

الشعبية لديمقراطية الجزائرية الجمهورية
République Algérienne démocratique et populaire

العلمي والبحث العالي التعليم وزارة
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

البلدية دحلب سعد جامعة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

التكنولوجيا كلية
Faculté de Technologie

الإلكترونيك قسم
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière : Électronique

Spécialité : Instrumentation

présenté par :

Azeb Abd Ellaziz

&

Azeb Redouane

Analyse métrologique de la composition du gaz combustible et de son impact dans la centrale 1227 MW, SKH

Proposé par : Ingénieur Boumad Abderrahmane Fethi

Encadré par : Dr Nadjemi Omar

Année Universitaire 2017-2018

Remerciements

Le travail du présent mémoire est le résultat d'un stage de projet de fin d'études qui s'est déroulé du 05 Mars au 04 Avril 2018 au niveau de la centrale Thermique 1227 MW Shariket Kahraba Hadjret En Nouss(SKH), au sein du groupe SNC Lavalin, qui assure l'exploitation et la gestion des installations de cette centrale.

Nous adressons nos louanges tout d'abord à ALLAH le tout puissant pour nous avoir permis de rendre nos parents fiers de nous, en nous aidant à réaliser nos objectifs.

Au terme de ce travail nous tenons à témoigner notre profonde reconnaissance et nos vifs remerciements à notre encadreur **Dr. Nadjemi Omar** pour nous avoir suivis durant la finalisation de notre projet de fin d'études et conseillés tout au long de la rédaction de notre mémoire.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à **Mr. Boumade Abd Er Rahman Fethi**, le promoteur de notre projet et notre tuteur industriel pour nous avoir accueillis au sein de son groupe (SNC Lavalin) et facilité le déroulement de notre stage.

Nos sincères remerciements sont aussi adressés à toute l'équipe d'instrumentation de SNC Lavalin qui nous a orientés, merci à Mr M.Hendi, Mr Kouider, Mr Seboua, Mr Khaled et Mr M. Youcef.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail affectueusement à mes chères parents pour leur amour, sacrifice et leur soutien inqualifiable, que dieu les garde.

A mes sœurs et mes frères qui m'ont énormément soutenu moralement pour leur sagesse, tendresse, et compréhension.

A mes chères tantes, mes oncles, mes cousins et cousines maternels et paternels.

A mes amis et les camarades de la promotion 2018, ainsi que tous les étudiants et enseignants de l'université Saad Dahleb à Blida

A tout ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

ملخص: الهدف العام من هذه الدراسة تحديد مدى تأثير مكونات الغاز القابل للاشتعال المستخدم في محطة الطاقة الحرارية 1227 ميغاواط، حجرة النص، على الإنتاج الكهربائي وانبعاث الغازات الملوثة للبيئة والضارة بالغللاف الجوي. من أجل الحصول على نتائج موثوقة كان يتوجب علينا أن نقوم أولاً بتأكيد كفاءة الوسائل المؤدية إلى تحليل الغازات بواسطة ذلك وفقاً لبنية الجودة ومراقبة المطابقة امتثال الأجهزة المستعملة لقياس الكميات المؤثرة وأيضاً الغاز كروماتوغراف المنفذة في ميادين علم القياسات.

كلمات المفاتيح: الغاز القابل للاشتعال. محطة الطاقة الحرارية. الإنتاج الكهربائي. الانبعاث الغازات. كفاءة الوسائل. امتثال الأجهزة. كروماتوغراف الغاز. علم القياس

Résumé : L'objectif global de cette étude est la détermination de l'impact de la composition du gaz combustible utilisé dans la centrale thermique de 1227 MW, Hadjret En Nous, sur la production électrique, l'échappement des gaz polluants l'atmosphère et les gaz à effet de serre.

Pour obtenir des résultats fiables , il a fallu pour cela prouver la capabilité des moyens conduisant à l'analyse chromatographique du gaz et la conformité des appareils de mesure des grandeurs d'influences selon les infrastructures de qualité et le contrôle de la conformité mis en œuvre dans les domaines de la Métrologie.

Mots clés : Gaz combustible, Centrale thermique, Production électrique, Gaz d'émission, Capabilité, conformité, Chromatographe de gaz. Métrologie

Abstract: The overall objective of this study is to determine the impact of the composition of the fuel gas used in the Hadjret En Nous 1227 MW thermal power station, on the electrical production, the exhaust of the polluting gases the atmosphere and the greenhouse gases.

To obtain reliable results, it was necessary to prove the capability of the means leading to the chromatographic analysis of the gas and the conformity of the measuring devices of the influence quantities according to the quality infrastructures and the conformity control implemented in the fields of Metrology.

Keywords: Flammable Gas, Thermal Power Plant, Power Generation, Emission Gases, Capability, conformity, Gas Chromatograph. Metrology

Listes des acronymes et abréviations

- **SPE** : Société Algérienne de Production de l'Électricité
- **CCGT**: *Combined Cycle gas Turbine*
- **CEMS**: Continuous Emissions Monitoring System
- **GPL** : Gaz de Pétrole Liquéfié
- **GVR** : Générateur De vapeur Récupérateur.
- **PPM** : Partie Par million.
- **GAZ** : Gaz à Effet De Serre.
- **TEP** : Tonne d'Équivalent pétrole.
- **SONELGAZ** : Société Nationale d'Electricité et de Gaz.
- **SKTM**: Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida.
- **SPP1**: Solar Power Plant One.
- **Nm³** : normo mètre cube.

- **Barg** : le Bar gauge (aussi appelé le bar relatif), 0 Barg = 1 Bar
- **P&ID** : (en anglais **P**iping and **I**nstrumentation **D**iagram ou **P**rocess and **I**nstrumentation **D**iagram,) est un diagramme qui définit tous les éléments d'un procédé industriel.

Table des matières

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre 1 Les centrales électriques en Algérie..... | 3 |
| 1.1 Introduction | 3 |
| 1.2 Evolution des centrales électriques par ordre d'installation | 3 |
| 1.2.1 Centrale diesel..... | 3 |
| Avantages et inconvénients des centrales diesel | 4 |
| 1.2.2 Centrale Thermique à vapeur | 4 |
| Avantages et inconvénients de la centrale vapeur | 5 |
| 1.2.3 Centrale hydroélectrique | 5 |
| a Centrales hydroélectriques en Algérie..... | 6 |
| b Avantages et inconvénients des centrales Hydroélectriques | 6 |
| 1.2.4 Centrale Thermique à gaz (TG)..... | 6 |
| a Transformations d'énergie..... | 7 |
| b Avantages et inconvénients des centrales thermiques à gaz | 7 |
| 1.2.5 Centrale à cycle combiné | 7 |
| a Production de l'électricité à partir des centrales thermique à cycle combiné | 8 |
| b Avantages et inconvénients des centrales à cycle combiné | 9 |
| 1.2.6 centrale Hybride..... | 9 |
| a Projets d'hybridation des centrales diesel et TG des réseaux isolés du sud..... | 10 |
| b Avantages et inconvénients de la centrale hybride | 11 |
| 1.2.7 centrale Eolienne | 11 |
| a Projets de centrales éoliennes | 11 |
| b Avantages et inconvénients des centrales éoliennes | 12 |
| 1.2.8 Centrale Photovoltaïque | 12 |
| a Projets de centrales photovoltaïques en Algérie Période 2011-2020 | 12 |
| b Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque | 13 |
| 1.3 Parc de Production National | 14 |
| 1.3.1 Puissance installée de production d'électricité | 14 |
| Evaluation rendement par type d'équipement | 15 |
| 1.3.2 Performance technologique du cycle combiné | 15 |
| Chapitre 2 La centrale à cycle combiné 1227 MW Shariket Kahraba Hadjret En Nouss | 17 |
| 2.1 Introduction | 17 |

