3] qui ont l'avantage d'être faciles à exploiter et d'avoir des coûts de maintenance faibles présenteraient la solution idoine. De plus, elles ont un impact positif sur l'environnement vu qu'elles ne produisent aucun gaz à effet de serre.

Néanmoins, une centrale PV, dont le fonctionnement est limité aux périodes diurnes, ne peut satisfaire à elle seule la demande énergétique, ceci est dû au caractère aléatoire de la source solaire. De plus, le coût de stockage pour une installation autonome est élevé. De ce fait, la SONELGAZ envisage l'hybridation des centrales Diesel en PV.

Les projets d'hybridation sont caractérisés par leurs coûts élevés. De plus, l'injection d'une puissance PV pourrait avoir, dans certains cas, des conséquences sur la tension et la fréquence du réseau de distribution et conduire à son instabilité. Aussi, convient-il de faire un choix judicieux du meilleur apport en puissance PV à jumeler avec les centrales Diesel et ceci, en tenant compte des contraintes citées.

Dans le but de satisfaire la demande d'énergie électrique et d'assurer une continuité et une qualité de service, dans les réseaux isolés, pour des périodes de plusieurs années, nous proposons à la direction de la planification de SONELGAZ une méthode scientifique qui prend en considération la majorité des caractéristiques de ces réseaux.

La méthode proposée, fait appel à des techniques de Recherche Opérationnelle ainsi qu'à des théories de mathématiques. Ce document illustre les étapes à suivre pour aboutir à des parcs de production d'électricité dans un cheminement présenté comme suit :

Le premier chapitre est consacré dans la première à la présentation de l'entreprise SONELGAZ et de l'organisme d'accueil qui est en l'occurrence la direction de la planification au sein de la direction Générale du Développement et de la Stratégie ensuite

## Introduction générale

---

nous donnons dans la deuxième partie les différentes techniques d'électrification qui concerne cette étude à savoir le diesel, le gaz, le solaire et l'éolienne.

Le deuxième chapitre sera consacré aux descriptions de problématiques posées.

Le troisième chapitre consiste en la modélisation mathématique des problématiques.

Le quatrième chapitre est réservé aux méthodes de résolution pour les problématiques.

Le cinquième chapitre est consacré à la résolution des problèmes posés avec une implémentation informatique et enfin nous terminerons par une conclusion générale.

# CHAPITRE I

---

## **Présentation de l'organisme d'accueil et Généralités**

## **I.1. Introduction**

Ce chapitre est consacré à la présentation des concepts de base pour la problématique proposée. Il s'organise en deux parties. La première partie de ce chapitre servira à faire une brève présentation de l'entreprise SONELGAZ. La deuxième partie est consacrée à la présentation de quelques généralités et définitions des différentes techniques d'électrification qui seront utilisées par la suite dans ce travail.

## **I.2. Présentation de SONELGAZ [12]**

Cette partie contient une présentation de SONELGAZ, ainsi que de l'organisme d'accueil direction de la planification au sein de la direction générale du développement et de la stratégie.

### **I.2.1. Historique [12]**

EGA « électricité et gaz d'Algérie » a été créée en 1947, auquel est confié le monopole de la production, du transport et de la distribution de l'électricité et du gaz.

En 1969, EGA devient SONELGAZ, société nationale de l'électricité et du gaz, à ce moment c'est déjà une entreprise de taille importante dont le personnel est de quelques 7000 agents.

En 1983, l'entreprise se dote de cinq (05) filiales travaux spécialisées :

- KAHRIF pour l'électrification
- KAHRAKIB - Infrastructures et installation électrique
- KANAGAZ - Réalisation des réseaux gaz
- INERGA - Génie Civil
- ETTERKIB .Montage industriel.

### **I.2.2. Organisme d'accueil**

La Direction de la planification au sein de la Direction Générale du Développement et de la Stratégie (DGDS) est constituée de 6 directions, un staff et un support, comme le montre l'organigramme suivant :

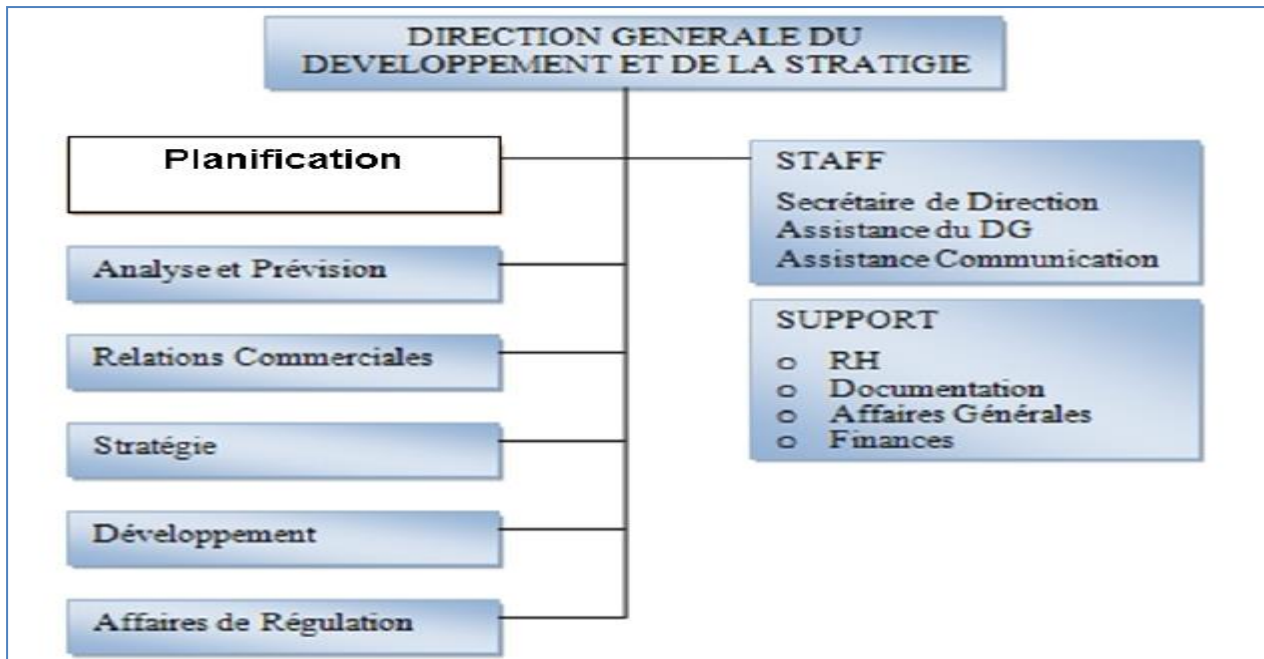


Figure I.1. Organigramme de la DGDS [12]

## Direction de la planification [11]

### Missions :

- ✓ Dégager les grandes orientations possibles en matière d'équipements électriques.
- ✓ Évaluer l'impact et préparer les plans d'équipements.

### Activités :

- ✓ Développement Production .Transport électricité
- ✓ Réaliser les études de développement du parc de production d'électricité et du réseau grand transport et d'interconnexion.
- ✓ Effectuer les études d'alimentation des méthodologies utilisées et de doctrine d'équipement (nouveaux paliers, localisation des groupes. . .).
- ✓ Elaborer le schéma de la production et transport moyen et long terme.

## I.3. Différentes technique d'électrifications

### I.3.1. Introduction

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. L'exploitation des énergies renouvelables est une solution indispensable. On peut prévoir que tout système énergétique durable dans le futur sera basé sur l'utilisation de ces sources [5].

En 2010, la production d'électricité mondiale provenant des sources d'énergies renouvelables a atteint 20,2% de la production totale. Cette partie est nettement inférieure à la production issue des combustibles fossiles (67,2%) mais reste néanmoins supérieure à la part de la production d'origine nucléaire (13,0%) [1, 2].

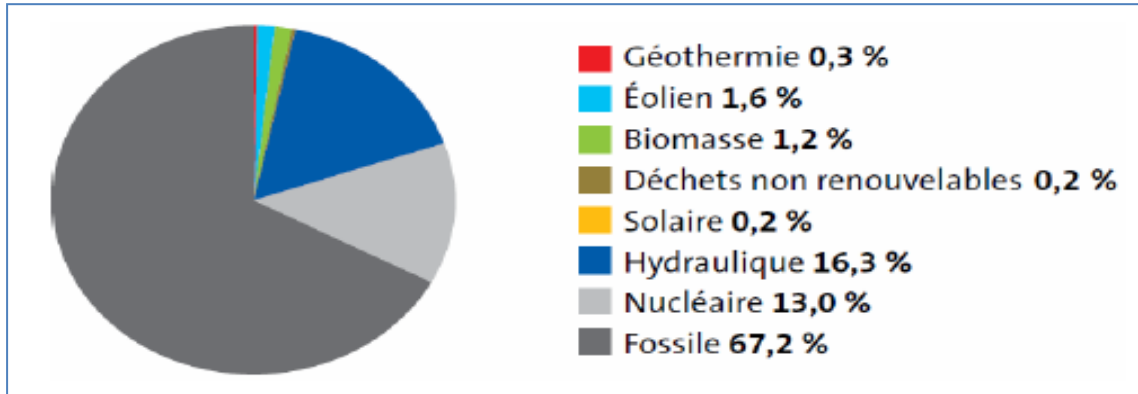


Figure I.2. Répartition de la production d'électricité – 2017 [1]

Le parc de production d'électricité sud de l'Algérie est exclusivement Diesel, exceptés le pôle d'Adrar, Hassi R'mel et Hassi Messaoud en raison de la présence du gaz naturel [11].

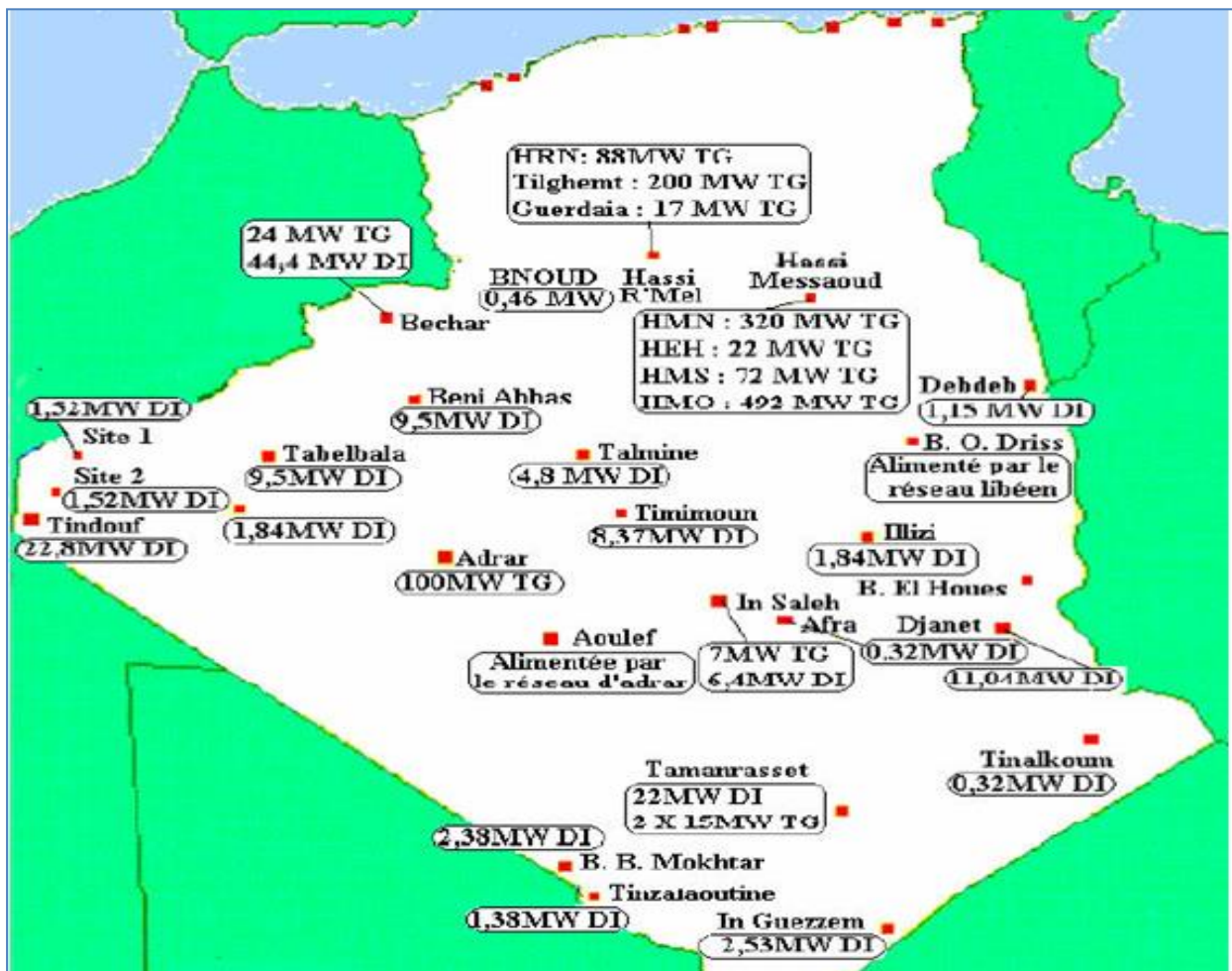


Figure I.3. Répartition des centrales de production d'électricité dans le Sud Algérien.

Dans cette partie, nous présentons les différentes techniques d'électrification qui seront utilisées par la suite dans ce travail.

## I.3.2. Groupe diesel

### I.3.2.1. Définition et principe de fonctionnement [2]

Un groupe diesel (GD) est composé d'un moteur diesel à combustion interne, accouplé à un alternateur dont le rôle est de transformer l'énergie mécanique développée par l'arbre du moteur diesel.

Un alternateur est constitué des éléments suivants :

- Un rotor de forme cylindrique
- Un stator et bâti,
- Un palier situé du côté excitatrice,
- Un accouplement rigide reliant l'arbre de l'alternateur et le moteur diesel,
- Un ventilateur pour le refroidissement.

L'alternateur tourne à une vitesse de 428 tr/mn couplé directement à l'arbre du moteur diesel par un accouplement rigide, il est excité par un courant continu.

Le groupe diesel fonctionne en trois régimes :

- 1- **Régime de démarrage (star-up)** : dans ce cas le groupe est en marche sans qu'il ne soit connecté à une charge.
- 2- **Régime opérationnel** : dans ce cas le groupe diesel est productif, et en peut distribuer l'énergie produite.
- 3- **Régime de mise au repos (star-down)** : après la déconnexion du groupe diesel, il est laissé pendant une période à vide sans qu'il y ait une distribution d'énergie.

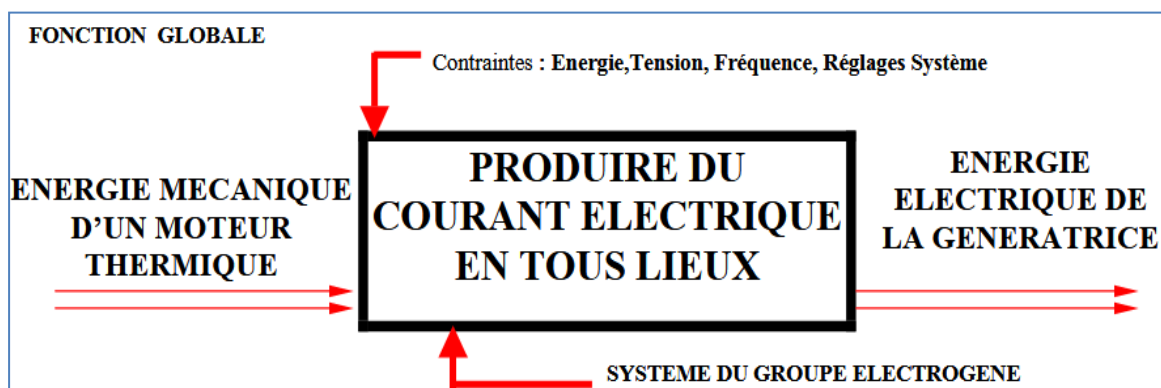


Figure I.4. Schéma de fonctionnement global d'un GD[2]

### **I.3.2.2. Avantages et inconvénients :**

On attribue à ce mode d'alimentation (GD) les avantages et les inconvénients suivants [2, 6] :

#### **Avantage :**

- ✓ Le moteur diesel à une grande souplesse pour faire face aux pointes de la demande, il peut alors fonctionner sans problème de 16 à 24 heures par jours.
- ✓ Coût d'investissement relativement modéré.
- ✓ Grande souplesse dans l'installation et l'utilisation.

#### **Inconvénients :**

- L'approvisionnement du combustible parfois difficile en saison des pluies.
- Nécessite de transporter et de stocker le combustible, les lubrifiants et les pièces de rechange.
- Consommation de ressources non renouvelables.
- Pollution sonore.
- Pollution localisée (Gaz d'échappement).
- Fiabilité médiocre impliquant souvent la nécessité d'un groupe de secours.
- Maintenance très difficile pour les centres éloignés.
- Main d'œuvre qualifié pour l'installation et l'entretien.
- Durée de vie du groupe relativement faible (entre 15 et 20 ans).
- Frais d'exploitation élevés (main d'œuvre, carburant, entretien, .....).

### **I.3.3. Turbine à gaz [1, 6]**

#### **I.3.3.1. Définition et principe de fonctionnement [1]**

Une turbine à gaz, appelée aussi turbine à combustion, est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique (rotation d'un arbre) à partir de l'énergie contenue dans un hydrocarbure (fuel, gaz...) [1].

Le turboréacteur est une turbine à gaz particulière qui utilise le principe de la réaction pour propulser certains types d'avions rapides.

La turbine à gaz est un moteur thermique réalisant les différentes phases de son cycle thermodynamique dans une succession d'organes traversés par un fluide moteur gazeux en écoulement continu. C'est une référence fondamentale par rapport aux moteurs à piston se

qui réalisent une succession temporelle des phases dans un même organe (généralement un cylindre). Dans sa forme la plus simple, la turbine à gaz fonctionne selon le cycle dit de Joule comprenant successivement et schématiquement :

- Un **compresseur**, qui comprime de l'air de manière adiabatique.
- Une **chambre de combustion**, réalisant un apport de chaleur pratiquement isobare ( $T_{\max}=1500^{\circ}\text{C}$  actuellement)
- Une **turbine**, le plus souvent axiale, recevant un travail mécanique lors de la détente des gaz brûlés.

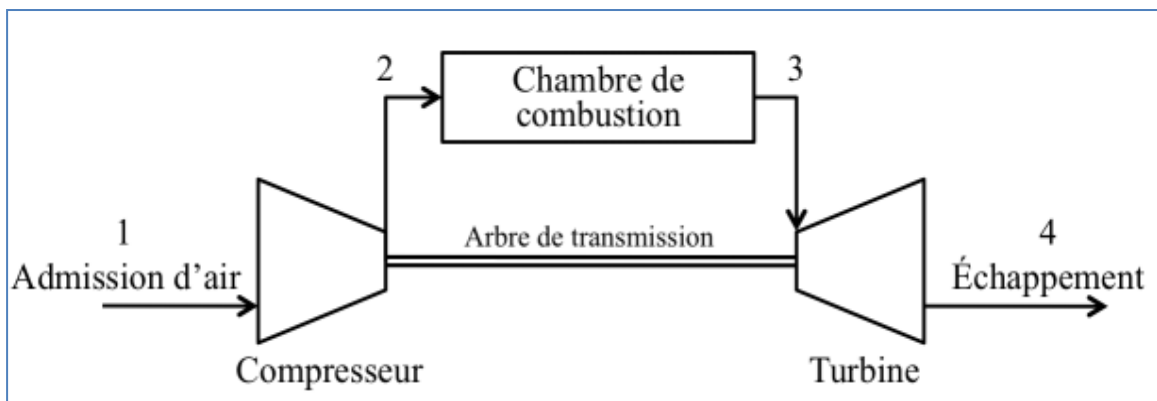


Figure I.5. Schéma d'une turbine à gaz simple [1]

### I.3.3.2. Avantages et inconvénients

On attribue à ce mode d'alimentation en énergie électrique des avantages et les inconvénients suivants [1] :

#### Avantage :

- ✓ Des efforts importants ont été entrepris par les constructeurs pour limiter la pollution de l'air par les turbines à gaz, en particulier en réduisant les rejets d'oxyde d'azote.
- ✓ L'utilisation de gaz naturel permet une émission faible de dioxydes de soufre ( $\text{SO}_2$ ) et de monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ).