| | | |
|------------|--|----|
| 2.2 | La centrale à cycle combiné (SKH) | 19 |
| 2.2.1 | Les intervenants au projet | 20 |
| 2.2.2 | Approvisionnement de la centrale..... | 20 |
| 2.3 | Configuration générale de la centrale SKH | 20 |
| 2.3.1 | Turbine à gaz | 22 |
| 2.3.2 | chaudières de récupération | 23 |
| 2.3.3 | Turbines à Vapeur | 24 |
| 2.3.4 | Le Condenseur..... | 25 |
| 2.3.5 | Systèmes de refroidissement des équipements auxiliaires..... | 26 |
| 2.3.6 | Utilisation de l'eau | 26 |
| 2.3.7 | Transformateurs et poste de départ..... | 27 |
| 2.3.8 | Equipements connexes | 27 |
| a | Génératrice de démarrage..... | 27 |
| b | Transformateurs auxiliaires | 27 |
| c | Raccordement du gaz naturel | 27 |
| d | Entreposage des combustibles et des produits chimiques..... | 27 |
| 2.3.9 | Bâtiments connexes | 28 |
| 2.4 | Conclusion..... | 28 |
| Chapitre 3 | Présentation des ressources métrologiques d'analyse..... | 29 |
| 3.1 | Introduction : | 29 |
| 3.2 | Structure de la chaine de production | 30 |
| 3.2.1 | Schéma fonctionnel du flux de gaz | 30 |
| 3.2.2 | Les caractéristiques imposées par le producteur liées au Gaz | 31 |
| a | Pression du gaz..... | 31 |
| b | Débit du gaz..... | 31 |
| c | Température | 32 |
| d | Composition du gaz combustible | 32 |
| e | Capacité de production..... | 33 |
| f | Déchets de production..... | 33 |
| 3.2.3 | Les infrastructures métrologiques | 34 |
| a | Capabilité | 34 |
| b | Conformité | 35 |
| c | Etalonnage | 37 |
| d | Calibration | 37 |

| | | |
|---|---|----|
| e | Traçabilité..... | 37 |
| 3.3 | Analyse métrologique du gaz..... | 38 |
| 3.3.1 | Analyse chromatographique..... | 38 |
| a | La chromatographie en phase gazeuse..... | 38 |
| b | Description du système (chromatographe Rosemount model 700)..... | 39 |
| c | Description fonctionnelle..... | 39 |
| 3.3.2 | Les logiciels mis en œuvre..... | 40 |
| a | Description du logiciel..... | 41 |
| b | Fonctions disponibles sur le système GC et son logiciel MON2000 | 41 |
| c | Rapports et journaux produits par le système GC | 41 |
| 3.3.3 | Calibration du GC Rosemount model 700..... | 42 |
| a | Rapport d'analyse des composants | 42 |
| b | Rapport de calibration | 43 |
| c | Rapport de calibration Final..... | 43 |
| 3.3.4 | Les résultats d'analyse de gaz réalisé par la centrale | 44 |
| 3.3.5 | capabilité et conformité du GC Rosemount model 700 | 45 |
| 3.3.6 | Traçabilité des mesurages par comparaison (laboratoire accrédité) | 46 |
| a | La traçabilité dans la centrale thermique 1227 MW..... | 46 |
| b | Résultat d'analyse réalisé par laboratoire accrédité de SONATRACH | 47 |
| c | Comparaison entre les résultats du laboratoire DC RDT/DTD et de la centrale thermique de HAJRET EN NOUSS..... | 48 |
| 3.3.7 | Mesures de la puissance | 48 |
| 3.3.8 | Mesure des déchets | 50 |
| 3.3.9 | Les instruments utilisés pour l'analyse CEMS | 51 |
| a | L'analyse d'O ₂ | 51 |
| b | L'analyse de CO | 51 |
| c | L'analyse de NO _x | 52 |
| d | L'assurance qualité..... | 53 |
| 3.4 | Conclusion..... | 53 |
| Chapitre 4 Impact de la composition du gaz combustible sur le rendement et l'environnement..... | | 54 |
| 4.1 | Introduction | 54 |
| 4.2 | Impact sur le rendement électrique | 54 |
| a | Relation entre le pouvoir calorifique inférieur (PCI) et le rendement..... | 56 |

| | | |
|-------|--|----|
| b | Relation entre le rendement et la puissance électrique produite..... | 56 |
| c | Relation entre le rendement et le pouvoir calorifique inférieur. | 57 |
| 4.3 | Impact sur l'atmosphère..... | 57 |
| 4.3.1 | Les principes polluants atmosphériques..... | 58 |
| a | les polluants primaires..... | 58 |
| b | Les polluants secondaires | 58 |
| 4.3.2 | Les réglementations de la pollution de l'air..... | 59 |
| 4.3.3 | Contrôle de l'émission atmosphérique..... | 59 |
| | Relation entre l'émission atmosphérique en fonction du débit de l'air et du gaz..... | 60 |
| 4.4 | Conclusion..... | 61 |
| | Conclusion générale..... | 62 |
| | Bibliographie..... | 63 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1.1 Schéma d'une centrale Diesel [5]..... | 4 |
| Figure 1.2 Schéma d'une centrale thermique à vapeur [7]..... | 5 |
| Figure 1.3 Schéma d'une centrale hydroélectrique [9]..... | 6 |
| Figure 1.4 Schéma d'une centrale à turbine de gaz [11]..... | 7 |
| Figure 1.5 Schéma d'une centrale à cycle combiné [12]..... | 8 |
| Figure 1.6. Schéma d'une centrale hybride parallèle [14]..... | 10 |
| Figure 1.7 Schéma d'une Centrale éolienne [16]..... | 11 |
| Figure 1.8 Schéma d'une centrale photovoltaïque [18]..... | 12 |
| Figure 2.1 Puissance installée par type d'équipement en 2015. [3]..... | 17 |
| Figure 2.2 Puissance installée par producteur en 2015. [3]..... | 18 |
| Figure 2.3. La centrale thermique 1227 MW de HAJRET EN NOUSS..... | 19 |
| Figure 2.4 Configuration de centrale à cycle combiné à arbre unique..... | 21 |
| Figure 2.5 Le corps et les éléments de la turbine à gaz modèle PG9371FB de (GE)..... | 22 |
| Figure 2.6 Les composants de la chaudière de récupération..... | 24 |
| Figure 2.7 Le rotor de la turbine à vapeur..... | 25 |
| Figure 2.8 Les composants du condenseur..... | 26 |
| Figure 3.1 Schéma fonctionnel du flux de gaz | 30 |
| Figure 3.2 Méthode d'évaluation de la conformité..... | 36 |
| Figure 3.3 chaine de traçabilité [26]..... | 38 |
| Figure 3.4 Modèle Rosemount 700 Chromatographe en phase gazeuse. [29]..... | 39 |
| Figure 3.5 Schéma de principe de la chromatographie en phase gazeuse..... | 40 |
| Figure 3.6 Plaque signalétique de bouteille de gaz de Calibration de centrale SKH..... | 42 |
| Figure 3.7 Rapport d'analyse (ISO) cas de la centrale de Hadjret En Nous..... | 43 |
| Figure 3.8 Rapport final de calibration cas de la centrale de Hadjret En Nous..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Figure 3.9 Les résultats d'analyse pour le méthane par rapport au cahier de charge de GC model 700 (le mois d'avril 2018)..... | 46 |
| Figure 3.10 Les résultats d'analyse de 4 échantillons de gaz naturel prélevés au niveau de la centrale thermique de HAJRET EN NOUSS..... | 47 |
| Figure 3.11 Comparaison entre les mesurages de (DC RDT/DTD) et les mesurages de (SNC LAVALIN)..... | 48 |
| Figure 3.12 Analyseur d'O2 (SERVOPRO 4900 SERVOMEX Emissions Analysers)..... | 51 |
| Figure 3.13 Analyseur de CO (Thermo 48 i CO Analyzer)..... | 51 |
| Figure 3.14 Analyseur de NOx (analyser Eco Physics CLD 800)..... | 52 |
| Figure 4.1. Impact du méthane sur le PCI..... | 56 |
| Figure 4.2 Impact du rendement sur la puissance..... | 56 |
| Figure 4.3. Impact du pouvoir calorifique inférieur sur le rendement..... | 57 |
| Figure 4.4 Emission atmosphérique..... | 60 |
| Figure 4.5 Impact de la quantité d'air et du gaz sur l'émission..... | 61 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1.1 Avantages et inconvénients des centrales diesel [6]..... | 4 |
| Tableau 1.2 Avantages et Inconvénients des centrales Thermiques à vapeur [8]..... | 5 |
| Tableau 1.3 Production électrique par des centrales hydroélectriques en Algérie [10]..... | 6 |
| Tableau 1.4 Avantages et inconvénients des centrales Hydroélectriques..... | 6 |
| Tableau 1.5 Avantages et Inconvénients de la centrale thermique à gaz..... | 7 |
| Tableau 1.6 Evaluation de la puissance installée par producteur [2]..... | 8 |
| Tableau 1.7 Avantages et inconvénients des centrales à cycle combiné [13]..... | 9 |
| Tableau 1.8 Projets d'hybridation des centrales diesel et TG des réseaux isolés du sud [3].... | 10 |
| Tableau 1.9 Avantages et Inconvénients des centrales hybrides [15]..... | 11 |
| Tableau 1.10 La liste des Projets d'énergie éolienne période 2011/2020 [3]..... | 12 |
| Tableau 1.11 Avantages et Inconvénients des centrales éoliennes [17]..... | 12 |
| Tableau 1.12 Les projets de centrales photovoltaïques en Algérie Période 2011-2020 [3]..... | 13 |
| Tableau 1.13 Avantages et Inconvénients de centrale photovoltaïque [19]..... | 13 |
| Tableau 1.14 Mix énergétique de la production électrique en Algérie en 2015..... | 14 |
| Tableau 1.15 Evolution le rendement par type d'équipement [3]..... | 15 |
| Tableau 2.1. Sommaire des caractéristiques de la centrale thermique SKH..... | 21 |
| Tableau 2.2 Les caractéristiques typiques de la vapeur produite par chacune des chaudières de récupération. [23]..... | 23 |
| Tableau 3.1. Caractéristiques chimiques du gaz naturel de Hassi R'MeL [23]..... | 32 |
| Tableau 3.2. Caractéristiques physiques du gaz naturel de Hassi R'MeL [23]..... | 33 |
| Tableau 3.3. Critères de conception et limites à respecter pour les émissions atmosphériques [23]..... | 34 |
| Tableau 3.4 Les résultats d'analyse pour le mois d'avril..... | 45 |
| Tableau 3.5 Tolérance des caractéristiques chimiques de chromatographe..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Tableau 3.6 Valeurs garanties du Contrat O&M telles que mesurées et ramenées simplement aux conditions de références..... | 49 |
| Tableau 3.7 Conditions de base pour les puissances garantie O&M..... | 49 |
| Tableau 4.1 Les influences du rendement..... | 55 |
| Tableau 4.2 Les limites des émissions atmosphériques..... | 59 |
| Tableau 4.3 Emissions atmosphérique..... | 60 |

Introduction générale

Avec une population estimée à 39,5 millions d'habitants au 1er janvier 2015, selon l'Office National des Statistiques (ONS), la consommation de l'Algérie en énergie a atteint 56 millions de tonnes équivalent pétrole (TEP) en 2014, pour une valeur avoisinant les 41 milliards de dollars US. En 2030, la demande énergétique risque de doubler dans les quinze (15) années à venir, et donc d'atteindre probablement près de 80 milliards de dollars US, d'autant plus que la consommation en gaz et en électricité connaît un rythme de croissance annuel de 14% à 18%. A noter que la forte hausse des besoins énergétiques, au niveau national, se traduira forcément par une diminution des exportations algériennes, et donc par une diminution des recettes financières si, parallèlement, aucun effort allant dans le sens de l'économie de l'énergie ne serait entrepris [1].

L'intérêt pour cette solution d'économie des énergies a été perçu très tôt en Algérie avec l'adoption d'une stratégie à long terme depuis le milieu des années quatre-vingt. Le premier objectif était de répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins [2]. Ce qui se traduisait sur le terrain par un développement durable qui permet le passage progressif de l'utilisation intensive des hydrocarbures à son renforcement par les énergies renouvelables tout en veillant à prendre en considération les aspects environnementaux. Le deuxième objectif était de tenir compte des recommandations relatives l'application de l'efficacité énergétique qui est perçue, aujourd'hui, et partout dans le monde, comme étant une activité créatrice de richesse et d'emplois. Elle est aussi considérée comme étant une réponse appropriée à la problématique d'approvisionnement en énergie électrique ou tout au moins elle permet de différer, en partie, les investissements en production électrique, en particulier.