#### Inconvénients :

- Besoin d'existence de conduite de gaz, ce qui n'est pas évident dans quelques régions du sud du pays.
- Puissance nominale grande ce qui pose problème dans les périodes de faible demande.
- Durée de vie relativement faible.

### I.3.4. Eolienne

#### I.3.4.1. Définition et principe de fonctionnement [3, 5]

L'énergie fournie par le vent est due à la vitesse du déplacement de l'air (énergie cinétique). L'aérogénérateur transforme cette énergie en énergie mécanique de rotation pour la production d'électricité. L'hélice tourne sur la pression du vent pour entraîner un générateur électrique. Les vitesses du vent et leur profit dépend de beaucoup de facteurs notamment [3] :

- La configuration du terrain (vallées, montagne. . .).
- La hauteur des obstacles (par exemple : arbre).

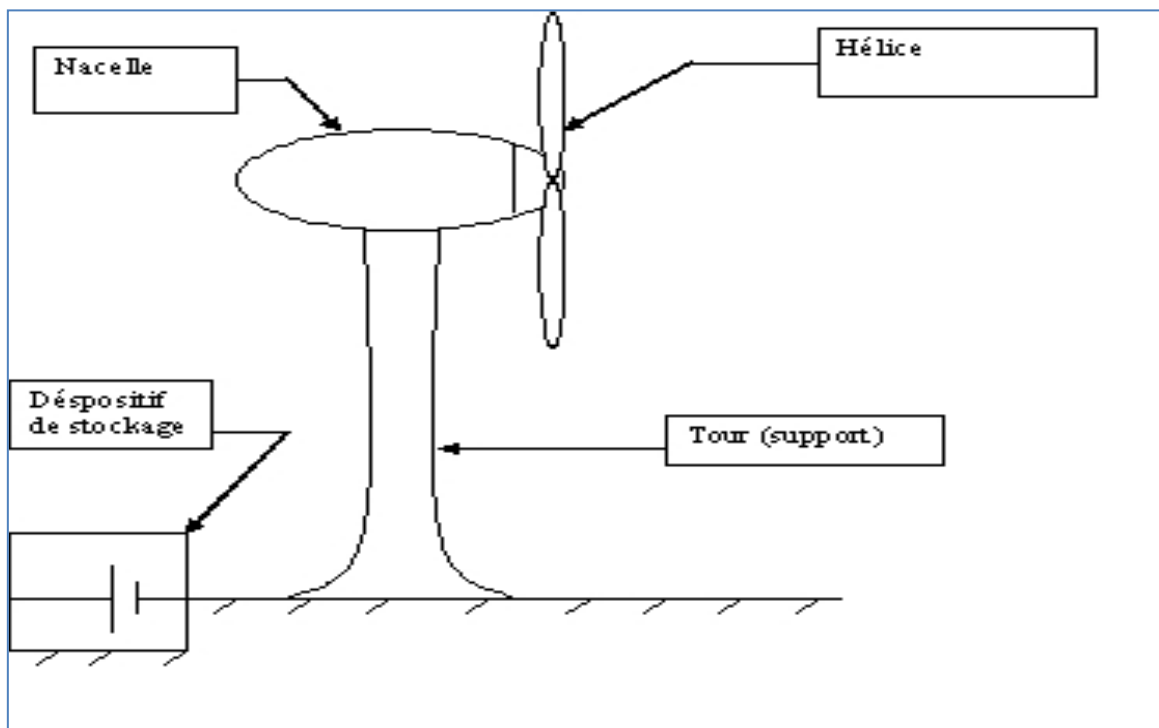


Figure. I.6. Schéma d'une éolienne [3]

#### Système de production d'électricité éolienne :

Un système de production d'électricité éolienne, quelque soit sa technologie, convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique fournie à la charge ou au réseau.

Cette conversion se fait en deux étapes [3, 4] :

- La conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique au niveau de la turbine,
- La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique au niveau du générateur.

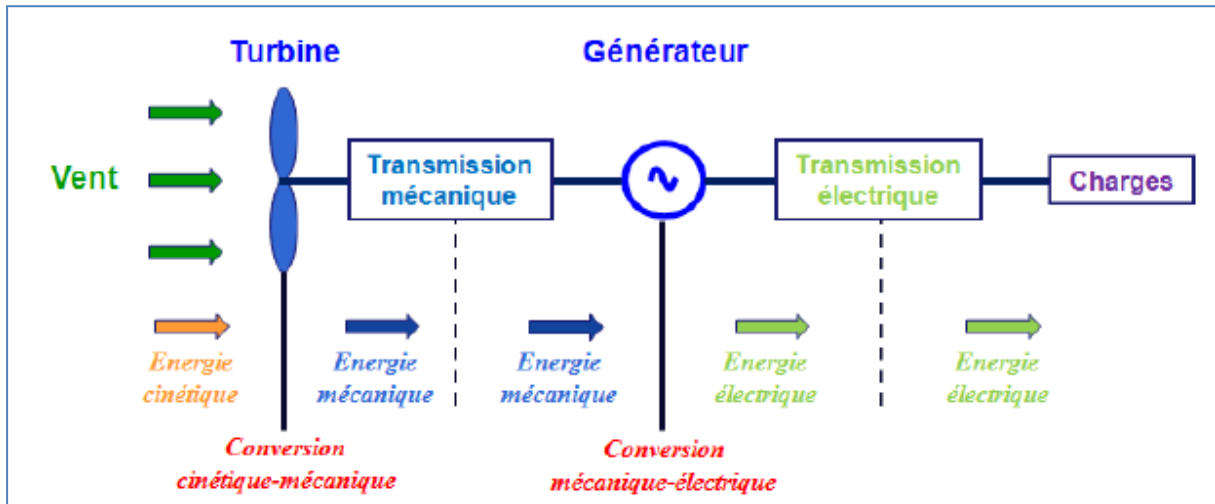


Figure I.7. Principe de la conversion d'énergie d'une éolienne [3]

Il existe plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système éolien qui demande des caractéristiques très spécifiques.

Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2MW environ, le générateur asynchrone est plus courant et économique [4].

Le générateur asynchrone à cage d'écureuil est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissances en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit [3].

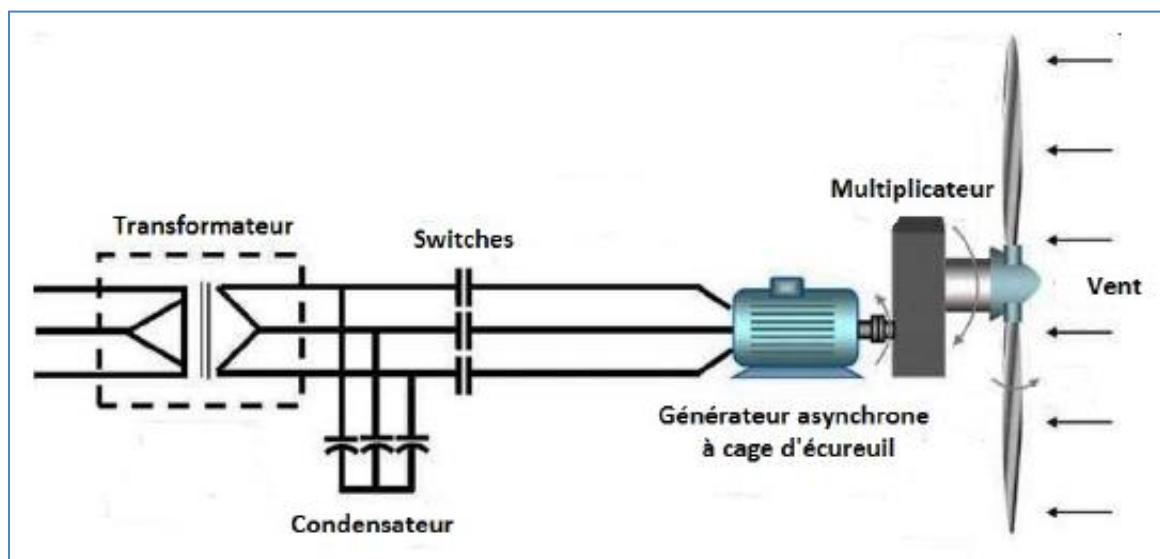


Figure I.8. Générateur asynchrone à cage d'écureuil [3]

### **I.3.4.2. Avantages et inconvénients**

L'utilisation des éoliennes pour l'alimentation en énergie électrique présente les avantages et les inconvénients suivants [3, 4] :

#### **Avantage :**

- ✓ Longue durée de vie : les aérogénérateurs sont constitués pour 100.000 heures de fonctionnement à vitesse nominale soit plus de 20 ans.
- ✓ L'énergie qu'elles utilisent est gratuite, indéfiniment, renouvelable et ne pose aucun problème d'approvisionnement.
- ✓ Bonne fiabilité.
- ✓ Non polluante.
- ✓ Souplesse d'installation.

#### **Inconvénients :**

- Irrégularité de la production.
- Prix modérés, demandent une main d'œuvre qualifiée pour l'installation et pour l'entretien.
- Nécessité le stockage d'énergie.
- Détérioration visuelle du paysage.
- Occupation du sol (encombrement).

### **I.3.5. Panneaux solaires (photovoltaïque) [5]**

#### **I.3.5.1. Les applications des énergies renouvelables en Algérie**

A ce jour, l'application des énergies renouvelables a constitué un complément à l'électrification rurale par des systèmes photovoltaïques autonomes dans les régions isolées du sud du pays.

Un premier programme de près de 1 milliard de dinars pour l'électrification de zones sahariennes par des systèmes photovoltaïques a permis à un millier de foyers d'accéder à l'électricité. Un second programme de la même importance, soit de 900 millions de dinars, a été réalisé à partir de 2016, toujours au bénéfice des populations du Grand Sud Algérien. Les villages électrifiés par des systèmes photovoltaïques concernent les wilayas d'Adrar, Illizi, Tamanrasset et Tindouf [12].

Wilayas	Puissances installées (kwe)
Tamanrasset	277.5
Illizi	75
Tindouf	78
Adrar	22.5

**Tableau I.1. Puissances PV installées dans les wilayas du Sud [1].**

Dans la wilaya de Tindouf, des travaux portant sur le raccordement de 75 logements ruraux et la réalisation de 10 candélabres pour l'éclairage publique, fonctionnant à l'énergie solaire, ont démarré le mois de février 2016.

En ce qui concerne l'énergie éolienne, il y a lieu de citer le projet de la firme éolienne de Tindouf. Pour ce qui est du solaire thermique, la wilaya de Laghouat vient de bénéficier d'un grand projet de réalisation d'une centrale de génération d'énergie solaire. La centrale fournira 130 MW à partir du champ solaire.

### **Pourquoi le Photovoltaïque ?**

On utilise le PV le plus souvent pour [4] :

- L'électrification rurale : alimentation des habitations, des centres de santé, des besoins agricoles, pompage, etc.
- Les habitations isolées, les refuges, les habitations sur îlots.
- Pour l'électrification des régions isolées, l'énergie solaire est la plus compétitive, tel que nous l'avons indiqué, les frais de raccordement au réseau sont énormes, et peuvent être supérieurs aux frais d'installation du système PV.

Le Credeg/Sonelgaz et le Cread ont montré, à travers leurs études respectives relatives à l'électrification de ces villages isolés, que l'expérience nationale en matière d'énergies renouvelables est considérée comme acquise et que les populations adhèrent facilement à ce type de projet [3].

### **I.3.5.2. Définition et principe de fonctionnement [3, 4]**

La cellule photovoltaïque (ou cellule solaire) est l'élément de base des panneaux solaires. Elle permet de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire, en utilisant l'effet Photovoltaïque. L'emploi des cellules photovoltaïques reste limité en raison de leur prix élevé et de leur faible rendement de conversion.

Sur terre, l'absorption préférentielle par l'atmosphère de certaines longueurs d'onde modifie quelque peu le spectre solaire, mais l'énergie fournie est toujours importante, non polluante, inépuisable et assez uniformément répartie à la surface du globe.

L'effet photovoltaïque implique la production et le transport de charges négatives et positives sous l'effet de la lumière dans un matériau semi-conducteur : lorsque les photons heurtent la surface de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière.

Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique qui est recueilli par des fils métalliques très fins.

### Description de la cellule solaire [3]:

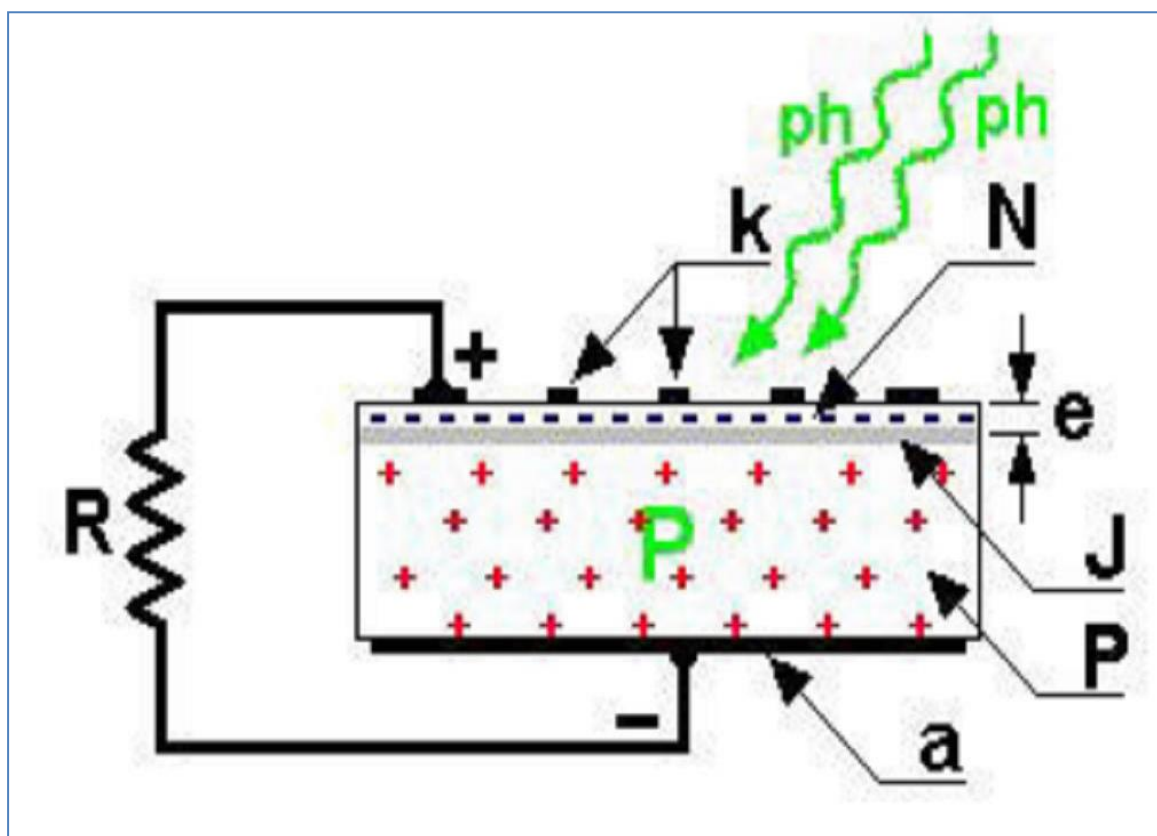
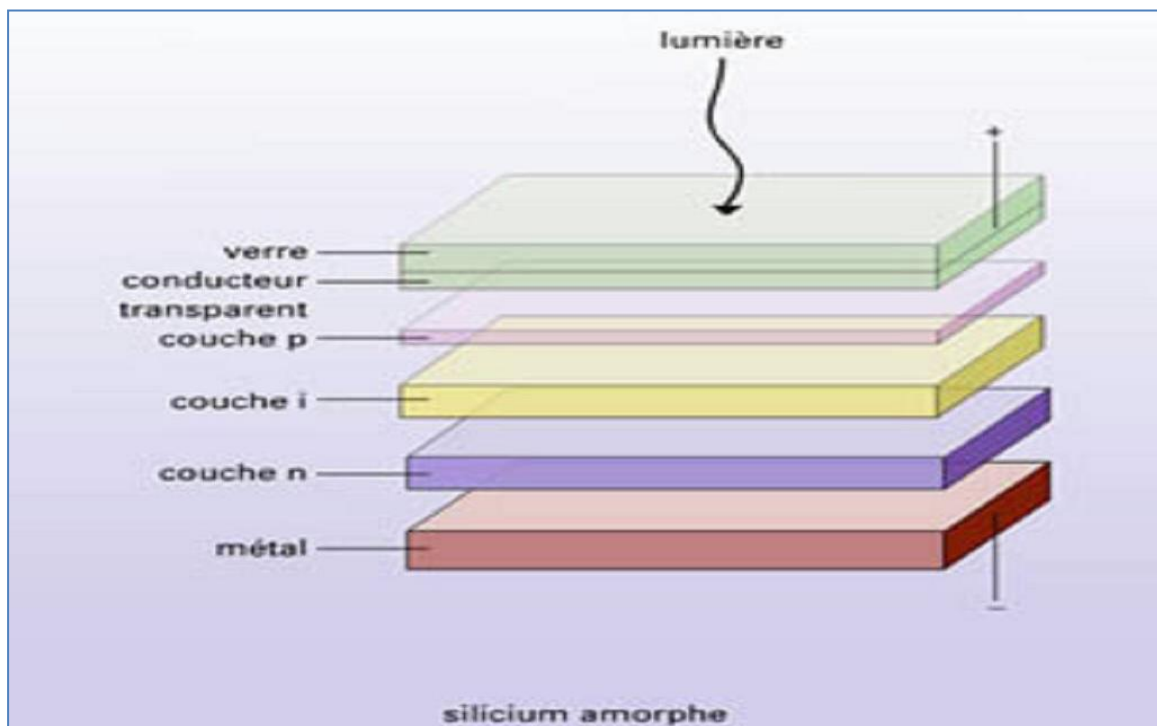


Figure. I.9. Cellule solaire [3]

La cellule est constituée de plusieurs couches :

- une couche de protection translucide (n'est pas sur le schéma).
- une couche conductrice (k) qui sert de cathode (Pôle -) (grille métallique)
- une couche avec porteurs de charges libres négatives (N), d'épaisseurs  $e$ .
- une jonction entre (N) et (P).
- une couche avec porteurs de charges libres positives (P) (cristal semi-conducteur).
- une couche de contact conductrice en métal (a) qui joue le rôle de l'anode (Pôle +).

- une couverture pour la protection contre les influences externes (n'est pas sur le schéma).



**Figure. I.10. Couches d'une cellule solaire [4]**

L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre [4].

Les couvertures de protection sont indispensables, la cellule photovoltaïque étant très fragile. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le panneau solaire. La puissance électrique fournie au récepteur dépend de l'intensité de l'ensoleillement. Elle est donc nulle la nuit et à son maximum quand le soleil est au zénith.

Un rayon lumineux qui frappe la cellule peut pénétrer dans le cristal (en général du Silicium) en passant au travers de la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode. La présence du champ électrique est due à l'existence de la jonction (J).

Il provoque l'accumulation des porteurs de charge produits par le rayonnement lumineux vers les deux électrodes a et k.

Le solaire thermique : L'effet photovoltaïque se distingue du solaire thermique qui ne produit pas de l'électricité mais transforme le rayonnement solaire en chaleur.