Le programme de l'efficacité énergétique adopté par l'Algérie consiste à réduire graduellement la consommation. Sa mise en œuvre générerait une économie d'énergie cumulée de l'ordre de 90 millions de TEP, dont 60 millions sur la période

2015-2030 et 30 millions de TEP, au-delà de 2030, pour la période correspondant à la durée de vie des équipements utilisés et des constructions réalisées. Ainsi, Il permettrait pour l'année 2030 de réduire la demande en énergie d'environ 10%.

Ce programme consiste, principalement en la réalisation des actions suivantes [3] :

- l'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments.
- le développement du chauffe-eau solaire.
- la généralisation de l'utilisation des lampes à basse consommation.
- la promotion de la cogénération.
- la conversion au cycle combiné des centrales électriques quand cela est possible.

Dans quelle mesure cette dernière action relative aux centrales à cycles combinés contribue-t-elle dans l'application du programme de l'efficacité énergétique sans compromettre la protection de l'environnement ?

Pour répondre à cette question délicate, il nous a été proposé d'étudier l'impact de la composition du gaz combustible utilisée dans la centrale thermique à cycle combiné 1227 MW, SKH, sur la production d'électricité et l'environnement.

La présentation des résultats obtenus à l'issue de cette étude nous a suggéré de décomposer notre mémoire en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'évolution des centrales électriques par ordre historique. Le deuxième chapitre, est consacré à une présentation de la centrale 1227 MW, SKH, par une description du principe du cycle combiné ainsi que les différents éléments et les principaux circuits de la centrale.

Le troisième chapitre, est consacré à la présentation de l'ensemble des ressources métrologiques d'analyse par l'introduction des différents concepts de vérification de la qualité des mesures et du contrôle de conformité des appareils, utilisés dans le domaine de la métrologie. Finalement, Le quatrième et dernier chapitre nous permettra de présenter l'impact de résultats de notre étude et d'en tirer les conclusions.

Chapitre 1 Les centrales électriques en

Algérie

1.1 Introduction

En Algérie, les programmes de construction des infrastructures, de l'urbanisation et de la relance des activités économiques dans les filières industrielles, ont engendré l'augmentation des besoins en matière de consommation des différentes sources d'énergies. Pour satisfaire cette demande en forte croissance, le gouvernement a lancé depuis l'indépendance un vaste programme d'investissement dans la production de l'électricité. Cette politique prévoyait l'accès de la population à l'électricité et au gaz naturel comme une priorité absolue pour l'amélioration de la qualité de vie du citoyen et de la situation économique du pays.

La charte nationale en 1976, annonça la volonté de généralisation de l'électrification des ménagers à travers tout le territoire national.

1.2 Evolution des centrales électriques par ordre d'installation

1.2.1 Centrale diesel

Les centrales électriques diesel (nommées également groupes électrogènes) sont équipées d'un moteur diesel et d'un alternateur. Opérant en autarcie en tant qu'unités de production d'électricité, elles constituent un choix idéal sur les sites de production éloignés ou pour assurer l'alimentation de secours de grandes banques, d'hôpitaux, d'aéroports ou de villes entières. Certains pays et états insulaires produisent la majorité de leur électricité avec des centrales électriques diesel [4].

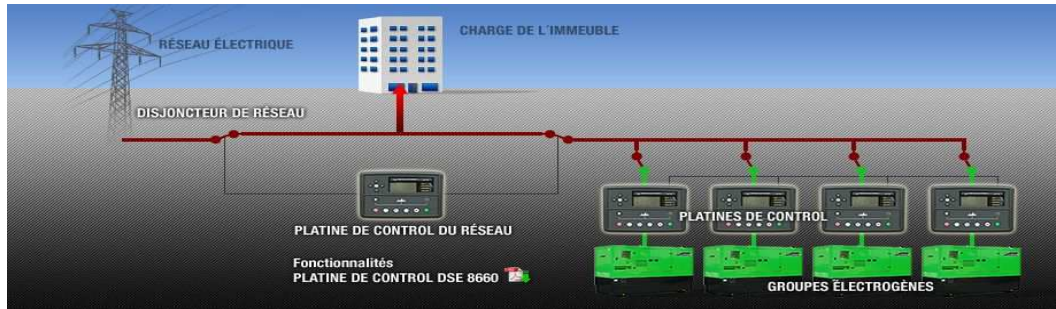


Figure 1.1. Schéma d'une centrale Diesel [5].

Avantages et inconvénients des centrales diesel

| Avantage | Inconvénients |
|--|---|
| Peuvent être construites près des centres de consommation. Coût de construction faible. Utiles dans les régions éloignées. Électricité disponible rapidement. | Pollution de l'air et de l'eau. Augmentent l'effet de serre. Coûts de production et d'entretien élevés. Risque de fuite de diesel lors de l'utilisation, et durant le transport. Énergie non renouvelable. Bruyantes. Compromettent l'entente de Kyoto. |

Tableau 1.1 Avantages et inconvénients des centrales diesel [6].

1.2.2 Centrale Thermique à vapeur

La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique. Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant le fluide moteur qui est en général de la vapeur d'eau.

Ce cycle comprend au moins les étapes suivantes :

- L'eau liquide est mise en pression par une pompe et envoyée vers la chaudière.
- L'eau est chauffée, vaporisée et surchauffé.
- La vapeur est envoyée vers la turbine, où elle se détend en fournissant de l'énergie mécanique.
- La vapeur détendue est condensée au contact d'une source froide.

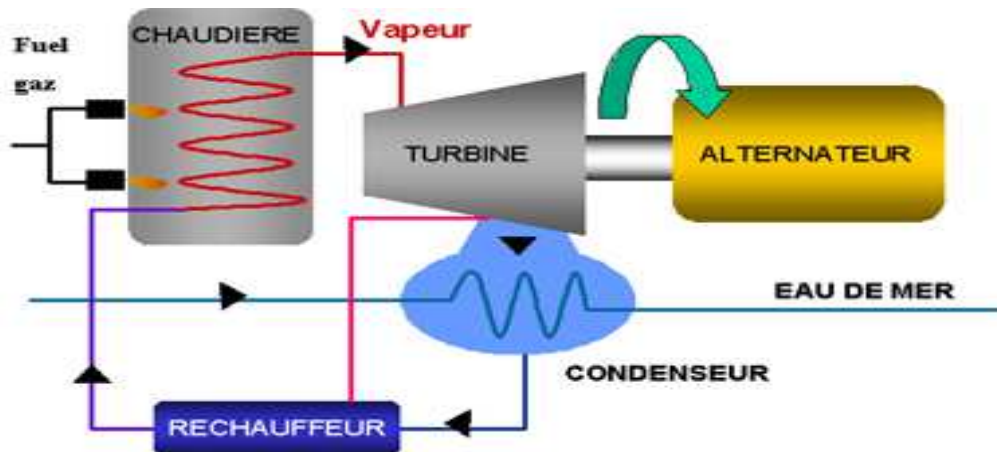


Figure 1.2. Schéma d'une centrale thermique à vapeur [7].

Avantages et inconvénients de la centrale vapeur

| Avantages | Inconvénients |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Peuvent être construites près des centres de consommation. Coût de construction faible. Technologie simple. Temps de construction relativement court. | <ul style="list-style-type: none"> Énergie primaire non-renouvelable. Pollution de l'air et de l'eau (effet de serre, précipitations acides). Risque de fuites. Risque d'accident durant le transport du combustible. Compromettent l'entente de Kyoto |

Tableau 1.2 Avantages et Inconvénients des centrales Thermiques à vapeur [8].

1.2.3 Centrale hydroélectrique

C'est une unité de production d'électricité dans laquelle le flux crée par l'eau amenée par écoulement libre (canaux) ou par des conduites en charge (conduites forcées) actionne la rotation des turboalternateurs, avant de retourner à la rivière. C'est une forme d'énergie renouvelable, propre et non polluante.

Il existe de petites centrales hydroélectriques qui transforment l'énergie sauvage d'une chute d'eau en énergie mécanique grâce à une turbine, puis en énergie électrique grâce à un générateur [9].

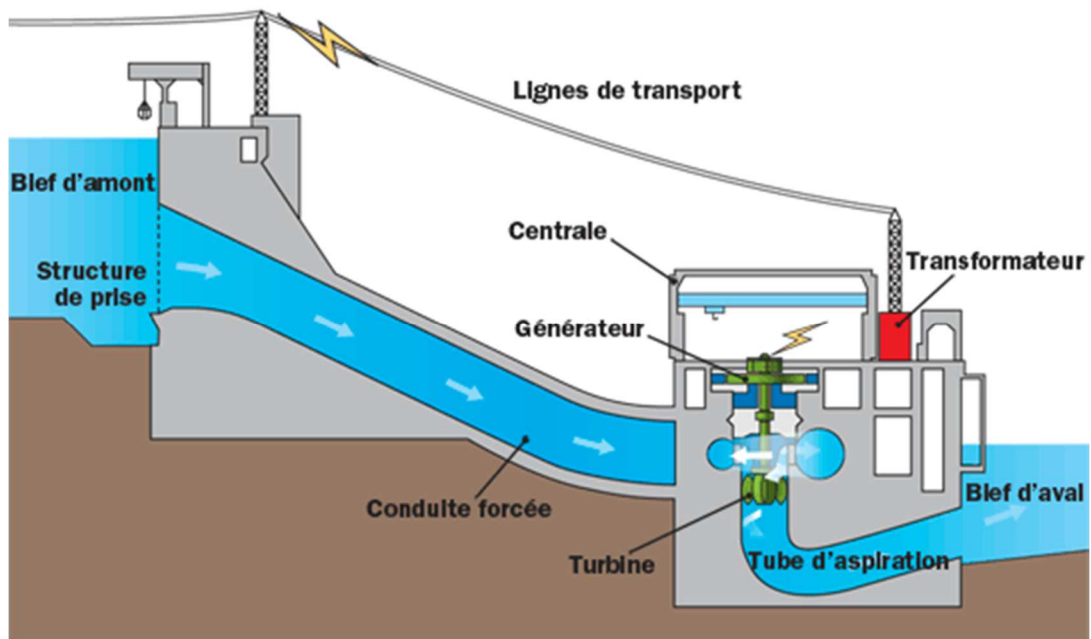


Figure 1.3. Schéma d'une centrale hydroélectrique [9].

a Centrales hydroélectriques en Algérie

| Centrale | Puissance installée (MW) | Centrale | Puissance installée (MW) |
|---------------|--------------------------|---------------|--------------------------|
| Darguina | 71.5 | IGHZERNCHEBEL | 2.712 |
| IghilEmda | 24 | GHRIB | 7.000 |
| Mansouria | 100 | GOURIET | 6.425 |
| Erraguene | 16 | BOUHANIFIA | 5.700 |
| SoukEI DJEMAA | 8.085 | OUED FODDA | 15.600 |
| Tizi MEDEN | 4.458 | BENI BEHDE | 3.500 |
| TESSALA | 4.228 | | |

Tableau 1.3 Production électrique par des centrales hydroélectriques en Algérie [10].

b Avantages et inconvénients des centrales Hydroélectriques

| Avantages | Inconvénients |
|---|--|
| Fiabilité. Durabilité. Énergie renouvelable. Coût de production moindre. Pas de pollution atmosphérique (effet de serre). | Coût de construction. Inondation du territoire. Pollution par le mercure. Construites à de grandes distances des lieux de consommation. Exigent un site avec dénivellation. Besoin de cours d'eau à fort débit. |

Tableau 1.4 Avantages et inconvénients des centrales Hydroélectriques.

1.2.4 Centrale Thermique à gaz (TG)

La combustion du gaz + air, fait tourner la turbine qui actionne l'alternateur.

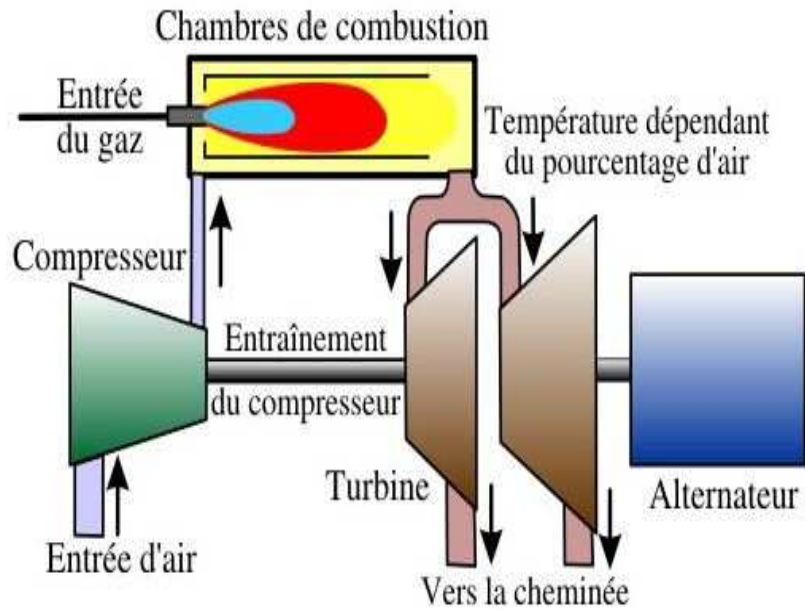


Figure 1.4. Schéma d'une centrale à turbine de gaz [11].

a Transformations d'énergie

Énergie chimique + air → Énergie cinétique → Énergie mécanique → Énergie électrique.

b Avantages et inconvénients des centrales thermiques à gaz

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| Production en fonction des besoins. Peuvent être construites près des centres de consommation. Coût de construction faible. La technologie est éprouvée. Délais de construction courts. | Pollution de l'air et de l'eau. Augmentent les gaz à effet de serre. Coûts de production élevés. Risque de fuite du gaz lors de l'utilisation, et durant le transport. Énergie non renouvelable. Compromettent l'entente de Kyoto. |

Tableau 1.5 Avantages et Inconvénients de la centrale thermique à gaz.