### **I.3.5.3. Les Systèmes Photovoltaïque (PV) [4]**

Il y a deux types de systèmes Photovoltaïque (PV) :

1. les systèmes autonomes :

L'énergie électrique n'est produite que par les panneaux PV afin de servir des besoins locaux.

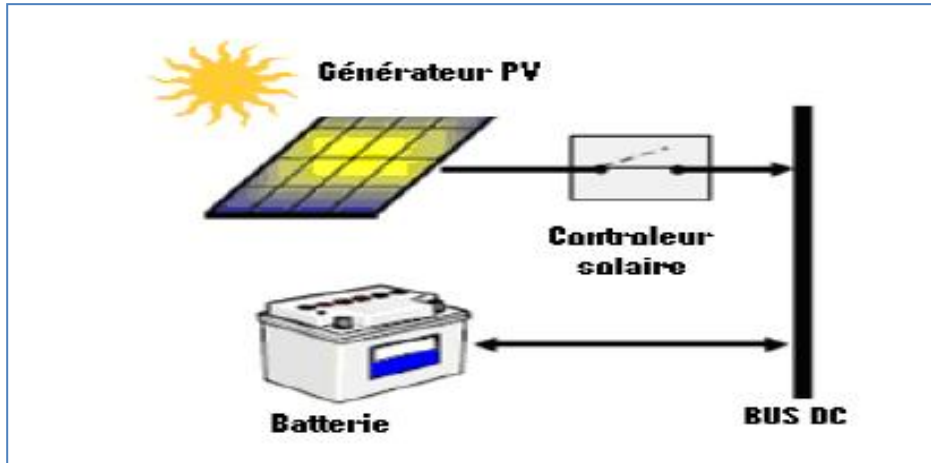


Figure I.11. Système d'alimentation PV autonome [4].

2. Les systèmes hybrides :

Les modules PV fonctionnent avec un autre générateur en parallèle.

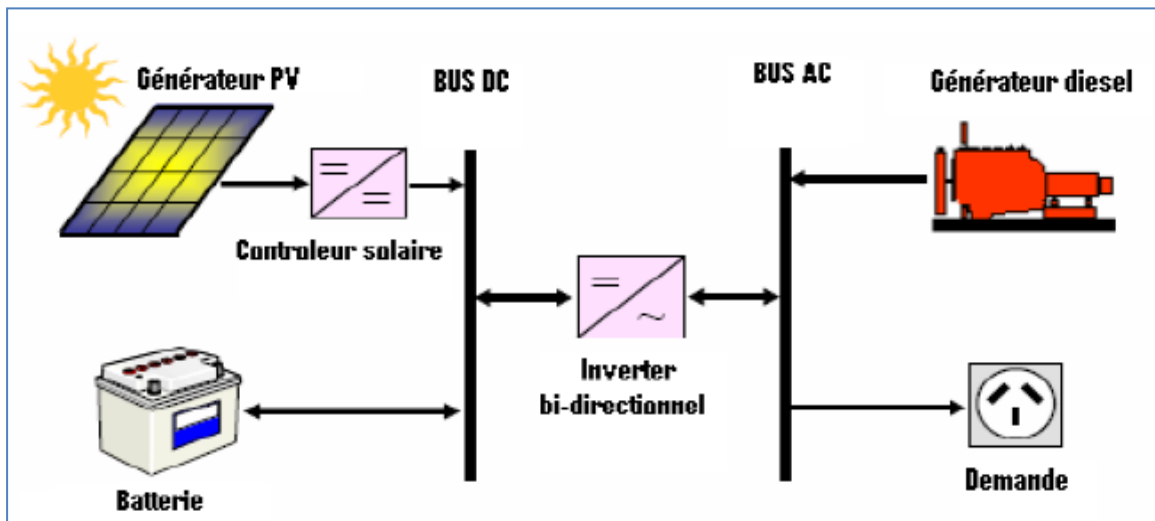


Figure I.12. Système d'alimentation hybride PV/Groupe Electrogène [4].

L'hybridation envisagée dans notre cas consiste à installer un système PV qui sera connecté en parallèle avec les générateurs DI en vu de partager la même sortie d'alimentation.

L'installation PV sera accompagnée de batteries de stockage [4].

**I.3.5.4. Avantages et inconvénients :**

L'alimentation en énergie électrique par système solaire photovoltaïque présente les avantages et les inconvénients suivants [3, 4]:

**Avantage :**

- ✓ Frais d'exploitation minimum.
- ✓ Caractère totalement statique.
- ✓ Conversion directe de l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique.
- ✓ Fiabilité élevée.
- ✓ Les cas de pannes sont moins fréquents.
- ✓ S'il se produit une panne sur son module, le fonctionnement du système ne s'arrête pas, l'interchangeabilité est immédiate et ne demande pas de compétence élevée.
- ✓ Absence de pollution sonore.
- ✓ Facilité d'utilisation de l'énergie produite.
- ✓ Absence de pollution.
- ✓ Le transport et l'installation sont faciles car l'équipement est léger et peut être placé en quelques heures.
- ✓ Taille variables adaptables à la demande.
- ✓ Stockage possible dans les accumulateurs.
- ✓ Absence des dépenses de combustible.

**Inconvénients :**

- Investissement élevé.
- Faible rendement énergétique (11 à 12%).
- Nécessité de stockage de l'énergie électrique, vu l'irrégularité de la source.
- L'installation solaire doit être doublée d'une installation (Fuel, Gaz. . .) si on veut éviter le cas des jours longs sans luminosité.
- Strictement lié aux rayonnements lumineux, l'énergie photovoltaïque varie suivant :
  - 1- La localisation géographique.
  - 2- L'heure et la saison.
  - 3- L'altitude.
  - 4- L'humidité.

## CHAPITRE II

---

# Problématique et Etude économique

## II.1. Introduction

Ce chapitre présente la problématique proposée par la direction de la planification, les hypothèses de travail ainsi que quelques définitions utiles.

Les localités du sud, dont la charge est faible et les distances par rapport au réseau interconnecté sont très importantes, ce qui nécessite l'utilisation des différents modes d'alimentations :

- Soit à partir des groupes diesel,
- Soit saisir l'opportunité de la présence du gaz (Turbine a gaz),
- Soit à partir des panneaux solaires ou des éoliennes.

Il s'agit de choisir la meilleure solution qui présente le coût le plus optimale et les conditions d'exploitation les moins contraignantes [12].

## II.2. Position du problème [12]

SONELGAZ produit et transporte l'énergie électrique vers ses clients dans les localités isolés du sud de l'Algérie à partir des centrales actuellement installées. Pour cela la DGDS (Direction Général du Développement et de la Stratégie) nous a proposé ce sujet.

Le sujet consiste à déterminer le meilleur parc production Electricité ciblé à long terme sur un horizon de 10 à 15 ans pour assurer l'alimentation en énergie électrique des localités isolés du sud en tenant compte de l'évolution prévisionnelle de la demande.

La consommation augmente avec le temps, avec l'évolution de la population et l'évolution de l'industrie. Cette demande est caractérisée par :

- 1- la demande en pointe.
- 2- la demande en creux.

La consommation d'énergie électrique en été est très élevée, à cause de la chaleur et l'utilisation de la climatisation, cette quantité représente la « pointe » par contre, en hiver la consommation est très basse ce qui représente le « creux ».

Le problème principal qui va intervenir dans ce sujet c'est l'écart important qui existe entre ces deux phénomènes « pointe » et « creux ». L'objectif est d'un coté de satisfaire la demande des clients en pointe et d'un autre côté de minimiser les coûts de production pendant le fonctionnement des groupes à l'état creux de charge.

En effet, Le fonctionnement des groupes à l'état creux sera examiné pendant le creux de charge de telle façon à ne pas les faire fonctionner en dessous de 60% de leur puissance nominale pour les groupes diesel et 40% pour les TG.

Pour garantir la sécurité d'alimentation, la solution mise en service par SONELGAZ c'est de mettre en place une puissance supplémentaire dans chaque centrale ce qu'on appelle « Puissance garantie ». Pour assurer l'alimentation en énergie électrique dans les localités. SONELGAZ applique une stratégie de renforcement des centrales de production actuellement installées par :

- 1- Intégration de nouveaux groupes diesels en tenant compte des tailles et des types des groupes.
- 2- Intégration des turbines a gaz (s'il existe une alimentation en gaz dans la centrale en tenant compte de la taille et du type).
- 3- Installation des panneaux solaires s'il y a possibilité.
- 4- Construction des éoliennes s'il y a possibilité.

L'objectif que nous devons atteindre est de satisfaire la demande des clients par l'intégration d'une nouvelle puissance en tenant compte du type et de la taille d'un groupe toute en minimisant le coût moyen actualisé des Kilo Watts heure (kWh), ceci revient à minimiser les coûts d'investissements, d'exploitation, de maintenance et de combustible.

Or, le problème consiste à déterminer un parc de production (meilleur que possible) cible sur un horizon de 10 à 15 ans ceci consiste à actualiser les coûts à l'année de base.

### **II.3. Données et hypothèses [11, 12]**

En général les hypothèses considérées dans cette extension sont les suivantes :

#### **II.3.1 Hypothèses**

SONELGAZ adopte une stratégie qui consiste à avoir un nombre maximal de groupes diesel égal à 06 par centrale avec au maximum 02 centrales par site, ce qui donne 12 groupes par site.

Par ailleurs, pour tenir compte des délais pratiques de réalisation, SONELGAZ considère une durée minimale de trois années entre deux renforcements successifs.

### II.3.2 Calcul de la puissance garantie (Pg)

SONELGAZ utilise le critère (N-2) de sécurité d'alimentation :

**Algorithme d'utilisation :**

**Si** Ng (nombre de groupe)  $\leq 6$  ;

**alors ;**

pg = pdc (Puissance développable de la centrale) –(la puissance du groupe le plus puissant) ;

**Si**  $6 < Ng \leq 12$  ;

**alors ;**

pg = pdc –(la puissance de deux groupes les plus puissant) ;

**Sinon Si** Ng  $> 12$  ;

**alors ;**

pg = pdc –(la puissance de trois groupes les plus puissant).

**FIN.**

### II.3.3. Déclassement des groupes existants

Les critères de déclassement des groupes sont donnés par le tableau ci-après.

Le tableau suivant représente la durée de vie des groupes Diesel et TG:

Type de production	Déclassement
Groupe diesel	Après 20 ans de fonctionnement
Turbine à gaz	Après 200 000 Heures de fonctionnement

**Tableau II.1. Les durées de vie des GD [12]**

### II.3.4. Hypothèses technico-économiques

#### 1- Ouvrages de production

Sur la base des coûts de référence 2017 et les coûts internationaux, nous avons le tableau suivant :

Pn (kW)	type	Coût d'investissement (\$/kW)	Coût d'exploitation (%)	CS.moy (th/kWh)
80	GD	8463.3	4	2.638
250	GD	8463.3	4	2.638
400	GD	3721.3	4	2.422
2000	GD	3019.4	4	2.750
4000	GD	3019.4	44	2.750
3000	TG	1227.7	3.5	3.795
5000	TG	1227.7	3.5	3.795
10000	TG	1032	3.5	3.7
25000	TG	836.3	3.5	3.619

**Tableau II.2. Les coûts d'Ouvrages de production [12]**

## 2- Coût du combustible

Le coût du combustible est considéré constant durant toute la période de l'étude, il est de :

- Gaz naturel 2.381 DA/Th.
- Gaz Oil 2.7778 DA/Th.

## 3- Taux d'actualisation

Pour la comparaison des variantes, tous les coûts d'investissements et du kWh sont actualisés à l'année de base, le taux est égal à 10%.

## II.4. Etude économique

Dans cette partie on va présenter quelques notions économiques (annuité, actualisation), ainsi que les coûts utilisés et la manière de les calculés.

## II.4.1. L'annuité d'amortissement

### II.4.1.1. Définitions [11]

**Définition 1 :** Paiement annuel au moyen duquel un débiteur se libère progressivement d'une dette, y compris les intérêts équivalence d'une année de service pour le décompte des pensions.

**Définition 2 :** Une suite d'annuités est un ensemble de versement effectué à des intervalles de temps constants, soit pour effectuer un placement, soit pour rembourser un emprunt.

Ces versements peuvent être constants ou variables, de début de période (loyer, assurance, crédit-bail) ou de fin de période (remboursement d'un emprunt par exemple).

**Les questions que l'on se pose sont :**

1- Que représentent-elles à une date donnée, antérieure à la date du premier versement ?

C'est la « valeur actuelle » de la suite. Ainsi, un emprunt à long terme va engendrer une suite de remboursements aux différentes échéances. Le capital emprunté est la valeur actuelle des différents remboursements.

2- Que représentent-elles à une date postérieure au versement de la dernière annuité ?

C'est la « valeur acquise ». Par exemple, si on veut constituer un capital en effectuant des versements successifs, le capital obtenu est la valeur acquise des différents versements.

### II.4.1.2. Calcul de l'annuité

Il est calculé par la formule suivante :

$$C A n_{ij} = C_{ij} * \frac{\alpha(1 + \alpha)^p}{(1 + \alpha)^p - 1} \quad (II. 1)$$

p: Durée de vie de l'annuité.

Taux d'intérêt et  $C_{ij}$  : Coût d'investissement d'un générateurs de type i de taille j.

## II.4.2. L'actualisation

### II.4.2.1. Définitions [11]

S'applique à des très nombreux domaines, elle consiste à calculer la valeur à une date donnée d'un capital en payable ultérieurement.

C'est l'acte de calculer la valeur actuelle d'un bien disponible dans l'avenir.

L'actualisation se fait par la formule suivante :

$$x = y * \frac{1}{(1 + \alpha)^{n-\frac{1}{2}}} \quad (II.2)$$

$x$  : valeur après actualisation.

$y$  : valeur avant actualisation.

$\alpha$  : taux d'actualisation.

## II.4.3. Calcul des Coûts

Soient les coûts suivants :

- ❖  $C_f$ : Le coût du fonctionnement du générateur.
- ❖  $CE_{ijhta}$  : Coûts d'exploitation (coût du personnels + coût de maintenance) du  $k^{ième}$  générateur de type  $i$  de taille  $j$ .
- ❖  $CC_{ijhta}$  : Le coût du combustible du  $k^{ième}$  générateur de type  $i$  de taille  $j$  qui est égal au produit de la consommation spécifique, la puissance délivrée, le nombre d'heure et le coût unitaire.
- ❖  $C_{ij}$ : coût d'investissement d'un générateurs de type  $i$  de taille  $j$ .
- ❖  $CA_{nij}$ : le coût d'investissement (annuité) d'un générateurs de type  $i$  de taille  $j$ .

### Le coût de fonctionnement :

Egal aux coûts du combustible

$$C_f_{ijhta} = CC_{ijhta} \quad (II.3)$$

### Les Coûts d'exploitation :

Est un pourcentage du coût total d'investissement, ce coût est répartie entre frais (de personnel) et frais d'entretien :

- 1- Personnel est de 35% de coût d'exploitation.
- 2- Entretien est de 65% de coût d'exploitation.

### Coût du combustible :

Il est égal au produit de la consommation spécifique, la puissance délivrée ( $P_{ijkta}$ ), la durée d'utilisation moyenne annuelle (h) et le coût unitaire du combustible (Cu DA/MBTU).

$$CC_{ijkta} = CS_{ijkta} * h * Cu \quad (II.4)$$

$CS_{ijkta}$  : Consommation spécifique du  $k^{ième}$  générateur de type  $i$  de taille  $j$ , elle est en fonction de la puissance délivrée.

h: Nombre d'heure de fonctionnement avec la puissance  $p_{ijkta}$ .

Cu : le coût unitaire du combustible (DA/MBtu).

### Le coût d'investissement :

C'est la somme du coût d'achat et celui de l'installation.

### Le coût moyen actualisé :

Le coût moyen actualisé (CMA) est le rapport de la somme actualisée de toutes les dépenses sur l'énergie totale actualisée.

$$CMA = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{CT(t)}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{ET(t)}{(1+i)^t}} \quad (II.5)$$

CT(t) : c'est le coût total pour l'année t.

CA(t) : l'annuité d'amortissement pour l'année t.

CE(t) : coût d'exploitation pour l'année t.

CC(t) : coût du combustible pour l'année t.

ET(t) : énergie totale produite l'année t.

n : nombre d'années d'investissement.

Le coût total annuel  $CT(t)$  de l'énergie produite sera calculé comme suite :

$$CT(t) = CA(t) + CE(t) + CC(t) \quad (II.6)$$

## II.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des problématiques et aux principaux objectifs assignés à nos études. La modélisation des problèmes qui fera l'objet du chapitre suivant.

## CHAPITRE III

---

# Stratégie et modélisation du problème

### III.1. Introduction

Ce chapitre présente la stratégie adoptée, ainsi que la modélisation du problème.

### III.2. Stratégie d'investissement [12]

La SONELGAZ dispose de plusieurs types de générateurs, chaque type possède plusieurs tailles, tous différents les uns des autres en termes de capacité d'alimentation (puissance).

Soit à électrifier une centrale dont les besoins en énergie électrique de la population varient le long de la période d'étude.

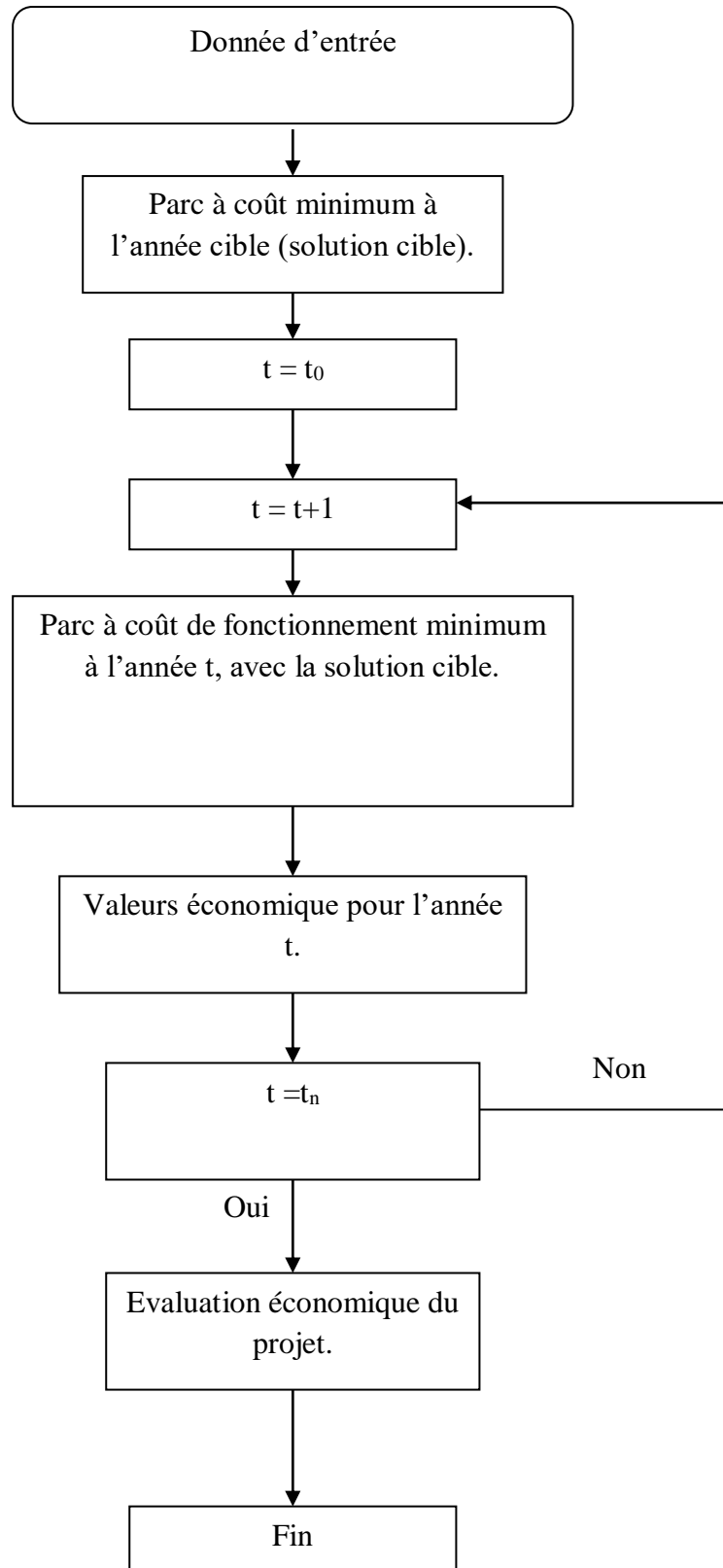
Le problème qui se pose est de déterminer quel est le nombre de chaque type de générateurs et de quelle taille à installer afin de satisfaire la demande sur toute la période de l'étude de sorte à minimiser le coût total, c'est-à-dire le coût d'investissement, d'exploitation et le coût de fonctionnement.