1.2.5 Centrale à cycle combiné

Les centrales à cycle combiné utilisent le gaz naturel comme combustible dans un système de production d'électricité en deux étapes. Une première turbine et un premier alternateur sont mis en mouvement suite à la combustion du gaz naturel. La chaleur des gaz d'échappement de la première turbine est récupérée pour produire de

la vapeur qui actionne une seconde turbine et un second alternateur.

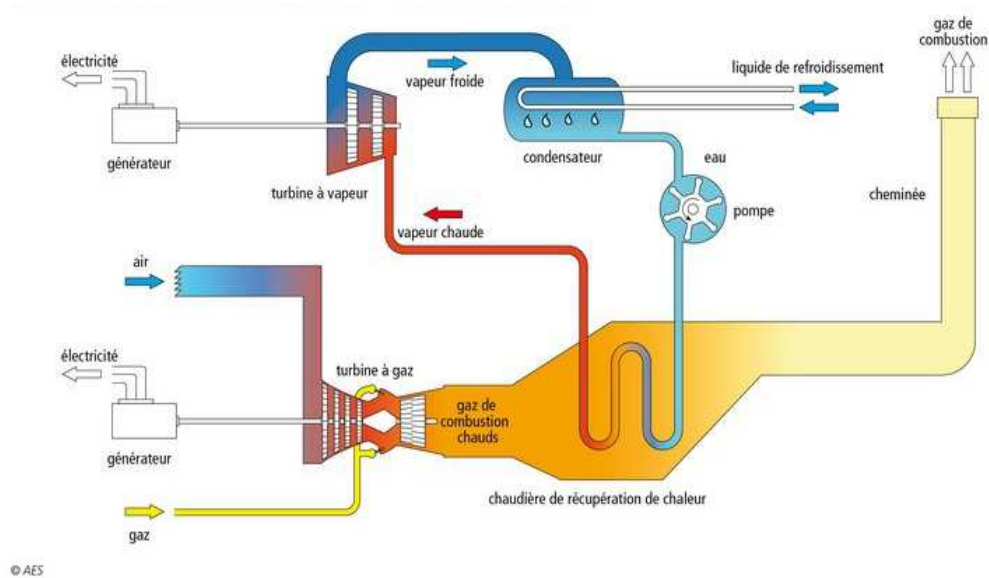


Figure 1.5. Schéma d'une centrale à cycle combiné [12].

a Production de l'électricité à partir des centrales thermique à cycle combiné

Le parc de production national est constitué des centrales électriques de la Société Algérienne de Production de l'Électricité (SPE), et des sociétés en partenariat, à savoir :

- Kahrama Arzew mise en service fin 2005
- Shariket Kahraba Skikda « SKS » mise en service en 2006
- Shariket Kahraba Berrouaghia « SKB » (Médéa) mise en service en 2007
- Shariket Kahraba Hadjret En nouss « SKH » mise en service en 2009.
- Shariket Kahraba Terga « SKT » mise en service en 2012.
- Shariket Kahraba KoudietEdraouch « SKD » mise en service en 2013.

Les 11 389 MW de capacité installée atteinte fin 2011, sont répartis comme suit :

| Producteurs | Production (MW) |
|---|-----------------|
| Kahrama Arzew | 345,3 |
| SKS Skikda | 825,0 |
| SKB Berrouaghia | 489,0 |
| SKH Hadjret En nouss | 1227,0 |
| SKT Terga (SKT), | 1200 |
| Shariket Kahraba Koudiet Edraouch (SKD) | 1200 |

Tableau 1.6 Evaluation de la puissance installée par producteur [2].

b Avantages et inconvénients des centrales à cycle combiné

| Avantages | Inconvénients |
|--|--|
| Les centrales sont rapides à construire. Cette technologie offre une grande flexibilité d'utilisation qui permet de répondre rapidement et précisément à la demande. Le thermique permet de construire des centrales de grande puissance. La production ne dépend pas de conditions extérieures autres que l'approvisionnement en combustible (l'énergie éolienne, par exemple, ne fonctionne pas sans vent). Coût de construction faible. | Cette technologie engendre des émissions de produits polluants et des gaz à effet de serre. les coûts de compensation des émissions polluants sont élevés. Le thermique utilise souvent des sources fossiles (charbon, fioul, gaz) dont les réserves sont physiquement limitées par la géologie terrestre et non-renouvelables à court et moyen terme. Énergie non renouvelable. Compromet l'entente de Kyoto. |

Tableau 1.7 Avantages et inconvénients des centrales à cycle combiné [13].

1.2.6 centrale Hybride

Le système hybride présente un double avantage afin de minimiser les perturbations de l'environnement, grâce à une consommation sur le lieu de production de ressources naturelles renouvelables et une sécurité d'approvisionnement, quelles que soient les conditions météorologiques. Il existe deux types de système de production hybride, système alterné et système parallèle. Le système alterné consiste en une association d'un système éolien, un système photovoltaïque et un groupe électrogène relié par un système de commutation entre les trois permettant d'assurer le passage d'un fonctionnement d'une source à une autre (selon les conditions météorologique jour et nuit). Par contre le système parallèle relie les deux sources (éolienne, photovoltaïque) en même temps à la batterie et le groupe électrogène intervient en secours (quand les batteries sont déchargées).

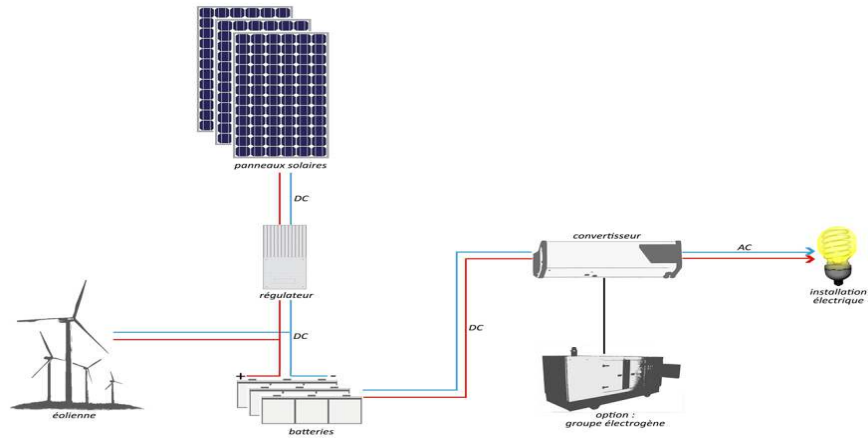


Figure 1.6. Schéma d'une centrale hybride parallèle [14].

a Projets d'hybridation des centrales diesel et TG des réseaux isolés du sud.

| Site | La puissance installée (MW) | Site | La puissance installée (MW) |
|---------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| AOULEF | 5 | BORDJ OMAR DRISS | 0.3 |
| ZAOUJET KOUNTA | 6 | DJANET | 3 |
| ADRAR | 20 | EL GOLEA | 8 |
| TIMIMOUN | 9 | IN GUEZZAM | 0.3 |
| KABERTENE | 3 | DEB DEB | 1 |
| REGGANE | 5 | AFRA | 0.03 |
| IN SALAH | 5 | M'GUIDEN | 0.14 |
| BENI ABBES | 7 | IDLESS | 0.44 |
| BORDJ BADJI MOKHTAR | 1 | BORDJ EL HOUAS | 0.3 |
| TINDOUF | 9 | TIN ALKOUM | 0.02 |
| TAMANRASSET | 13 | TIN ZAOUATINE | 0.4 |
| TABELBALA | 1 | AIN BELBEL | 0.05 |
| TALMINE | 1 | IN AMENAS | 8 |
| ILLIZI | 2 | | |

Tableau 1.8 Projets d'hybridation des centrales diesel et TG des réseaux isolés du sud [3].

***b* Avantages et inconvénients de la centrale hybride**

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| <p>Diminution de la consommation de carburant et des contraintes d'approvisionnement</p> <p>Indépendance énergétique et visibilité à long terme du coût de l'énergie.</p> <p>Durée de vie des groupes électrogènes allongée, maintenance allégée.</p> <p>Réduction des nuisances sonores et de la pollution de l'air du site.</p> | <p>Le contrôle automatique est obligatoire pour le fonctionnement correct du système.</p> <p>Le convertisseur électronique doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible.</p> <p>Le personnel, qui s'occupe du fonctionnement correct du système, doit être qualifié.</p> <p>Les batteries vieillissent rapidement (pas de chargeur).</p> |

Tableau 1.9 Avantages et Inconvénients des centrales hybrides [15].

1.2.7 centrale Eolienne

Le vent fait tourner les pales de l'éolienne qui agissent comme turbine et actionne l'alternateur.

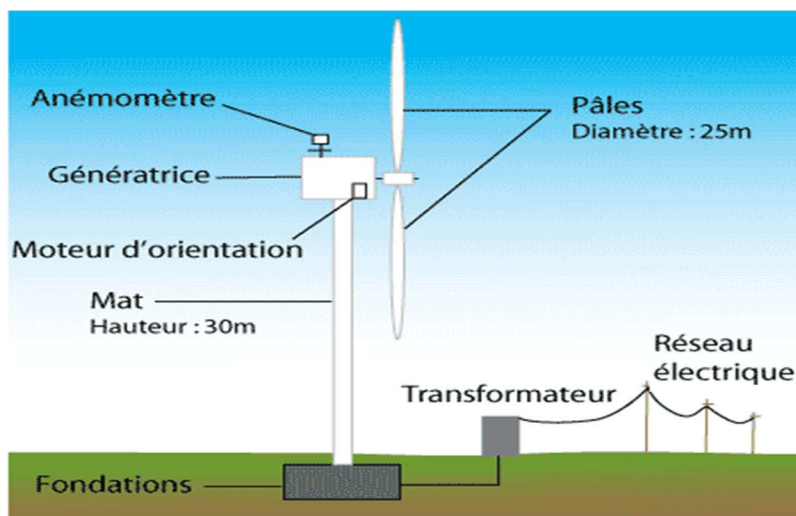


Figure 1.7. Schéma d'une Centrale éolienne [16].

***a* Projets de centrales éoliennes**

| Projet | Puissance à installer (MW) | Etat |
|-----------|----------------------------|------------------------------------|
| Kabertène | 10 | mise en service le 03 juillet 2014 |
| Projet 1 | 20 | En étude |
| Projet 2 | 20 | En étude |
| Projet 3 | 20 | En étude |
| Projet 4 | 50 | En étude |

| | | |
|----------|----|----------|
| Projet 5 | 50 | En étude |
| Projet 6 | 50 | En étude |

Tableaux 1.10 La liste des Projets d'énergie éolienne période 2011/2020 [3].

b Avantages et inconvénients des centrales éoliennes

| Avantages | Inconvénients |
|--|---|
| Source d'énergie renouvelable. Aucune pollution de l'air et de l'eau. Coût de production faible. | Elles exigent des sites venteux. Impossibilité d'emmagasiner le vent. Très bruyantes. Dangereuses pour les oiseaux. Le rendement est variable selon l'intensité du vent. Technologie à améliorer, afin d'obtenir un rendement supérieur. |

Tableau 1.11 Avantages et Inconvénients des centrales éoliennes [17].

1.2.8 Centrale Photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable. Elle permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque.

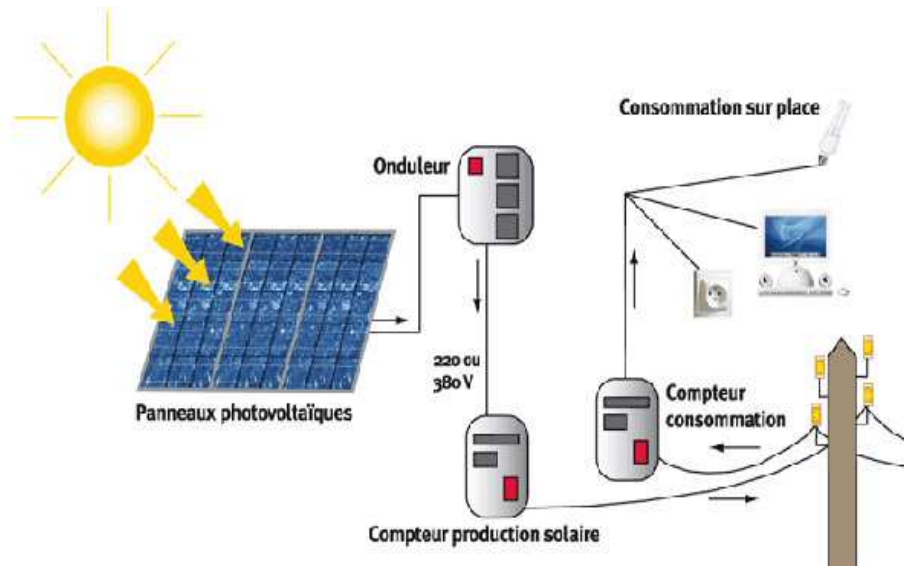


Figure .1.8 Schéma d'une centrale photovoltaïque [18].