La demande d'énergie électrique augmente forcément chaque année, c'est-à-dire qu'elle atteint son maximum à la fin de la période d'étude, la stratégie à adopter est de trouver le meilleur parc (définir les groupes à installer) qui satisfait la demande de la dernière année de l'étude (l'année cible), puis revenir à l'année du début de l'étude et parcourir les années une après l'autre et de définir (si besoin y a) les groupes à ajouter (en minimisant le coût de fonctionnement) parmi les groupes trouvés pour l'année cible.

#### Schéma simplifié de la stratégie

L'approche proposée est de traiter le problème de fonctionnement, puis de traiter le problème global.

Schéma simplifié de la stratégie est donné par l'organigramme suivant :



Organigramme III.1. Schéma simplifié de la stratégie

### III. 3. Modélisation du problème du coût de fonctionnement

#### III.3.1. La courbe de charge prévisionnelle

On peut estimer la demande en énergie électrique d'une population à l'année  $n+1$ , pour cela on se base sur la courbe de charge de l'année  $n$ .

L'observation de l'augmentation de la consommation en énergie électrique des années passées permet de conclure que l'accroissement de la demande est linéaire avec un taux annuel constant.

#### Efficacité de l'estimation de la courbe de charge [12] :

- ✓ Prise en compte de toutes les charges : Il est nécessaire de considérer lors de l'estimation toutes les charges, même celles qui nous paraissent parfois insignifiantes, car l'addition de celles-ci peut être importante, afin d'éviter le sous dimensionnement.
- ✓ Les charges peuvent avoir différents niveaux : Les charges (équipements électriques) n'ont pas toujours la même valeur de puissance, certaines ont une puissance repos (stand-by value) et une puissance maximale (surge value) ; Ceci dépend évidemment du mode de fonctionnement de ces appareils.
- ✓ Nouvel utilisateur de l'électricité : Un nouvel utilisateur d'électricité paraît au début plus prudent et même économe dans sa consommation pour l'électricité mais très vite il s'habitue et demande plus d'énergie pour ses : lampes, téléviseurs, ordinateurs, etc.
- ✓ Difficulté d'estimation d'une puissance : Il est difficile et surtout très coûteux d'estimer exactement les besoins en électricité de chaque utilisateur, car souvent même si on arrive à connaître les puissances des appareils, on est loin de connaître la durée d'utilisation (ou d'opération) de chaque équipement électrique à cause du caractère aléatoire de son usage.

La forme de la courbe utilisée dans la suite de ce mémoire :

C'est une courbe horaire de demande d'électricité d'une population durant une année et est de la forme :

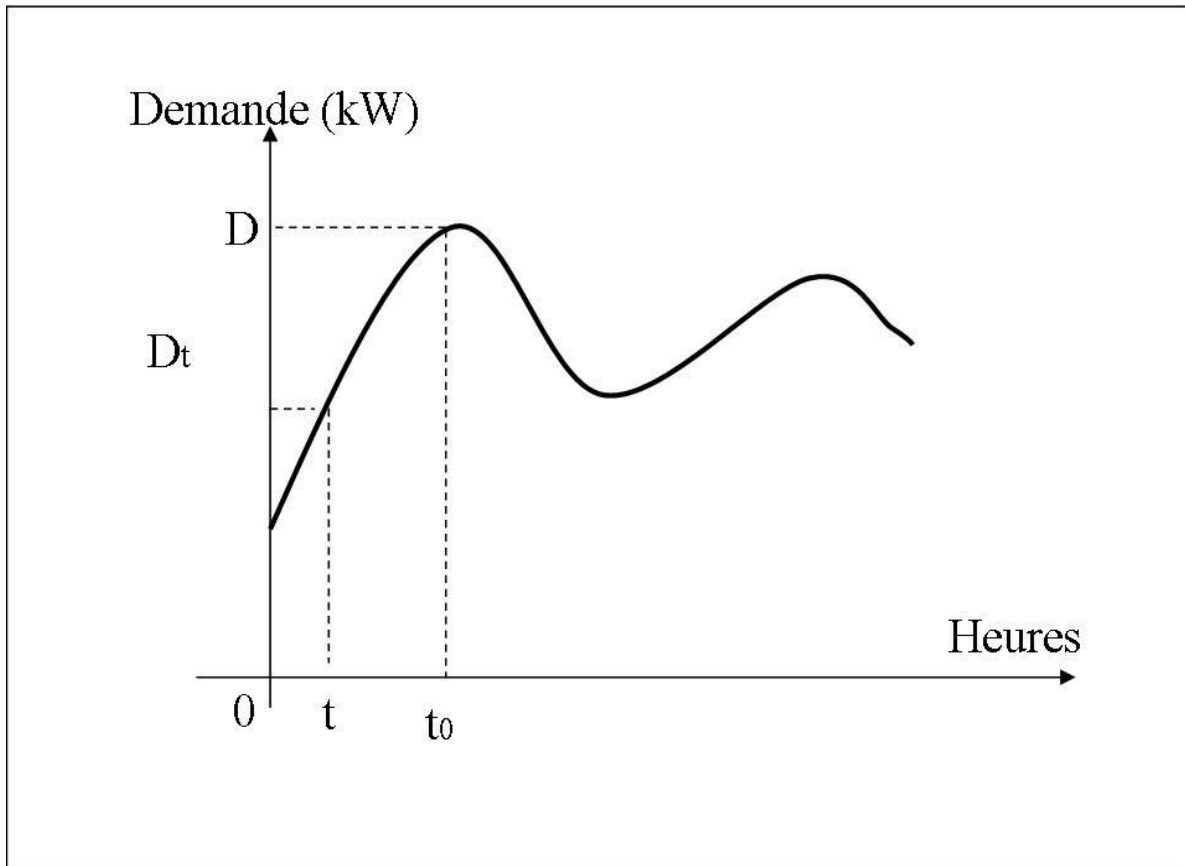


Figure III.1. Forme d'une courbe de demande prévisionnelle [12].

D: la demande maximale de toute l'année (elle correspond à l'instant  $t_0$ ) en kW.

$D_t$ : la demande à l'instant  $t$ .

#### La Demande additionnelle ( $D_{add}$ en kW) :

La demande additionnelle (ce qu'on doit satisfaire), est une puissance qui est égale à la différence entre la demande maximale ( $D_{max}$ ) durant toute la période d'investissement et la puissance développable d'une centrale ( $P_{dc}$ ). Celle-ci correspond à l'année où la demande est atteinte.

$$D_{add} = D_{max} - P_{dc} \quad (III.1)$$

$D_{max}$ : La demande maximale durant toute la période d'investissement.

### III.3.2. La courbe de consommation spécifique [11]

Pour les types diesel et TG, la consommation spécifique dépend directement de la puissance fournie par le générateur, cette information est cruciale dans la minimisation des

coûts de fonctionnement, dans le sens où le coût de fonctionnement varie avec la variation de la quantité du combustible consommée par les générateurs. C'est-à-dire que :

$$CS_{ijkta} = f(P_{ijkta}) \quad (III.2)$$

La courbe de CS/P est de la forme suivante :

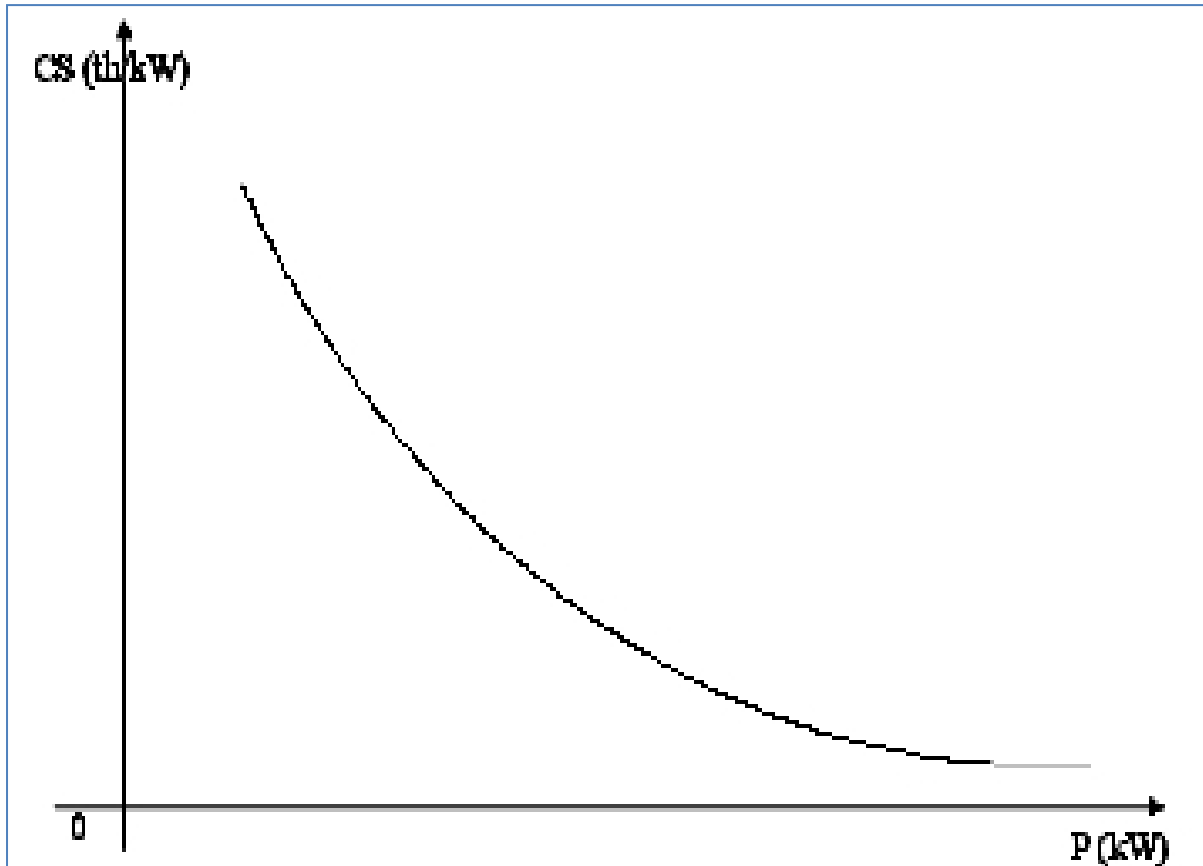


Figure III.2 : La forme de la courbe de CS/P

### III.3.3. Modélisation du problème

#### III.3.3.1. Choix des variables de décisions

Etant donné une centrale. Le problème du coût de fonctionnement de cette centrale consiste à trouver le coût de fonctionnement optimal, en minimisant le coût de combustible (on utilise la courbe de consommation spécifique/puissance).

La demande est extraite de la courbe de charge prévisionnelle annuelle (chaque heure « t » de l'année « a » est associée à une demande  $D_{ta}$ ).

Dans le modèle suivant on fixe une année a, et une heure  $[t, t + 1]$  :

La possibilité d'installer certains moyens de production dans une centrale, telle que la TG, les panneaux solaires et les éoliennes, demande la présence de certaines conditions (présence du gaz naturel pour le TG, le climat et la surface pour les panneaux solaires et les éoliennes).

En conséquence, on définit un paramètre  $EM_i$  qui vaut 1 si les conditions d'installation du moyen  $i$  sont réunies et vaut 0 dans le cas contraire.

$$EM_i = \begin{cases} 1 & \text{si les conditions d'installation du moyen } i \text{ sont réunies} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Avec :

$i = 1$ : représente le type diesel.

$i = 2$ : représente le type turbine à gaz.

$i = 3$ : représente le type panneau solaire.

$i = 4$ : représente le type éolien.

Dans une centrale, il peut y avoir jusqu'à 12 groupes, d'où l'utilité de définir une variable bivalente, qui sera égale à 1 si le générateur fonctionne et 0 si il est en repos.

$$x_{ijkta} = \begin{cases} 1 & \text{si le } k^{ieme} \text{ générateur de type } i \text{ de taille } j \text{ est en marche pendant l'heure } [t, t + 1]. \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

On définit aussi une variable qui nous donne la puissance fournie par un générateur à l'heure  $[t, t + 1]$ .

$P_{ijkta}$  : Puissance délivrée par le  $k^{ieme}$  générateur de type  $i$  de taille  $j$  à l'heure  $[t, t + 1]$  de l'année  $a$ .

### III.3.3.2. Contraintes

Soient une année  $a$  et une heure  $[t, t + 1]$ . Le but est de satisfaire la demande de l'année  $a$  pendant l'heure  $[t, t + 1]$ , sachant qu'un générateur peut fournir une puissance  $P_{ijkta}$  qui est comprise entre une valeur maximale et une valeur minimale.

Soient :

$n$  : Le nombre de type de générateurs dans la centrale ( $n=4$ ).

$m_i$ : Le nombre de tailles des générateurs de type  $i$  dans la centrale, avec  $i=1, \dots, n$ .

$r_{ij}$ : Le nombre de générateurs de type  $i$  de tailles  $j$  dans la centrale, avec  $i=1, \dots, n$  et

$j = 1, \dots, m$ .

**Min<sub>ij</sub>**: La puissance minimale délivrée par le générateur de type *i* de tailles *j*, avec *i* = 1, ..., *n* et *j* = 1, ..., *m*.

**Max<sub>ij</sub>**: La puissance maximale délivrée par le générateur de type *i* de tailles *j*, avec *i* = 1, ..., *n* et *j* = 1, ..., *m*.

D’où on a deux groupes de contraintes :

**1- Contrainte de la demande :**

La puissance délivrée par la centrale à l’heure [*t*; *t* + 1] de l’année *a*, est exprimée comme suit:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} EM_i * x_{ijkta} * P_{ijkta} \quad (III.3)$$

La demande à satisfaire c’est *D<sub>ta</sub>* qui est la demande prévisionnelle de l’année *a* pendant l’heure [*t*; *t*+1]:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} EM_i * x_{ijkta} * P_{ijkta} \geq D_{ta} \quad (III.4)$$

**2- Contraintes de fonctionnement :**

Un générateur *k* de type *i* est de taille *j* fournis une puissance comprise entre **Min<sub>ij</sub>** et **Max<sub>ij</sub>**.

D’où la contrainte s’écrit :

$$\begin{aligned} Min_{ij} &\leq P_{ijkta} \leq Max_{ij} & i &= 1, \dots, n, \\ j &= 1, \dots, m_i & & \end{aligned} \quad (III.5)$$

**III.3.3.3. Fonction Objectif**

L’objectif est de minimiser le coût de fonctionnement qui est égal au coût du combustible.

$$Z_{ta}(min) = \sum_{i=1}^4 EM_i * Cu_i \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} x_{ijkta} * CS_{ijkta} * P_{ijkta} \quad (III.6)$$

**CS<sub>ijkta</sub>** : Consommation spécifique du *K<sup>ieme</sup>* générateur de type *i* de taille *j* pendant l’heure [*t*; *t* + 1] de l’année *a*.

**CE<sub>ijkta</sub>** : Coût d’exploitation (coût du personnels +coût de maintenance) du *K<sup>ieme</sup>* générateur de type *i* de taille *j* pendant l’heure [*t*; *t* + 1] de l’année *a*.

$Cu_i$  : Le coût unitaire du combustible du moyen de production  $i$  (DA/MBtu).

**Le résumé du modèle :**

Pour  $t = \overline{1:87601}$  et  $a=1, 2,3$ .

$$\begin{cases}
 Z_{ta}(\min) = \sum_{i=1}^4 EM_i * Cu_i \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} x_{ijkta} * CS_{ijkta} * P_{ijkta} \\
 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} EM_i * x_{ijkta} * P_{ijkta} \geq D_{ta} \\
 Min_{ij} \leq P_{ijkta} \leq Max_{ij} \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m_i \\
 EM_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, n, \\
 x_{ijkta} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m, \quad K = 1, \dots, r_{ij}
 \end{cases} \quad (III.7)$$

### III.3.3.4. Linéarisation des contraintes

On pose :

$$y_{ijkta} = x_{ijkta} * P_{ijkta} \quad (III.8)$$

Donc si  $(x_{ijkta} = 0)$  alors  $y_{ijkta} = 0$

Si non

$$Min_{ij} \leq y_{ijkta} = p_{ijkta} \leq Max_{ij} \quad (III.9)$$

Le programme linéaire correspondant est :

$$\begin{cases}
 y_{ijkta} \leq Max_{ij} * x_{ijkta} \\
 y_{ijkta} \leq Min_{ij} * x_{ijkta}
 \end{cases} \quad (III.10)$$

Et par suite notre programme de fonctionnement s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 Z_{ta}(\min) = \sum_{i=1}^n EM_i * Cu_i \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} CS_{ijkta} * y_{ijkta} \\
 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} EM_i * y_{ijkta} \geq D_{ta} \\
 Min_{ij} \leq P_{ijkta} \leq Max_{ij} \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m_i \\
 EM_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, n \\
 x_{ijkta} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m \quad K = 1, \dots, r_{ij}
 \end{array} \right. \quad (III.11)$$

### III.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des formulations mathématiques de nos problèmes et par suite nous avons obtenu des représentations de la réalité qui permettra de mettre en évidence les différents paramètres du chaque problème.

L'analyse du premier modèle mathématique du problème posé, montre qu'on est en présence d'un problème non linéaire, à variable mixte.

Après l'étape modélisation du problème, vient l'étape choix de la méthode de résolution, c'est le but du chapitre suivant.

# CHAPITRE IV

---

## Méthodes de résolution

## IV.1. Introduction

Après modélisation, en tenant compte des hypothèses, données, paramètres et contraintes de problème posé, nous avons abouti à des programmes linéaire et non linéaire à variables mixte positives ou nulles, entiers et réelles.

Compte tenu de la complexité de notre programme mathématique, la résolution de notre programme s'est faite par deux méthodes :

- 1- En un premier lieu nous avons utilisé le logiciel Lingo8.0 qui utilise le principe de séparation et évaluation pour résoudre les programmes non linéaires.
- 2- Ensuite, nous avons décrit une heuristique qui nous permet de simplifier le problème de départ à un problème simple à résoudre.

## IV.2. Programmation mathématique

### IV.2.1. Formulation générale de programmation mathématique [9] :

Un programme mathématique (PM) est un problème d'optimisation de la forme :

$$(PM) \left\{ \begin{array}{l} \min_{x \in \mathfrak{R}^n} f(x) \\ s.c \\ D = \{x \in \Omega \subseteq \mathfrak{R}^n / g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m \text{ et } h_j(x) = 0, j = 1, \dots, p\} \end{array} \right.$$

Où  $f : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$  est une fonction continûment différentiable appelée fonction objectif et  $D$  est appelé ensemble des solutions réalisables, avec  $g$  et  $h$  sont des fonctions définies de  $\mathfrak{R}^n$  dans  $\mathfrak{R}$ . La formulation mathématique (PM) signifie que l'on cherche à trouver la solution  $x^* \in D$  dont la valeur de la fonction objectif est la plus petite.

Un point  $x^* \in D$  est une solution optimale locale de (PM) si :  $\exists V$  (voisinage) de  $x^*$  tel que :  $f(x^*) \leq f(x), \forall x \in V$  et on note par  $\underset{D}{loc \min} f(x)$  l'ensemble des solutions optimales locales de (PM).

### IV.2.2. Qualification des contraintes [9]

➤ Si  $D$  est un polyèdre convexe (i.e. : toutes les fonctions contraintes sont affines), alors par définition les contraintes sont qualifiées en tout point réalisable.

- Si  $D$  est convexe (i.e. :  $g_i$  convexe et  $h_j$  affines) et  $\text{int } D \neq \emptyset$  les contraintes sont qualifiées partout. C'est la condition de Slater.
- Une contrainte d'inégalité  $g_i \leq 0$  est dite saturée (ou active) en  $x^* \in D$  et  $g_i(x^*) = 0$

De ce fait, une contrainte d'égalité  $h_j = 0$  est par définition saturée en tout point  $x^* \in D$ . Les contraintes sont qualifiées en  $x^* \in D$  si les gradients de toutes les fonctions des contraintes saturées en  $x^*$  sont linéairement indépendants.

### IV.2.3. Exemple d'illustration

Un fabricant produit 2 types de produits dénotés par A et B à partir trois matières premières M1, M2 et M3. Chaque produit doit respecter les contraintes suivantes :

Désignation	Produit A	Produit B
M1	2	1
M2	1	2
M3	0	1

Tableau.VI.1. Tableau des contraintes

Les matières premières sont en quantité limitée : 800 unités de M1, 700 unités de M2 et 300 unités de M3. La vente des A rapportent 4\$ par unité et les produits B 5\$.

Le problème consiste à établir un plan de production optimal.

- **Modélisation du problème :**

$$\text{Maximiser } [4X_A + 5X_B]$$

S.C

$$\begin{cases} 2X_A + X_B \leq 800 \\ X_A + 2X_B \leq 700 \\ X_B \leq 300 \\ X_A \geq 0, X_B \geq 0 \end{cases}$$

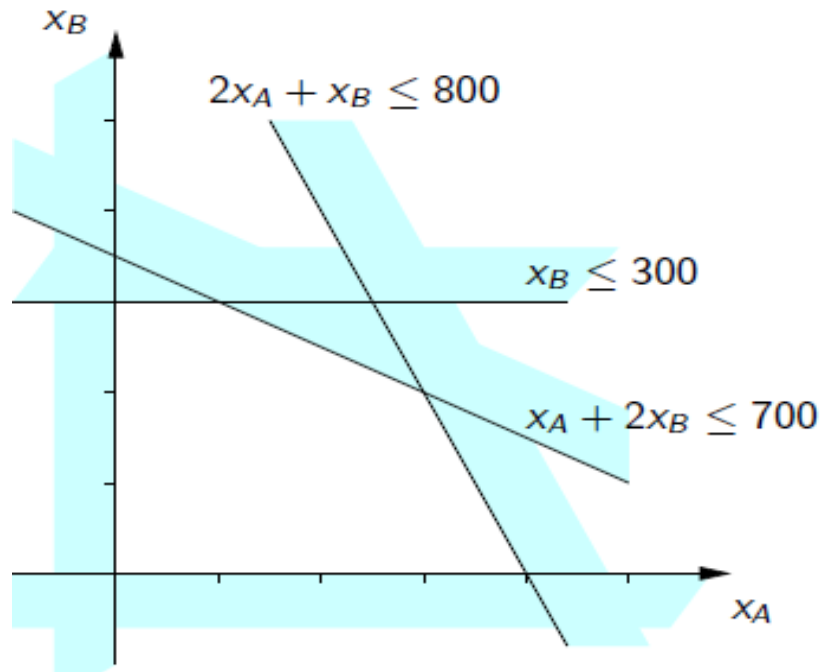


Figure IV.1. Représentation graphique pour l'exemple proposé

### IV.3. Méthode de résolution d'un programme mathématique

#### IV.3.1. Programmation linéaire à variables mixtes [8, 7]

La programmation linéaire en variables mixtes consiste à optimiser une fonction linéaire comportant à la fois des variables réelles et des variables entières, ces variables étant soumises à un ensemble de contraintes linéaires.

L'écriture générale d'un programme linéaire en variables mixtes (PLVM) est donnée par P1:

$$\text{P1} \left\{ \begin{array}{ll} \max \sum_{j=1}^n C_j x_j & \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i & i = 1, \dots, p \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i & i = p + 1, \dots, n \\ x_j = \{0,1\} & j = 1, \dots, r \\ x_j \in N & j = r + 1, \dots, s \\ x_j \geq 0 & j = s, \dots, n \end{array} \right.$$

Si toutes les variables devaient prendre des valeurs entières on aurait un programme linéaire en variables entières (PLVE) ou en nombres entiers. Si toutes les variables devaient

prendre la valeur 0 ou 1, on aurait un programme linéaire en variables bivalentes (PLVB) ou en variables binaires. On peut toujours supposer, comme nous l'avons fait dans P1, que toutes les variables d'un PLVM sont positives ou nulles. En effet, toute variable non contrainte en signe peut s'exprimer comme la différence de deux variables non négatives. Ainsi, une variable appartenant à l'ensemble des nombres réels peut s'exprimer comme la différence de deux variables appartenant à l'ensemble des nombres réels positifs ou nuls, et une variable appartenant à l'ensemble des entiers relatifs, comme la différence de deux variables appartenant à l'ensemble des entiers naturels [8].

### IV.3.2. Résolution des programmes linéaires en variables mixtes

Un grand nombre de problèmes d'optimisation, peuvent être formulés et résolus en utilisant la programmation linéaire en variables entières ou en variables mixtes. Nous allons présenter un seul type d'algorithmes permettant de résoudre de tels programmes.

#### IV3.2.1. Procédure de séparation et évaluation [9]

Dans la résolution d'un programme linéaire à variable mixte on peut penser, intuitivement, à énumérer toutes les solutions, mais le temps de résolution peut atteindre une durée colossale.

Il nous faut à cet effet trouver une autre stratégie pour résoudre de tels problèmes. Le principe de ces procédures ne constitue qu'un cadre général à l'intérieur duquel les différents algorithmes sont spécifiés quand on précise d'une part comment sont définis les sous-ensembles en lesquels l'ensemble fondamental  $S$  est progressivement décomposé et d'autre part comment on procède au choix du sous-ensemble à traiter : comment on effectue l'évaluation et la séparation.

##### 1- Principe de séparation :

Nous allons illustrer le principe de séparation à partir du problème de sac à dos (généralisé) :

#### Description du problème de sac à dos [10]

Supposons que nous désirions constituer le contenu d'un sac à dos et que nous ayons envie d'y mettre  $n$  objets de volumes respectifs  $v_1, \dots, v_n$ . Ayant constaté que la somme des volumes des  $n$  objets était supérieure au volume  $V$  du sac à dos, nous affectons à chaque objet une utilité  $u_1, \dots, u_n$ . Tous les coefficients  $u_i, v_i$  et  $V$  sont supposés strictement positifs.

Nous modélisons alors le problème en introduisant  $n$  variables dites *variables de décision*  $x_1, \dots, x_n$ , à valeurs dans  $\{0, 1\}$ , la valeur 0 attribuée à la variable  $x_i$  signifiant que nous n'emporterons pas l'objet  $i$ , la valeur 1 que nous le prenons.

Si nous voulons avoir le sac le plus utile, nous voyons que nous sommes amenés à résoudre le problème suivant :

$$\begin{cases} \text{Max } \sum_{j=1}^n u_j \cdot x_j \\ \sum_{j=1}^n v_j \cdot x_j = V \\ x_j \in \{0, 1\} \text{ pour } 1 \leq j \leq n \end{cases} .$$

Il s'agit là d'un problème de programmation linéaire en variables bivalentes (on dit aussi « en 0-1 ») à une seule contrainte, connu sous le nom de *problème du sac à dos*, parfois qualifié de *binnaire*.

On parlera encore de problème de sac à dos (ou parfois de *problème de sac à dos généralisé*) lorsque la contrainte reste unique mais que les variables peuvent être entières positives ou nulles et non plus nécessairement bivalentes. C'est ce problème (variables entières) que nous considérons dans ce qui suit.

On peut aussi considérer la fonction objective dans le cas de minimisation par exemple :

« *Optimisation du coût de construction des bacs de stockage* » [11] :

#### **Description du problème :**

Le problème consiste à établir un modèle mathématique pour minimiser le coût de construction des bacs de stockage, en tenu compte la capacité nécessaire de stockage de fuel, et le coût de construction des bacs pour chaque bac en fonction de sa capacité.

Ces réservoirs (bacs) sont constitués d'un ensemble de tôle d'acier ou carbone, assemblés par soudage et est utilisé sous une pression voisine de la pression atmosphérique.

Ils sont constitués de :

- Un fond, généralement concave ou convexe
- Une robe ou virole

- Un toit qui peut être fixe ou flottant
- Un ensemble d'accessoires

La figure suivante nous présente un bac de stockage

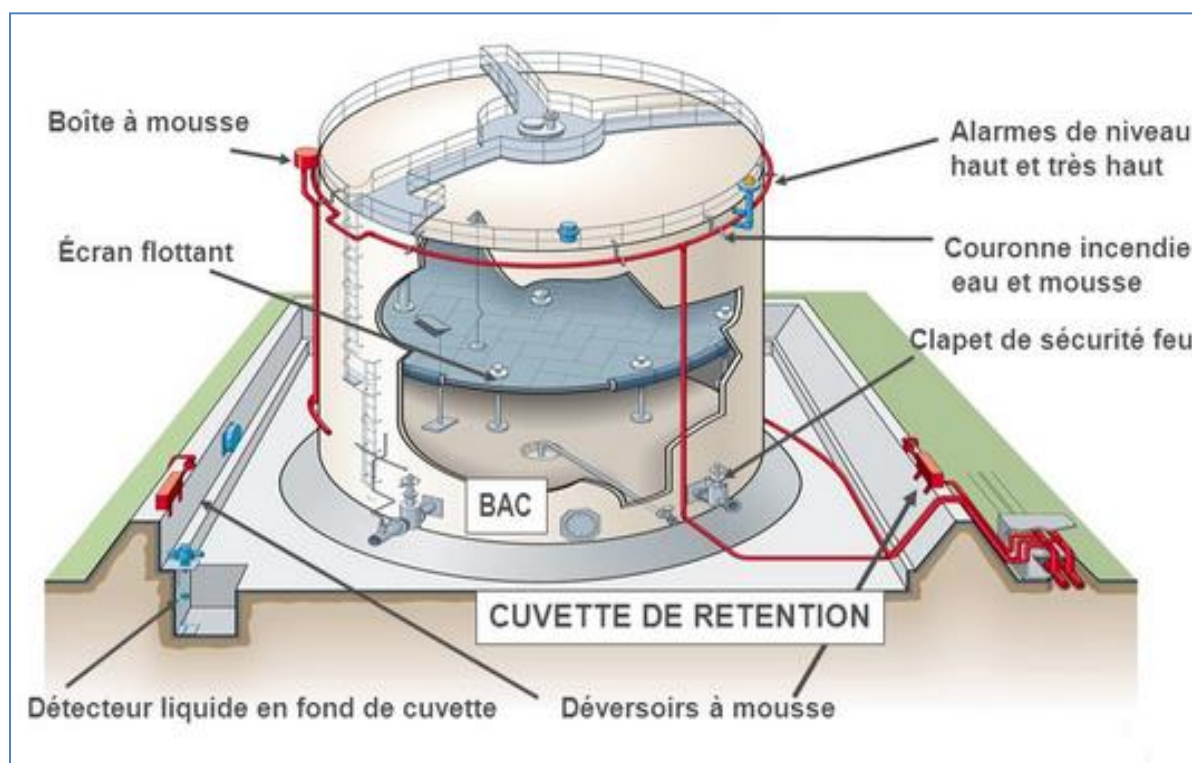


Figure. IV3.2. Coupe simplifiée de bac de stockage; source [10]

Notons par :

- $m$  : nombre de bacs de capacité  $K$
- $l$  : Indices des nouveaux bacs de stockage  $l = 1, \dots, m$
- $k$  : Indices des centres de stockages  $k = 1, \dots, \bar{k}$

Et considérons les données suivantes :

- $Q$  : La capacité de stockage du centre trouvé dans la première partie du problème.
- $D_l$  : Le Cout de construction du bac  $l$ ,  $D_l \geq 0$ ,  $l = 1, \dots, m$
- $K_l$  : La capacité de stockage de bac  $l$ ,  $l = 1, \dots, m$
- $P_k$  : Le profile de centre de stockages.

Il existe une seule variable  $S_l$  qui représente le nombre de bac nécessaire à construire en fonction de sa capacité, où  $S_l \in \mathbb{N}$

$S_l$  : Nombre de bacs de capacité  $K_l$   $l = 1, \dots, m$

➤ **Contraintes et fonction objectif du problème**

Il y a qu'une seule contrainte qui est décrit comme suit :

$$\sum_{l=1}^m K_l S_l \geq Q$$

Dans cette partie du problème on cherche à minimiser le coût de construction des nouveaux bacs donc la fonction objectif s'écrit comme suite :

D'où le modèle est comme suite :

$$\text{Minimiser} \left[ \sum_{l=1}^m D_l S_l \right]$$

s.c

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^m K_l S_l \geq Q \\ S_l \in N \\ D_l \geq 0, \quad l = 1, \dots, m \end{cases}$$

**Exemple numérique :**

Considérons le problème suivant :

$$\text{Minimiser} [10x_1 + 8x_2 + 5x_3]$$

s.c

$$\begin{cases} 6x_1 + 5x_2 + 4x_3 = 9 \\ S_j \in N, \text{ pour } 1 \leq j \leq 3 \end{cases}$$

Pour cet exemple, nous pouvons appliquer les critères de branchement suivants :

- Une première séparation sera effectuée selon les valeurs de  $x_1$  ; comme, d'après la contrainte,  $x_1$  ne peut prendre que les valeurs 0 ou 1, nous séparons l'ensemble de toutes les solutions associées à la racine en deux sous-ensembles : l'un contient toutes les solutions pour lesquelles  $x_1$  vaut 0 et l'autre contient celles pour lesquelles  $x_1$  vaut 1 ;

- Une deuxième séparation sera faite de la même façon suivant les valeurs possibles de  $x_2$ , à savoir 0 ou 1.
- Enfin, une troisième séparation aura lieu selon les valeurs possibles de  $x_3$  : 0, 1 ou 2, sauf pour le sommet vide correspondant aux choix  $x_1 = x_2 = 1$ .

Le dessin ci-dessous montre ce qu'est l'arborescence obtenue pour notre exemple :

Les carrés y représentent les cas pour lesquels les trois variables sont entièrement déterminées. Les sommets de l'arborescence barrés d'une croix en sont les sommets vides.

Il suffit, pour connaître la solution optimale, de calculer la valeur de la fonction objective pour toutes les feuilles non vides de l'arborescence obtenue.

Cette méthode peut être améliorée pour éviter l'examen de certaines branches. Il existe en effet deux raisons qui permettent de ne pas développer un sommet de l'arborescence : lorsque l'on peut montrer que ce sommet ne contient pas la solution optimale et lorsque que l'on sait résoudre directement le problème correspondant à ce sommet.

Le principe d'évaluation et la borne peuvent fournir de telles indications.

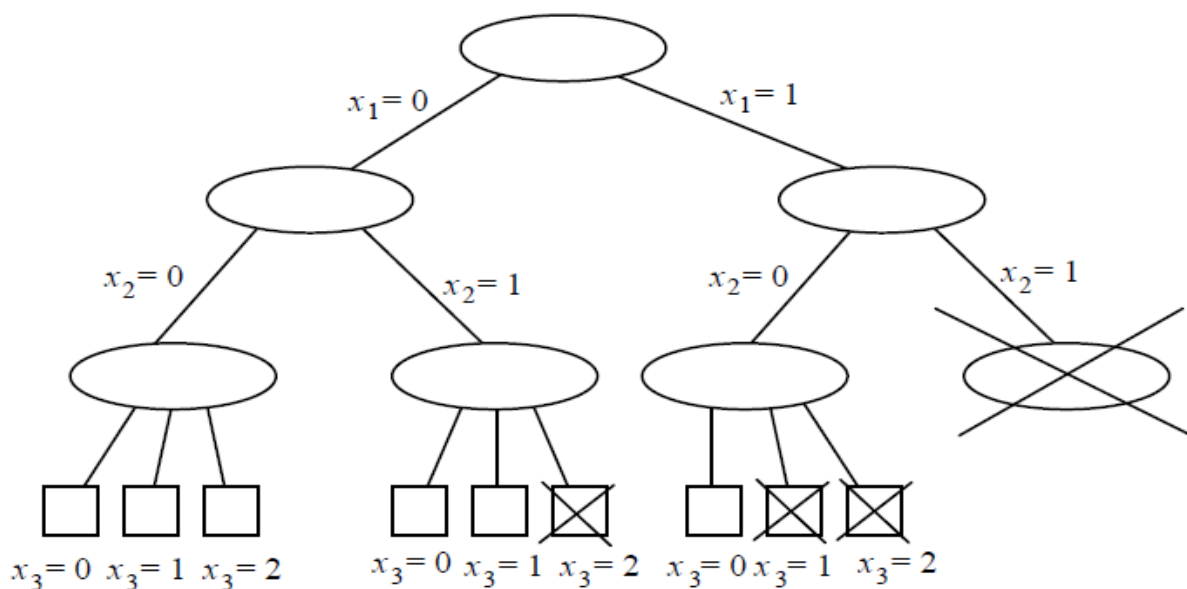


Figure IV.3. L'arborescence obtenue pour notre exemple

## 2- Principe d'évaluation [7]

L'objectif de cette procédure est de ne pas parcourir tous l'arbre afin d'y trouver la solution optimale.

Supposons qu'on ait une fonction  $f$  dite fonction d'évaluation, qui pour un sommet  $S_{ij}$  nous donne un minorant du coût  $Z = cx$  de la meilleure solution contenue dans  $S(i)$ .

Ce problème peut être exprimé par la formule suivante :

$$f(s_{ij}) \leq \min(cx), \text{ pour } x \in S(i).$$

Pour chaque sommet de l'arbre on a alors une minoration de ce que peut contenir ce sous ensemble comme solution.

Soit  $X_s$  une solution du problème et  $Z_s = cx_s$  son coût.

Si en parcourant l'arbre on trouve  $f(s_{ij})$ , alors  $f(s_{ij}) > Z_s$  donc  $S_{ij}$  ne peut contenir de meilleures solutions que  $X_s$  puisque  $f(s_{ij})$  était déjà un minorant de ce que pouvait contenir  $S_{ij}$  comme solution.

On ne parcourt donc les sommets de l'arbre que si on a  $f(s_{ij}) \leq Z_s$  et on réduit de ce fait le nombre de sommets à examiner.

## IV.4. Les méthodes approchées [7, 8]

### IV.4.1. Méthode Heuristique

**Définition [7] :**

Heuristique (du grec *heuriskêin*, « trouver ») est un terme de didactique qui signifie l'art d'inventer, de faire des découvertes (Litttré). C'est en sociologie, une discipline qui se propose de dégager les règles de la recherche scientifique (Larousse).

En optimisation combinatoire, théorie des graphes et théorie de la complexité, une heuristique est un algorithme qui fournit rapidement (en temps polynomial) une solution réalisable, pas nécessairement optimale, pour un problème d'optimisation NP-difficile.

Une heuristique, où méthode approximative, est donc le contraire d'un algorithme exact trouve une solution optimale pour un problème donné. L'intérêt de l'heuristique étant que pour les problèmes NP-difficiles, la plupart des algorithmes exacts connus sont de complexité exponentielle et donc sans aucun intérêt en pratique. On utilise une heuristique pour obtenir une première solution réalisable dans un processus de résolution exacte.

Généralement une heuristique est conçue pour un problème particulier, en s'appuyant sur sa structure propre, mais les approches peuvent contenir des principes plus généraux. On parle de métaheuristique pour les méthodes approximatives générales, pouvant s'appliquer à différents problèmes (comme le recuit simulé par exemple) [8].

La qualité d'une heuristique peut s'évaluer selon deux critères scientifiques :

1) **Critère pratique, ou empirique** [7]:

On implémente l'algorithme approximatif et on évalue la qualité de ses solutions par rapport aux solutions optimales(ou aux meilleures solutions connues). Ceci passe par la mise en place d'un benchmark (ensemble d'instances d'un même problème accessible à tous).

2) **Critère mathématique** [7]:

Il faut s'assurer que l'heuristique garantit des performances. La garantie la plus solide est celle des algorithmes approchés, sinon il est intéressant de démontrer une garantie probabiliste, lorsque l'heuristique fournit souvent, mais pas toujours, de bonnes solutions.

#### **IV.4.2. Les algorithmes génétiques [8]**

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes d'évolution de la nature : croisements, mutations, sélections, etc. Ils appartiennent à la classe des algorithmes évolutionnaires.

### IV.4.2. 1. Principe des algorithmes génétiques [8]

Le but des AG est de déterminer les extrêmes d'une fonction  $f : X \rightarrow \mathfrak{R}$ , où  $X$  est un ensemble quelconque appelé espace de recherche et  $f$  est appelée fonction d'adaptation ou fonction d'évaluation ou encore fonction fitness. La fonction agit comme une «boîte noire» pour l'AG. Aussi des problèmes très complexes peuvent être approchés par programmation génétique sans avoir de compréhension particulière du problème.

### IV.4.2.2. Organigramme de fonctionnement de la méthode génétique [8]

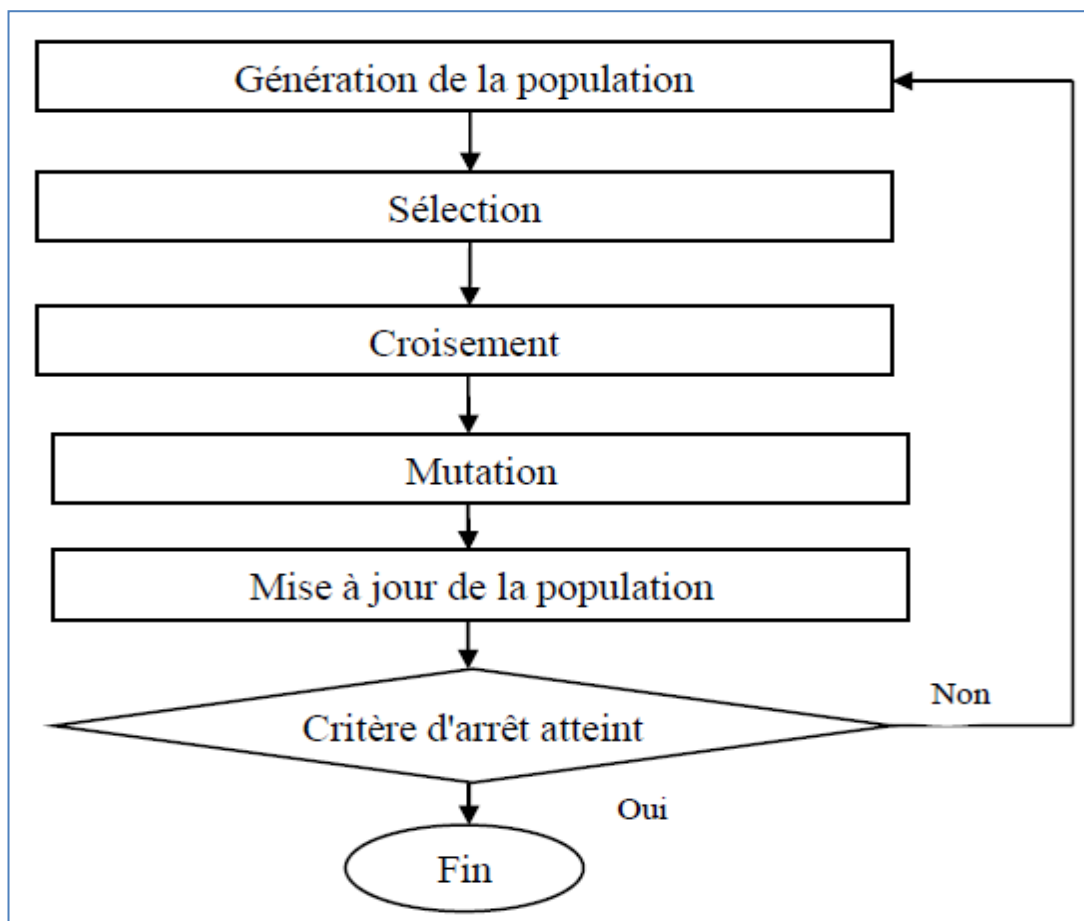


Figure IV.4. Etapes d'un algorithme génétique

## **IV.5. Conclusion**

Ce chapitre a été consacré aux méthodes de résolutions adoptées à notre problème, une définition complète des deux méthodes utilisées a été donnée tout au long de ce chapitre.

Une fois les méthodes de résolution adaptées à notre problème il ne reste plus que l'implémentation de ces dernières, le dernier chapitre illustre cette implémentation, et donne une description minutieuse du logiciel développé, ainsi que les résultats obtenus.

# CHAPITRE V

---

## Résolution du problème et Application numérique

## V. 1. Introduction

Dans ce présent chapitre, nous allons résoudre les problématiques présentées dans les chapitres précédents. Nous présentons dans ce qui suit les programmes de résolution avec les langages LINGO et DELPHI [10].

## V.2. Résolution du problème de coût de fonctionnement

La nature du programme mathématique dépend de la fonction objective, puisque les contraintes sont linéaires. La fonction objective peut être une fonction linéaire comme elle peut être non-linéaire, tout dépend de la manière d'utiliser la courbe de consommation spécifique.

En effet, en pratique SONELGAZ, utilise la moyenne de consommation spécifique du groupe. La méthode proposée c'est l'utilisation de la moyenne ce qui donne l'avantage que la fonction objectif devient linéaire.

### V.2. 1. Résolution en utilisant la consommation spécifique moyenne

Dans ce paragraphe  $CS_{ijkta}$  sont des valeurs réelles.

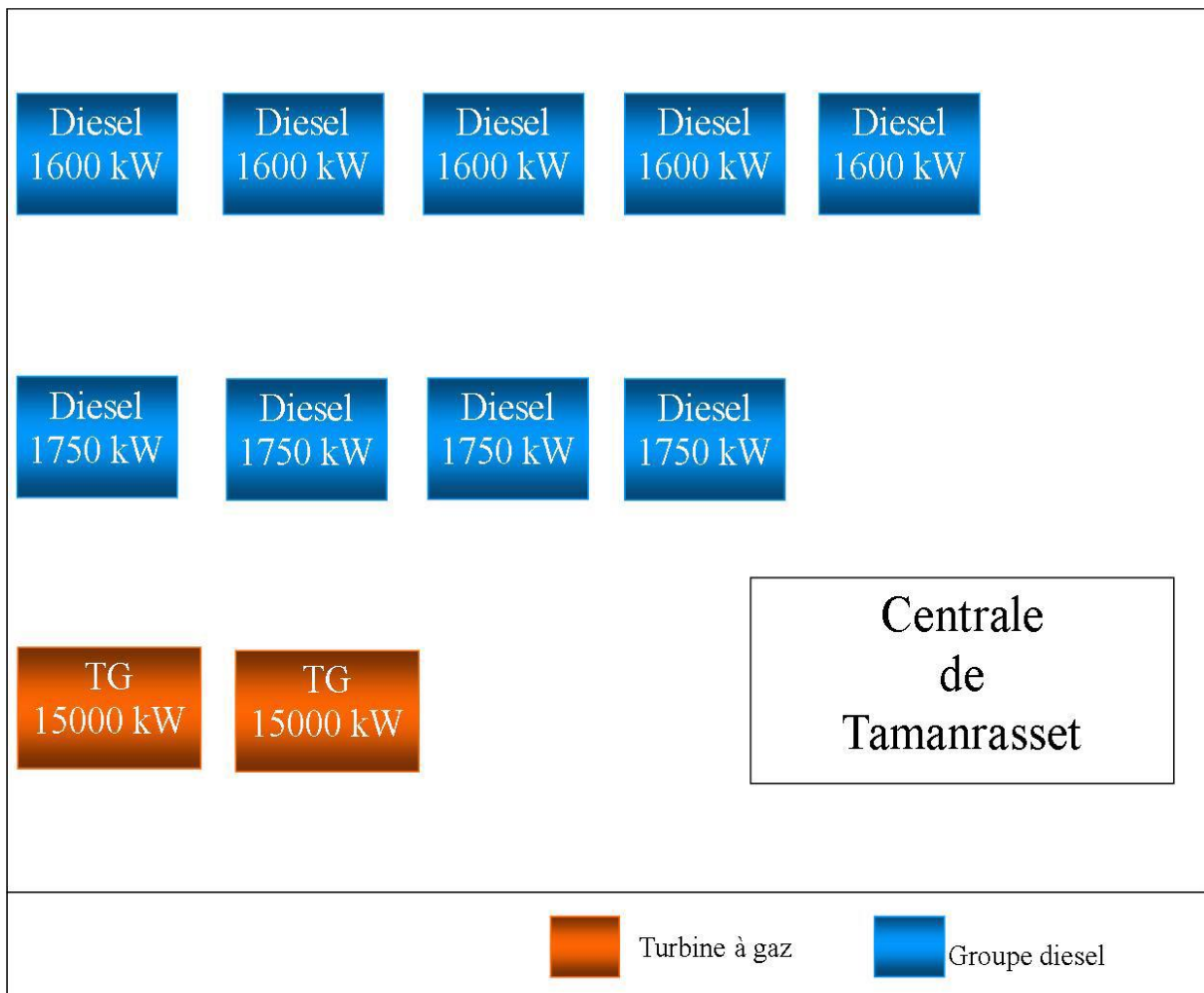
$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{ta}(\min) = \sum_{i=1}^4 EM_i * Cu_i \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} CS_{ijkta} * y_{ijkta} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{r_{ij}} EM_i * y_{ijkta} \geq D_{ta} \\ Min_{ij} * x_{ijkta} \leq y_{ijkta} \leq Max_{ij} * x_{ijkta} \quad i = 1, n, \quad j = 1, \dots, m_i \\ EM_i \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n \\ x_{ijkta} \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m, \quad K = 1, \dots, r_{ij} \end{array} \right. \quad (V.1)$$

Le modèle (V. 1) est un programme mathématique linéaire à variable mixte, car la fonction objectif est linéaire est les contraintes linéaires avec des variables réelles et des variables bivalentes. La méthode de résolution que nous adoptons c’est la méthode Branch-and-Bound, qu’on utilisera à travers le logiciel LINGO.

**V.2.2. Application sur la centrale de Tamanrasset en utilisant logiciel LINGO**

Le LINGO est un logiciel conçu pour résoudre les modèles d’optimisation linéaires, non linéaires et en nombres entiers.

**Exemple :** Soit la centrale de Tamanrasset [12], dans laquelle il existe deux types (deux moyen de production)de générateurs, le Diesel et le TG. La centrale est schématisée comme suit :



**Figure V.1. La centrale de Tamanrasset**

Les données liées à la centrale de Tamarrasset sont :

- La consommation spécifique moyenne est la moyenne entre la quantité de combustible maximale (elle correspond à la puissance minimale fournie) et la quantité minimale (elle correspond à la puissance maximale fournie) consommée par un générateur.
- Un générateur donné fournit une puissance comprise entre sa puissance développable maximale et sa puissance développable minimale (60% de puissance développable maximale pour le Diesel, et 40% pour le TG).
- Une demande prévisionnelle à l'heure  $[t, t+1]$  de l'année  $a$ .
- Le coût d'exploitation qui est un coût fixe qui représente un pourcentage (4%) du coût d'investissement, il comprend le coût de maintenances et le coût de personnel.
- Le coût unitaire du combustible dépend selon la nature du combustible :

➤ **Pour le Gaz Naturel :**

$$600 \text{ Da/MBTU} = 600/252 = 2,3810 \text{ Da/Th.}$$

➤ **Pour le Gaz Oil :**

$$700 \text{ Da/MBTU} = 700/252 = 2,7778 \text{ Da/Th.}$$

$$1 \text{ MBTU} = 252 \text{ Th}$$

Le tableau suivant illustre les données utilisées dans l'exemple :

Type de générateur	Puissance nominale (kw)	Puissance développable maximal (kw)	Puissance développable minimal (kw)	Consommation spécifique moyenne (Th/kw)	Coût d'exploitation (DA)
Diesel	1600	1350	810	2.750	4000
Diesel	1600	1500	900	2.750	4000
Diesel	1600	1500	900	2.750	4000
Diesel	1600	1350	810	2.750	4000
Diesel	1600	1500	900	2.750	4000
Diesel	1750	1500	900	2.400	4000
Diesel	1750	1700	1020	2.400	4000
Diesel	1750	1500	900	2.400	4000
Diesel	1750	1700	1020	2.400	4000
TG	15000	10000	4000	3.650	3500
TG	15000	10000	4000	3.650	3500

**Tableau V.1. Les données utilisées pour l'exemple**

Les données suivantes représentent les demandes prévisionnelles du 11/07/2019 de 00H00 à 23H00:

<b>Heure</b>	00h00	01h00	02h00	03h00	04h00	05h00
<b>Demande (kw)</b>	20171	19571	19571	19441	19471	20021
<b>Heure</b>	06h00	07h00	08h00	09h00	10h00	11h00
<b>Demande (kw)</b>	20711	20681	21001	21041	20741	20691
<b>Heure</b>	12h00	13h00	14h00	15h00	16h00	17h00
<b>Demande (kw)</b>	21021	22281	22541	22291	22121	21551
<b>Heure</b>	18h00	19h00	20h00	21h00	22h00	23h00
<b>Demande (kw)</b>	21021	20771	20301	20911	21461	21331

**Tableau V.2. Demandes prévisionnelles du 11/07/2019 de 00H00 à 23H00**

Le programme mathématique s'écrit pour une demande donnée (par exemple on prend la demande à 14H00).

Le programme avec LINGO est comme suit :

```

min = 2.750*2.7778*y111+ 2.750*2.7778*y112+ 2.750*2.7778*y113 +2.750*2.7778*y114 + 2.750*2.7778*y115+ 2.4*2.7778*y121 +2.4*
2.7778*y122 +2.4*2.7778*y123+ 2.4*2.7778*y124 + 3.65*2.381*y211 +3.65*2.381*y212 ;
y111+ y112+ y113 +y114 + y115+ y121 +y122 +y123+ y124+y211+y212>=22541;
y111>= x111*810;
y111<= x111*1350;
y112>= x112*900;
y112<= x112*1500;
y113>= x113*900;
y113<= x113*1500;
y114>= x114*810;
y114<= x114*1350;
y115>= x115*900;
y115<= x115*1500;
y121>= x121*900;
y121<= x121*1500;
y122>= x122*1020;
y122<= x122*1700;
y123>= x123*900;
y123<= x123*1500;
y124>= x124*1020;
y124<= x124*1700;
y211>= x211*400;
y211<= x211*10000;
y212>= x212*400;
y212<= x212*10000;
@bin(x111);
@bin(x112);
@bin(x113);
@bin(x114);
@bin(x115);
@bin(x121);
@bin(x122);
@bin(x123);
@bin(x124);
@bin(x211);
@bin(x212);

end

```

**Tableau V.3. Programme en LINGO [10]**

Les fonctions utilisées dans un modèle de LINGO sont [10] :

@FOR : utiliser pour produire des contraintes.

@SUM : calcul de la somme :

@MAX : recherche de maximum.

@MIN : recherche de minimum.

**Type de variables dans LINGO :**

Toutes les variables dans un modèle de LINGO sont considérées non négatives et continues, les fonctions variables d'un modèle de LINGO sont :

- GIN : toute valeur positive de nombre entiers.
- BIN : une valeur binaire (0 ou 1).
- FREE : toute valeur positive ou négative réelle.
- BND : toute valeur bornée par des limites indiquées.

Le programme s'écrit dans l'interface LINGO de la façon montrée ci-dessus, puis on cliquant sur le bouton SOLV E la fenêtre suivante apparaît avec tous les résultats nécessaires (valeurs des variables, coût optimale, nombre d'itération, méthode utilisée...).

➤ **Résultats d'exécution du programme :**

The screenshot shows the LINGO software interface. The main window displays a 'Solution Report' with the following data:

Global optimal solution found.  
 Objective value: 175370.5  
 Extended solver steps: 0  
 Total solver iterations: 22

Variable	Value	Reduced Cost
Y111	1350.000	0.000000
Y112	1500.000	0.000000
Y113	1500.000	0.000000
Y114	1350.000	0.000000
Y115	1500.000	0.000000
Y121	1500.000	0.000000
Y122	1700.000	0.000000
Y123	1500.000	0.000000
Y124	1700.000	0.000000
Y211	8941.000	0.000000
Y212	0.000000	0.000000
X111	1.000000	-1419.795
X112	1.000000	-1577.550
X113	1.000000	-1577.550
X114	1.000000	-1419.795
X115	1.000000	-1577.550
X121	1.000000	-3035.895
X122	1.000000	-3440.681
X123	1.000000	-3035.895
X124	1.000000	-3440.681
X211	1.000000	0.000000
X212	0.000000	0.000000

Row Slack or Surplus Dual Price  
 1 175370.5 -1.000000

The 'LINGO Solver Status [LINGO1]' window is also open, showing the following details:

- Solver Status: Model Class: ILP, State: Global Opt, Objective: 175371, Infeasibility: 0, Iterations: 22
- Variables: Total: 22, Nonlinear: 0, Integers: 11
- Constraints: Total: 24, Nonlinear: 0
- Nonzeros: Total: 66, Nonlinear: 0
- Generator Memory Used (K): 25
- Elapsed Runtime (hh:mm:ss): 00:00:00
- Extended Solver Status: Solver Type: B-and-B, Best Obj: 175371, Obj Bound: 175371, Steps: 0, Active: 0
- Update Interval: 2

**Tableau V.4. Résultats d'exécution du programme Lingo**

LINGO à utiliser la méthode Branch-and-bound pour résoudre (PFL.), et la solution donnée est la suivante :

- **Les puissances délivrées par le  $k$ ème générateur de type  $i$  de taille  $j$  à l'heure  $[t; t+1]$  de l'année  $a$  :**

Est donnée par le vecteur  $Y$  :

$$Y=(1350,1500,1500,1350,1500,1500,1700,1500,1700,8941,0).$$

- **Choix des variables de décisions pour l'utilisation des générateurs :**

Est donné par le vecteur  $X$  ;

$$X=(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0).$$

- **Le coût de fonctionnement qui est égal au coût du combustible :**

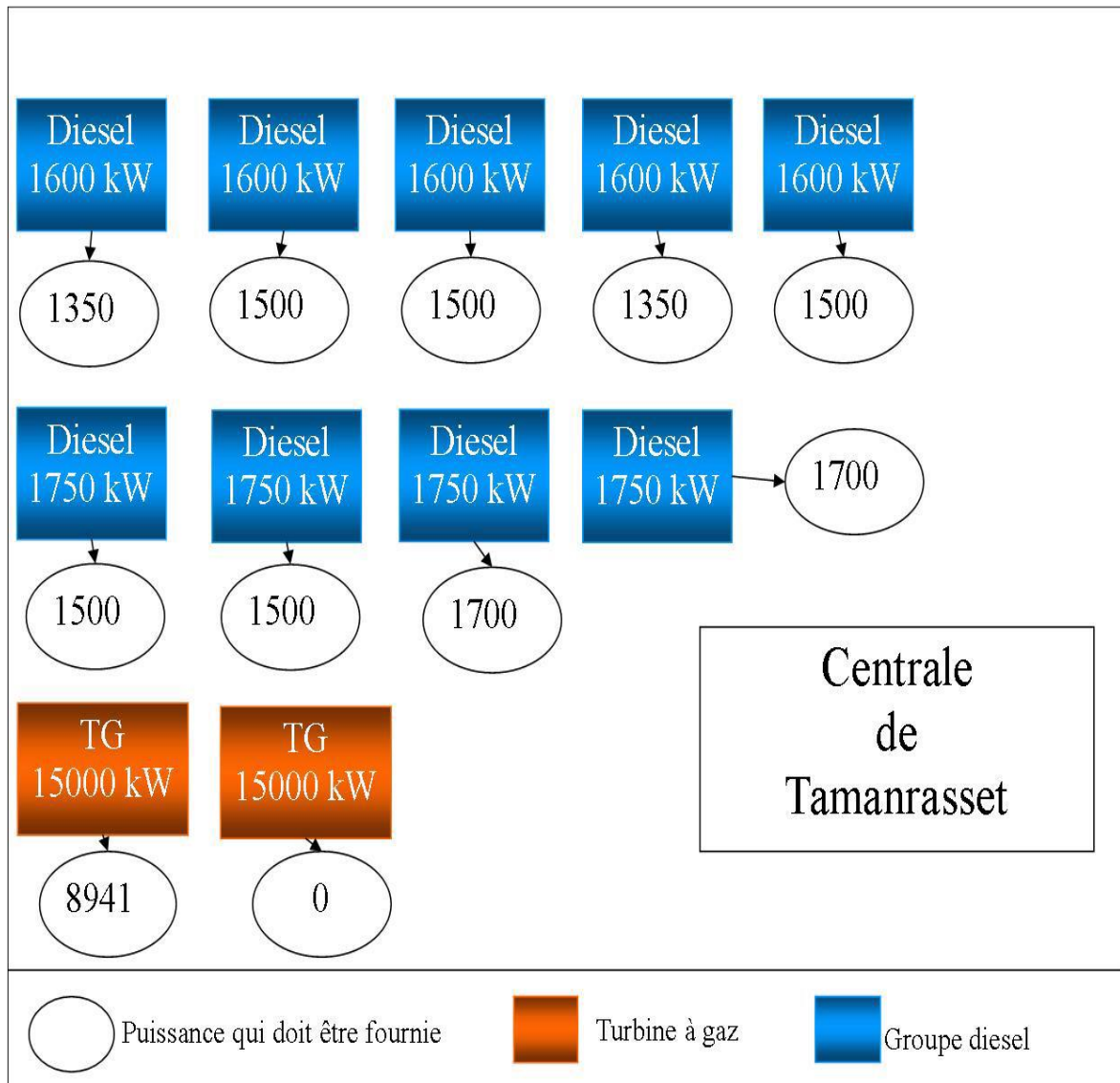
Est donné par  $Z^*$  :

$$Z^*=175370,5$$

### V.2.3. Interprétation des résultats

La centrale doit le 11/07/2019, à l'heure 14H00, fournir une puissance supérieure ou égale à 22451 kW, pour satisfaire la demande, Le coût de fonctionnement optimal de cette centrale le 11/07/2019 à 14H, est : 175370,5 Da.

Le fonctionnement des générateurs est donné par le schéma suivant :



**Figure V.2 : Fonctionnement optimale de la centrale à 14H00**

Le tableau suivant représente le fonctionnement optimal de la centrale durant 24H selon la demande prévisionnelle :

La méthode préposée ci-dessus (Branch-and-Bound) donne toujours la solution optimale, il est constaté que les générateurs avec une consommation spécifique faible sont les premiers à démarrer.

générateurs																
	GD 1600 kW	GD 1600 kW	GD 1500 kW	GD 1600 kW	GD 1600 kW	GD 1750 kW	GD 1750 kW	GD 1750 kW	GD 1750 kW	GD 1750 kW	GD 1750 kW	TG 15000 kW	TG 15000 kW	Somme	Demande	Coût de Fct(Da)
00h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	6571	0	20171	20171	191473,4
01h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	5971	0	19571	19571	186259,3
02h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	5971	0	19571	19571	186259,3
03h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	5841	0	19441	19441	185129,5
04h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	5871	0	19471	19471	185390,3
05h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	6421	0	20021	20021	190170,1
06h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	7111	0	20711	20711	195166,7
07h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	7081	0	20681	20681	195905,9
08h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	7401	0	21001	21001	198686,9
09h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	7441	0	21041	21041	199034,6
10h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	7141	0	20741	20741	196427,4
11h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	7091	0	20691	20691	195992,8
12h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	7421	0	21021	21021	198860,8
13h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	8881	0	22281	22281	209811,0
14h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	8941	0	22541	22541	212070,5
15h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	8891	0	22291	22291	209857,9
16h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	8521	0	22121	22121	208420,5
17h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	7951	0	21551	21551	203466,8
18h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	7421	0	21021	21021	198860,8
19h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	7171	0	20771	20771	196688,1
20h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	6701	0	20301	20301	192603,5
21h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	7311	0	20911	20911	197904,8
22h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	7861	0	21461	21461	202684,6
23h00	1350	1500	1500	1350	1500	1500	1700	1500	1700	1500	1700	7331	0	21331	21331	201554,9
nb d'heure de marche	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	0	0		
Energie total fournie kWh	550800	612000	612000	550800	612000	612000	693600	612000	612000	693600	612000	3133368	0	8682168		
														coût quotidien =	4542710,4	

Tableau V.5. Le fonctionnement optimal de la centrale durant 24H

La méthode préposée ci-dessus (Branch-and-Bound) donne toujours la solution optimale ; il est constaté que les générateurs avec une consommation spécifique faible sont les premiers à démarrer.

### V.3. Résolution du Problème d'investissement

Le problème d'investissement c'est de faire l'extension d'une centrale donnée pour augmenter sa capacité de production dans le but de satisfaire la demande prévisionnelle maximale, cette extension est réalisée par le renforcement de cette centrale par un choix d'une combinaison de générateurs optimale.

Le choix d'une combinaison est basé sur la minimisation du coût de fonctionnement des générateurs dans la centrale (coût de combustible est coût d'exploitation), le coût d'investissement des générateurs.

On génère des combinaisons, puis on calcule leurs coûts (coût d'investissement + le coût de fonctionnement : faire appel aux méthodes proposés dans le chapitre précédent) et on sélectionne les meilleures combinaisons pour générer d'autres combinaison avec des coûts plus bas.

Nous proposons pour la résolution de ce problème l'utilisation des Algorithmes Génétiques.

#### V.3.1. Adaptation des algorithmes génétiques au problème d'investissement

##### V.3.1.1. Codage des données

Notre chromosome est une matrice binaire, dont les lignes représente les tailles des générateurs (quel que soit leurs types) et le nombre de colonnes est égale au nombre de générateurs ajouter au maximum dans la centrale, en effet, d'après l'hypothèse (12 générateurs au maximum dans une centrale) le nombre de colonnes est égale a 12 moins les nombres de générateurs dans la centrale. C'est-à-dire :

$$\text{Chrom } [i,j]=\begin{cases} 1 & \text{si le générateur } i \text{ est pris dans la centrale} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

- **Réalisabilité de solution** : Le chromosome doit satisfaire les deux contraintes suivantes :

**1- Satisfaire la demande additionnelle maximale :**

$$\sum \sum \text{chrom} [i, j] * Tm[i] \geq D_{add} \tag{V.2}$$

*Tm* : Vecteur des tailles des générateurs candidats.

**2- Le nombre total des générateurs dans la centrale ne doit pas dépasser 12:**

$$\sum \sum \text{chrom} [i, j] + ngc \leq 12 \tag{V.3}$$

*ngc*: nombre de générateurs dans la centrale avant le renforcement.

- **Exemple** : La centrale située à ILLIZI contient *ngc* = 8 générateurs :

5 générateurs de type diesel.

3 générateurs de type turbinent à gaz.

Les générateurs candidats sont donnés comme suit :

- Diesel 1600kW.
- Diesel 2000kW.
- TG 15000kW.

*Tm* =

1600	2000	15000
------	------	-------

Une solution serait de ce genre :

Le nombre de colonnes est égal à 12 - 8 = 4 et le nombre de lignes est égal à 3.

Chrom=

1	0	0	0
1	1	0	0
1	0	0	0

Ce chromosome représente une combinaison de :

1 groupe Diesel 1600kW.

2 groupes Diesel 2000kW.

1 TG 15000kW.

V.3.1.2. La population initiale

Organigramme pour générer un individu :

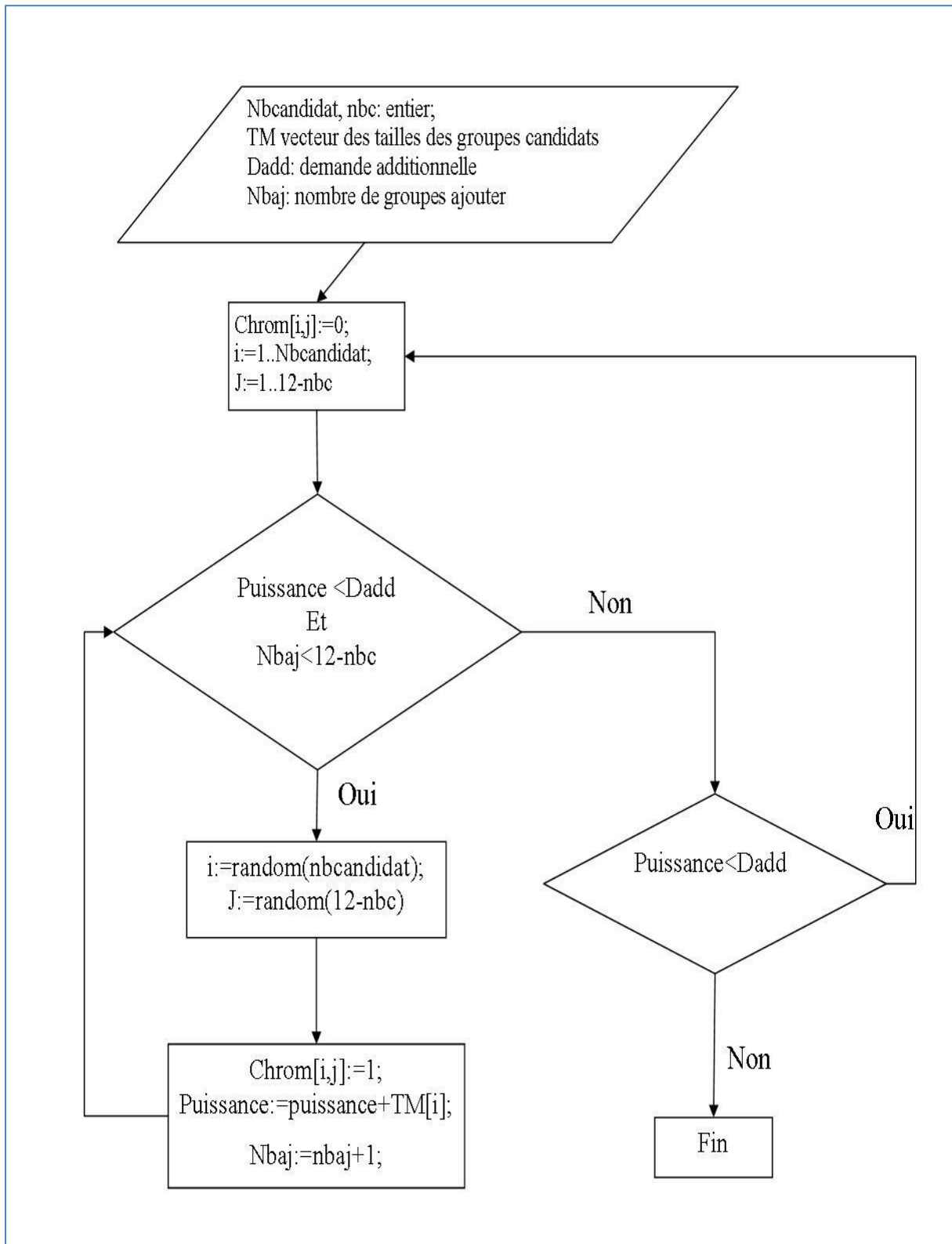


Figure V.3. Algorithme pour générer la population initiale

### V.3.1.3. La sélection

Le critère de sélection que nous adoptons est le coût minimum.

**Algorithme de sélection :**

```
Procédure selection(C1,C2,C3,C4);
```

**Début**

```
C[1] :=C1 ;
```

```
C[2] :=C2 ;
```

```
C[3] :=C3 ;
```

```
C[4] :=C4 ;
```

```
tri_croissant(C);
```

```
Cmin1:=C[1];
```

```
Cmin2:=C[2];
```

**Fin;**

### V.3.2. L'Algorithme général de résolution du problème

**Algorithme Génétique du problème est comme suit :**

**Debut**

```
Ini_gen(chrom1);
```

```
    C1:=Heuristique _fonctionnement(t,a);
```

```
Ini_gen(chrom2);
```

```
    C2:=Heuristique _fonctionnement(t,a);
```

```
Ini_gen(chrom3);
```

```
    C3:=Heuristique _fonctionnement(t,a,);
```

```
Ini_gen(chrom4);
```

```
    C4:=Heuristique _fonctionnement(t,a,);
```

```
    CT1:=C1+CA1;
```

```
    CT2:=C2+CA2;
```

```
    CT3:=C3+CA3;
```

CT4:=C4+CA4;

Selection(CT1,CT2,CT3,CT4);

{Prendre les chromosomes correspondant et les coûts et les affectés à chrom5,C5, chrom6,C6};

Tant que (non condition d'arrêt)

### Faire

croisement(chrom5,chrom6; chrom\*,chrom\*\*);

C\*:=Heuristique \_fonctionnement(t,a)+CA\*;

### V.3. 3. Implémentation des algorithmes

Afin de mettre en œuvre le travail effectué dans les chapitres précédents, ainsi que pour avoir une base de données des centrales existante dans le sud du pays, nous avons mis en place un logiciel interactif «OPARSUD » conçu en Borland Delphi 7 (est un logiciel de développement d'applications sous l'environnement Windows (EDI).

#### Implémentation sur la centrale de Tamanrasset :

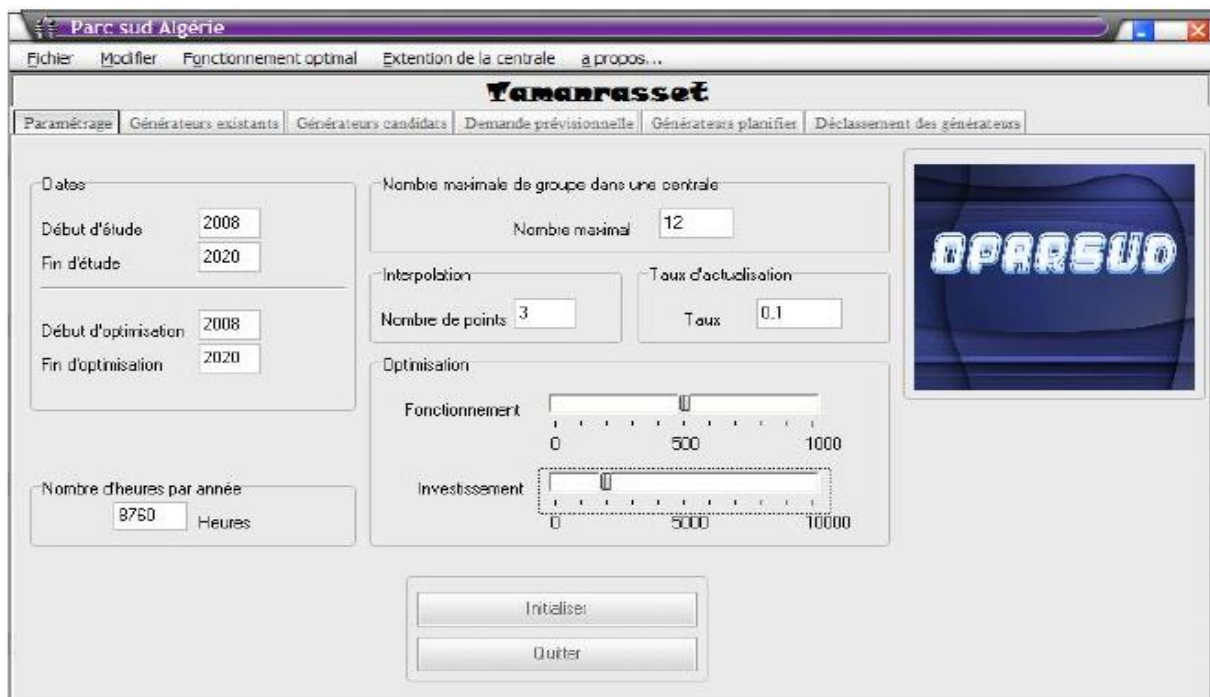
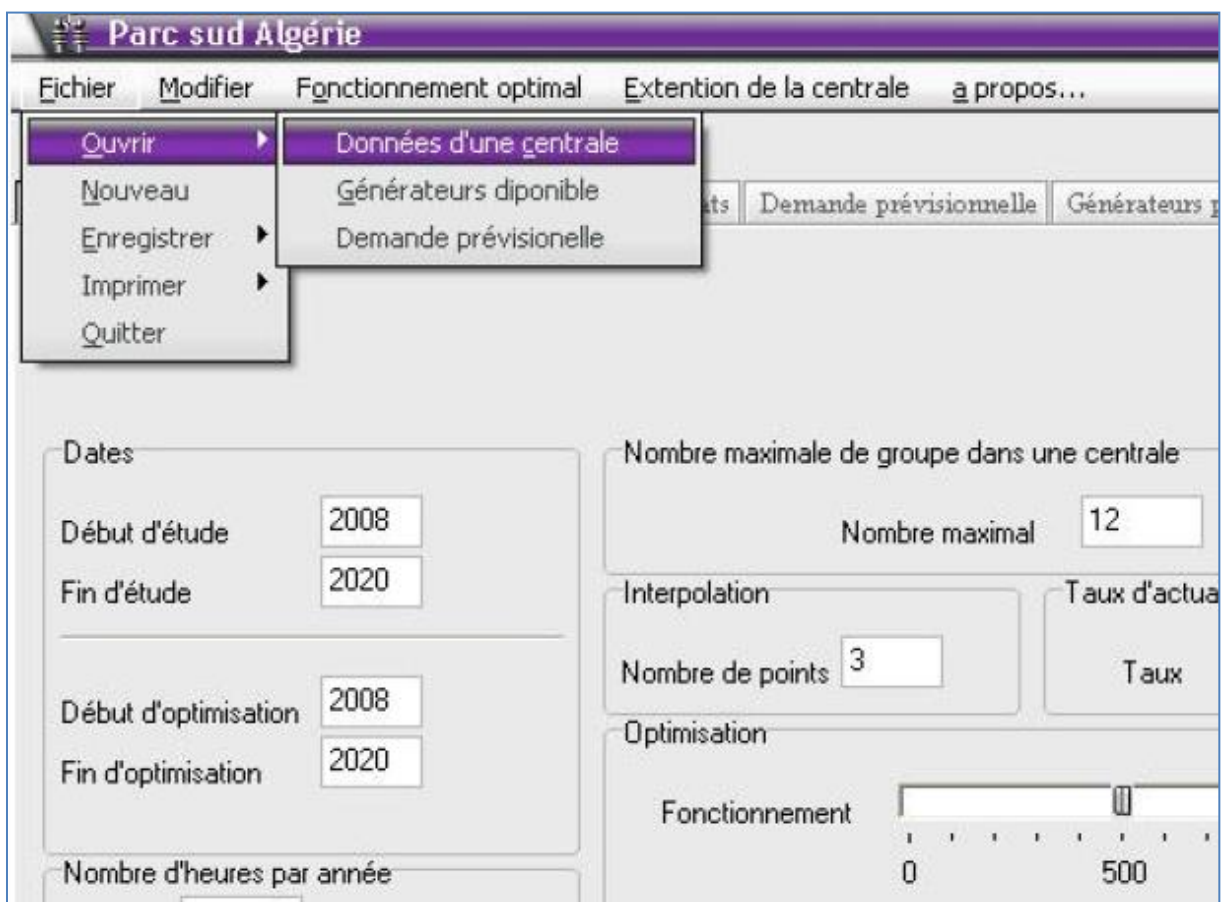


Figure V.4. Onglet paramètre

L'onglet "paramètre", donne l'accès au réglage des paramètres suivant :

- Début et fin d'année d'étude.
- Début et fin de l'optimisation.
- Le nombre maximal de générateurs autorisé dans la centrale.
- Le nombre d'itération de l'optimisation.
- Le taux d'actualisation.
- Le nombre de points d'interpolation pour la courbe de consommation spécifique.

Dans le menu fichier de la fenêtre d'introduction des données on sélectionne « ouvrir » puis « données d'une centrale » :



**Figure V.5. Menu principale**

Les données ce charge et en même temps une boite de dialogue s'ouvre pour demande la saisie des points d'interpolation des courbe de consommation spécifique des générateurs présent dans la centrale :



Figure V.6. Chargement des données

On constate que la centrale de Tamanrasset contient 11 générateurs, 9 de type diesel et 2 de type turbine à gaz.

Toutes les données sur la centrale de Tamanrasset sont disponibles, passant maintenant à la saisie des données des générateurs disponibles dans le marché, il suffit de choisir l'onglet « Générateurs candidats » pour que la fenêtre suivante s'affiche



Figure V.7. Onglet des générateurs disponibles

Les générateurs disponibles dans le marché sont les suivant :

Type	P.I.N(kW)	P.Dev(kW)	Coût d'achat (DA)	Coût install (DA)
Diesel	1600	1500	300.000	80.000
Diesel	1750	1700	320.000	80.000
TG	15.000	10.000	500.000	100.000
TG	25.000	24.000	600.000	100.000
TG	50.000	45.000	700.000	100.000

Tableau V. 6. Les générateurs disponibles dans le marché

Les durées de vie des générateurs c'est 20 ans.

Pour saisir ces données dans le logiciel il suffit de cliquer sur le bouton « Ajouter un générateur » la fenêtre suivante s'affiche :

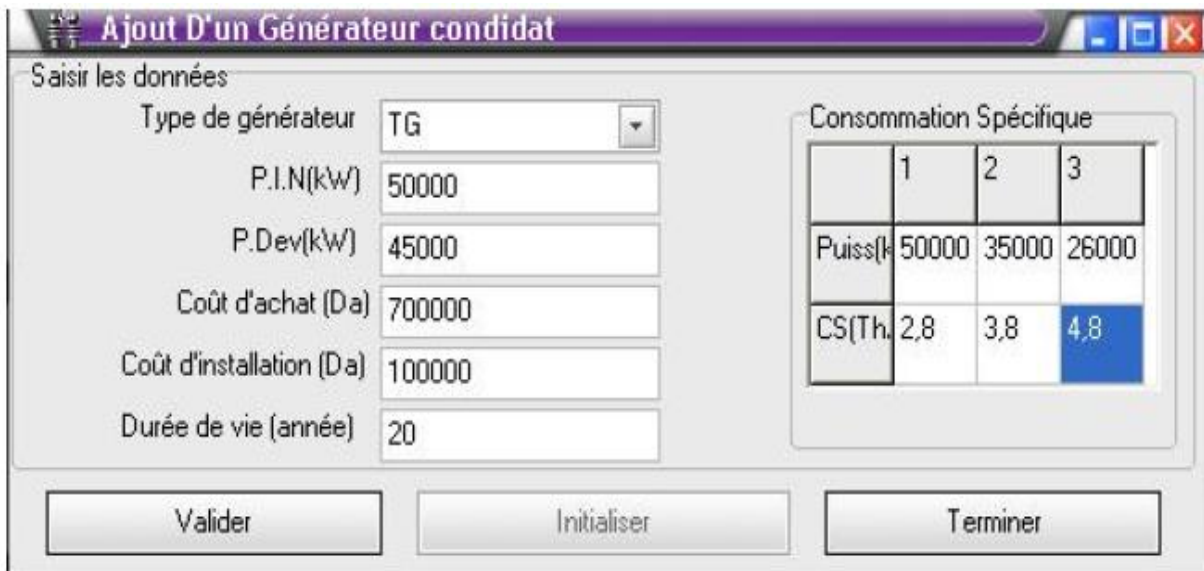


Figure V.8. Ajout d'un générateur candidat a l'installation

Dans l'onglet "Demande prévisionnelle" on charge la matrice des demandes en dans le menu ".chier", "ouvrir" et on sélectionne "Demande prévisionnelle":

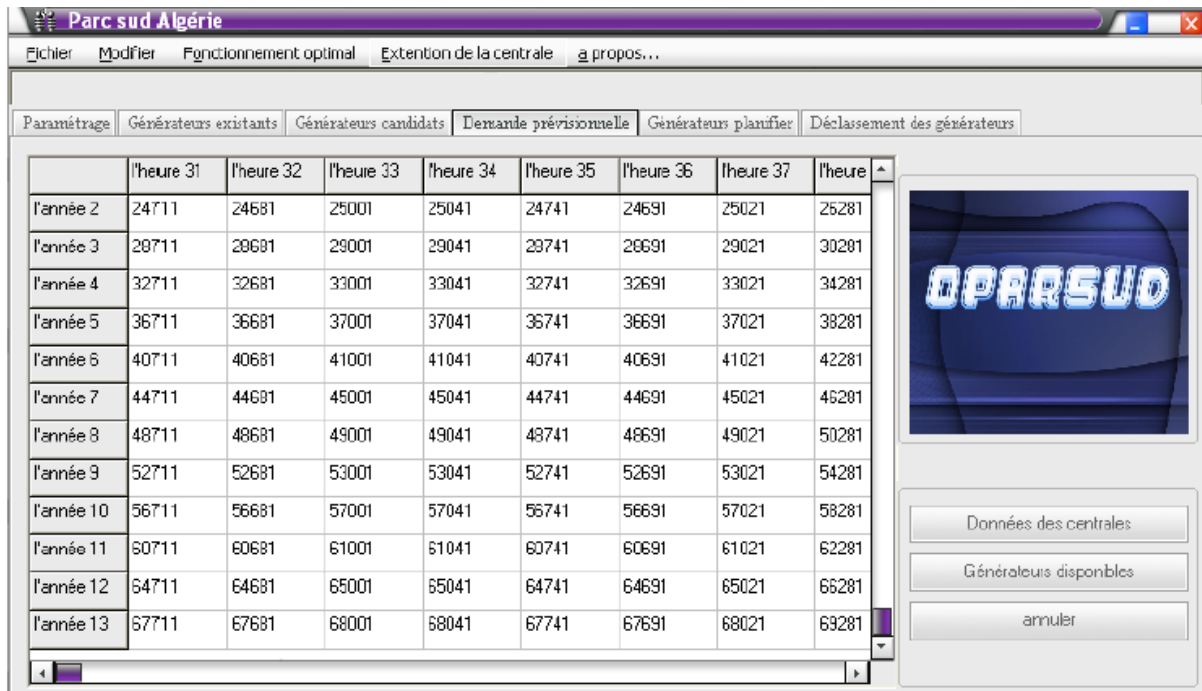


Figure V.9. Les demandes prévisionnelles de 12 ans

Toutes les données de la centrale de Tamanrasset, les générateurs disponibles dans le marché ainsi que la demande prévisionnelle sont maintenant saisis.

On passe vers l'étape de calcul, on sélectionne le menu « Extension de la centrale » et la fenêtre suivante apparaît :

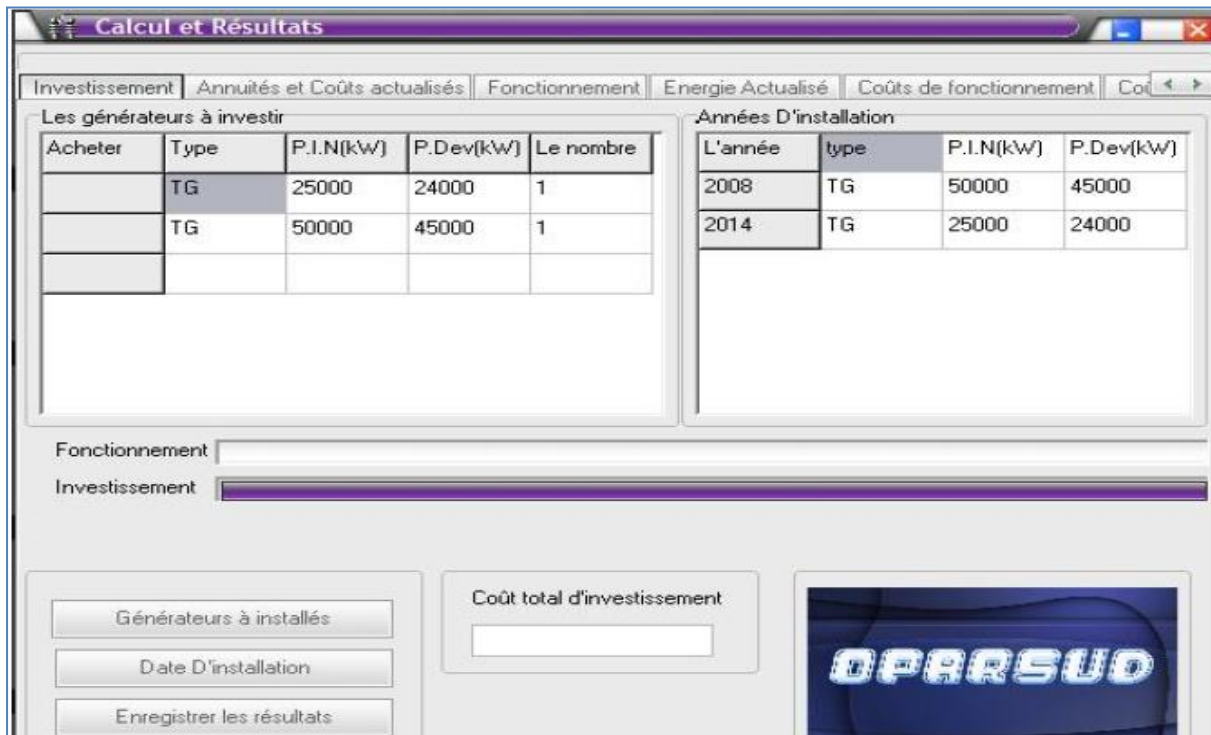


Figure V.10. Les résultats obtenus

L'onglet "Annuité et coûts actualisés" comporte les annuités :

Dans l'onglet "Fonctionnement", se trouve les puissances fournies par les générateurs chaque année :

Coût de fonctionnement annuel des générateurs en Da							
	CMI12082	CMI12079	CMI12077	TG1	TG2	G1	G2
2018	30905048.23	49770794.66	31142808.65	414367644.2	402961645.6	43001196.58	0
2019	31403943.54	50440154.63	31407003.20	440503159.1	440500493.1	43734525.82	0
2020	31725469.85	50765519.10	31894251.44	460713681.5	458149058.1	43838806.48	0
2021	0	0	0	481838128.3	478295822.4	44525334.58	0
2022	0	0	0	0	0	73235788.46	0
2023	0	0	0	0	0	71264339.95	0
2024	0	0	0	0	0	56347911.57	50010367.93
2025	0	0	0	0	0	56935700.42	50248216.13
2026	0	0	0	0	0	56196580.16	50593452.92
2027	0	0	0	0	0	56268299.27	50746893.77
2028	0	0	0	0	0	56300097.53	50555324.62
2029	0	0	0	0	0	56333944.05	50519683.83
2030	0	0	0	0	0	55666141.47	50499190.42

Tableau V.7. Les résultats obtenus

### V.3.4. Interprétation des résultats

Les générateurs à installer dans la centrale de Tamanrasset, ainsi que l'année où ils doivent rentrer en marche sont représentés dans le tableau suivant :

Type	P.I.N(KW)	P.Dev	Année de mise en marche
TG	50000	45000	2018
TG	24000	24000	2024

Tableau. V.8. Les générateurs à installer dans la centrale de Tamanrasset

Le tableau suivant représente les coûts de fonctionnement engendré par chaque générateur annuellement :

	FUJI174108	FUJI174115	FUJI174136	FUJI174120	FUJI174117	CMI12091	
2018	0	0	0	0	0	0	
2019	0	0	0	0	0	0	
2020	0	0	0	0	0	0	
2021	0	0	0	0	0	0	
2022	0	0	0	0	0	0	
2023	0	0	0	0	0	0	
2024	0	0	0	0	0	0	
2025	0	0	0	0	0	0	
2026	0	0	0	0	0	0	
2027	0	0	0	0	0	0	
2028	0	0	0	0	0	0	
2029	0	0	0	0	0	0	
2030	0	0	0	0	0	0	
	CMI12082	CMI12079	CMI12077	TG1	TG2	G1	G2
2018	30905043.2	49770794.63	31142803.65	414367644.2	409251645.6	43001196.58	0
2019	31403943.54	50440154.63	31407003.20	440503159.1	440500493.1	43734525.32	0
2020	31725469.89	50765519.10	31894251.44	4460713681.5	458149058.1	43838806.48	0
2021	0	0	0	481838128.3	478295822.4	44525334.58	0
2022	0	0	0	0	0	73235788.46	0
2023	0	0	0	0	0	71264339.99	0
2024	0	0	0	0	0	56347911.57	50010367.93
2025	0	0	0	0	0	56935700.42	50248216.13
2026	0	0	0	0	0	56196580.16	50593452.92
2027	0	0	0	0	0	56268299.27	50746893.77
2028	0	0	0	0	0	56300097.53	50555324.62
2029	0	0	0	0	0	56333944.05	50519683.83
2030	0	0	0	0	0	556661141.47	50499790.42

**Tableau V.9. Les coûts de fonctionnement actualisés en Da**

Le tableau suivant représente les coûts de fonctionnement actualisés engendré par chaque générateur annuellement :

	FUJI174108	FUJI174115	FUJI174136	FUJI174120	FUJI174117	CMI12091	CMI12082	
2018	0	0	0	0	0	0	28095498.39	
2019	0	0	0	0	0	0	25953672.35	
2020	0	0	0	0	0	0	23835815.10	
2021	0	0	0	0	0	0	0	
2022	0	0	0	0	0	0	0	
2023	0	0	0	0	0	0	0	
2024	0	0	0	0	0	0	0	
2025	0	0	0	0	0	0	0	
2026	0	0	0	0	0	0	0	
2027	0	0	0	0	0	0	0	
2028	0	0	0	0	0	0	0	
2029	0	0	0	0	0	0	0	
2030	0	0	0	0	0	0	0	
	CMI12091	CMI12082	CMI12079	CMI12077	TG1	TG2	G1	G2
2018	0	28095498.39	4526176.97	28311644.22	376697858.3	372056041.5	39091996.89	0
2019	0	25953672.35	41686078.21	25956200.99	364052197.6	364049994.3	36144236.21	0
2020	0	23835815.10	38140885.87	23952623.17	346141007.9	334214168.4	32936744.16	0
2021	0	0	0	0	329101924.9	326682482.3	30410402.62	0
2022	0	0	0	0	0	0	45473662.68	0
2023	0	0	0	0	0	0	40226862.08	0
2024	0	0	0	0	0	0	28915388.07	25663225.3
2025	0	0	0	0	0	0	26560924.44	23441163.67
2026	0	0	0	0	0	0	23832835.80	21456532.67
2027	0	0	0	0	0	0	21693865.19	19565124.35
2028	0	0	0	0	0	0	19732840.72	17719332.86
2029	0	0	0	0	0	0	19749730.56	160971128.1
2030	0	0	0	0	0	0	16124498.34	14527816.67

**Tableau V.10. Représentation des coûts de fonctionnement actualisés engendré par chaque générateur annuellement.**

## V.4. Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre, la résolution des problèmes représentés dans les chapitres précédents en utilisant l'outil informatique à savoir LINGO et logiciel OPARSUD.

Les résultats obtenus, dans le problème du coût de fonctionnement, ont permis de constater que la méthode de la moyenne engendre presque, le double des coûts engendrés par l'heuristique proposée, ce qui diminue considérablement le coût total du projet.

Le fait d'avoir utilisé des heuristiques nous a permis de résoudre ce problème avec le maximum de contraintes, mais malheureusement les heuristiques et les métaheuristiques sont gourmandes en temps, et cela se ressent dans l'implémentation de l'application.



Dans ce travail nous avons essayé d'utiliser plusieurs techniques acquises durant notre formation master en génie mécaniques spécialité énergétique notamment module « optimisation et méthode mathématique », pour cela nous avons traité le problème d'optimisation des parcs de la production d'énergie électrique dans des réseaux isolés du sud.

Ce problème consiste à déterminer le meilleur parc de production d'Electricité ciblé à long terme sur un horizon de 10 a 15 ans pour assurer l'alimentation en énergie électrique des localités isolés du sud en tenant compte de l'évolution prévisionnelle de la demande.

Ce travail permet à SONELGAZ de :

- ✓ Avoir une méthode efficace et un logiciel puissant pour définir le meilleur parc possible qui va satisfaire la demande, sans cesse en augmentation et qui va répondre aux exigences des décideurs,
- ✓ Simuler le fonctionnement d'une centrale pour n'importe quelle demande, et donner la meilleure façon de faire marcher les générateurs en minimisant leurs coûts de fonctionnement (en minimisant leur consommation en combustible)
- ✓ Avoir la possibilité d'introduire les nouvelles technologies de productions d'électricité, notamment le solaire et l'éolien.

Les résultats obtenus, dans le problème du coût de fonctionnement, ont permis de constater que la méthode de la moyenne engendre presque, le double des coûts engendrer par l'heuristique proposée (l'heuristique de résolution de PFLN), ce qui diminue considérablement le coût total du projet.

Nous jugeons nécessaire de mettre en évidence les aspects non traité dans ce problème, pour une éventuelle amélioration de cette approche :

- La partie économique.
- Le coût de démarrage des groupes : un groupe demande un temps de démarrage avant qu'il commence à fournir de l'électricité ce qui engendre un coût (coût de combustible).
- Le coût de transport de combustibles : les distances étant énormes entre les centrales et les points d'approvisionnement, ce qui engendre un coût non négligeable en transport.

Enfin, nous espérons que l'étude effectuée présente un intérêt pour l'entreprise, et apporte un éclairage aux étudiants qui auront à préparer leur projet de fin d'études ultérieurement.

# Bibliographie

---

[1] Hau. E. Wind turbines : Fundamentals, technologies, application, economics. Springer Verlag, 2006.

[2] Observ, E. (2011). La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde. Collection chiffres et statistiques. Neuvième inventaire-Edition.

[3] A.LABOURET, P.CUMUNEL. Cellules solaires. Les bases de l'énergie photovoltaïque, 3eme édition, ETSF ( édition technique et scienti.que française), DUNOD, Paris 2001.

[4] Coûts de référence : Programme d'électrification de 20 villages par l'énergie photovoltaïque. CREDEG/Spa, département énergie renouvelable, 2004.

[5] Electrification des zones rurales dans les pays en voie de développement : EDF Electricité de France (Direction des Etudes et Recherches).

[6] Stiebler, M.. Wind energy systems for electric power generation. Springer Verlag. 2008

[7] Gillet B.E, and Miller L.R., A heuristic algorithm for the vehicle dispatcher problem, Operational Research, 22(1974), 340-349.

[8] Goldberg D. Genetic Algorithm in Search, Optimisation and machine learning, Addison-Wesley, Reading Mass, 1989.

[9] M. Minoux. *Programmation mathématique*. Tome1, Edition Dunod, 1983.

[10]. Simon & Schuster : F.Beaulieu "*La programmation orienté objet*." (2004).

## ***Les manuels et revues de SONEGAS :***

[11] Manuel pour transport et la distribution du gaz. Partie I : principes fondamentales(ATG).

[12] Les revues (Documents SONEGAS) :

N 87 Février 2016

N 89 Mars 2017