a Projets de centrales photovoltaïques en Algérie Période 2011-2020

| Site | La puissance installée (MW) | Site | La puissance installée (MW) |
|------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|
| EL OUED | 18 | MEDEA | 20 |
| SAIDA | 25 | AIN OUSSARA | 26 |
| NAAMA | 25 | DJELFA | 48 |
| MECHRIA | 20 | BOUSSAADA | 22 |
| TISSEMSILT | 26 | BECHAR | 26 |
| EL-BAYADH | 30 | BISKRA | 25 |
| AIN BEIDA | 27 | M'SILA | 44 |
| TIARET | 20 | ABADLA | 9 |
| AFLOU | 16 | LABIOD SIDI CHEIKH | 8 |
| GHARDAIA | 20 | AIN SAFRA | 8 |
| LAGHOUAT | 20 | MGHAIR | 28 |
| TOUGGOURT | 23 | OULED DJELLAL | 10 |
| OUARGLA | 39 | TOLGA | 35 |

Tableau 1.12 Les projets de centrales photovoltaïques en Algérie Période 2011-2020 [3].

b Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

| Avantages | Inconvénients |
|---|--|
| <p>elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendre particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux. le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.</p> <p>Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.</p> <p>Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé. la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux.</p> | <p>La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologique et requiert des investissements d'un coût élevé.</p> <p>Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).</p> <p>Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.</p> |

Tableau 1.13 Avantages et Inconvénients de centrale photovoltaïque [19].

1.3 Parc de Production National

1.3.1 Puissance installée de production d'électricité

Beaucoup d'efforts ont été fournis par SONELGAZ et ses sociétés filiales pour le renforcement des capacités de production, qui a connu ces dernières années une évolution conséquente de la puissance de production d'électricité installée. Celle-ci est passée de 7 492 MW en 2005 à 17 238,6 MW en 2015, soit près de 10 000 MW additionnels mis en service en dix ans.

La production, qu'elle soit assurée par un ou plusieurs producteurs ou par des centrales utilisant de l'énergie renouvelable ou conventionnelle, reste l'un des plus importants segments dans l'architecture globale du secteur électrique. En Algérie, l'énergie électrique est produite, principalement, à partir de gaz naturel. La part de la puissance installée de l'ensemble des centrales utilisant cette énergie primaire dépasse les 96%, le reste des énergies employées se répartit entre le gazoil dans les centrales Diesel et l'eau dans les centrales hydroélectriques.

Le gaz est utilisé dans des centrales thermiques à vapeur, à gaz, ainsi que dans les centrales à gaz et à vapeur appelées centrales à cycle combiné. Le mix énergétique utilisé pour la génération de l'énergie électrique en Algérie est détaillé dans le tableau 1.14 [3].

| Type de centrale électrique | Energie produite (GWh) | Part de la production (%) |
|-----------------------------|------------------------|---------------------------|
| Centrales à gaz | 63 319 | 98% |
| Thermique vapeur | 10 227 | |
| Thermique gaz | 26 970 | |
| Cycle combiné | 26 122 | |
| Diesel | 276 | 0,4% |
| Energies renouvelables | 1 067 | 1,6% |
| Hybride | 889 | |
| Hydraulique | 145 | |
| Eolien | 19 | |
| Photovoltaïque | 14 | |

Tableau 1.14 Mix énergétique de la production électrique en Algérie en 2015.

Selon le tableau 1.14, la quasi-totalité de l'énergie consommée en Algérie est de source thermique.

Evaluation rendement par type d'équipement

| Type d'équipement | Rendement |
|---------------------|-----------------------|
| thermiques à vapeur | varie entre 38 et 42% |
| thermiques à gaz | 40% |
| cycle combiné | varie de 55 à 60% |

Tableau 1.15 Evolution le rendement par type d'équipement [3].

Les préoccupations soulevées par les producteurs d'électricité liées aux performances ainsi qu'à la souplesse d'exploitation ont été de nature à favoriser le développement des technologies des cycles combinés.

Depuis les premières centrales en cycle combiné mises en service au début des années 70, cette technologie a connu ses plus importantes évolutions avec l'amélioration des performances des turbines à gaz tant sur la taille que sur le rendement de ces dernières. Pour les cycles combinés dont les rendements varient de 55 à 60%, à chaque amélioration du rendement de 1 point, Correspond, environ 3 Nm³ (normo mètre cube) de gaz naturel épargné dans la production de chaque MWh électrique.

1.3.2 Performance technologique du cycle combiné

On appelle cycle combiné l'intégration en une seule unité de production de deux technologies complémentaires en termes de niveau de température : les turbines à gaz et les centrales à vapeur. Les premières fonctionnent à haute température (dans une machine moderne les gaz entrent typiquement à 1200 °C dans la turbine de détente, et en ressortent vers 500 °C), et les secondes opèrent à des températures plus basses.

La régénération permet d'augmenter sensiblement le rendement du cycle de Brayton, mais le pourcentage d'énergie ainsi récupéré est d'autant plus faible que les niveaux de température et de pression avec lesquels fonctionne ce cycle sont plus élevés. Dans les turbines à gaz modernes, la régénération est rarement possible ou économiquement intéressante.

Les cycles combinés permettent de valoriser l'enthalpie résiduelle des gaz d'échappement d'une turbine à gaz en s'en servant comme source chaude pour un deuxième cycle de production d'énergie mécanique.

Le cycle combiné ainsi obtenu est un mariage particulièrement réussi dans la recherche de l'amélioration du rendement thermique : avec les matériels disponibles actuellement, les rendements atteints dépassent 55 % et sont donc supérieurs à ceux que l'on peut espérer, même à moyen terme, des futures centrales à vapeur les plus avancées.

Dans un cycle combiné simple, la turbine à gaz fournit les deux tiers de la puissance totale. La turbine à vapeur, alimentée en vapeur surchauffée à des conditions de 85 – 100 bar et 510 - 540 °C, fournit le tiers restant. On appelle générateur de vapeur récupérateur GVR l'échangeur de chaleur qui assure le couplage thermique entre les deux cycles [20].

Chapitre 2 La centrale à cycle combiné 1227 MW

Shariket Kahraba Hadjret En Nouss

2.1 Introduction

Les impératifs de préservation de l'environnement imposent l'utilisation du gaz naturel comme énergie primaire pour la production d'électricité, par rapport aux autres énergies fossiles jugées polluantes, sachant que la ressource du gaz est largement disponible en Algérie.

La préoccupation environnementale exige aussi de développer d'autres énergies dites propres et renouvelables comme l'énergie solaire et éolienne, dont les gisements sont disponibles et abondants au sud du pays.

La répartition de la puissance installée par filière et par producteur pour l'année 2015 est illustrée dans les graphiques ci-après :

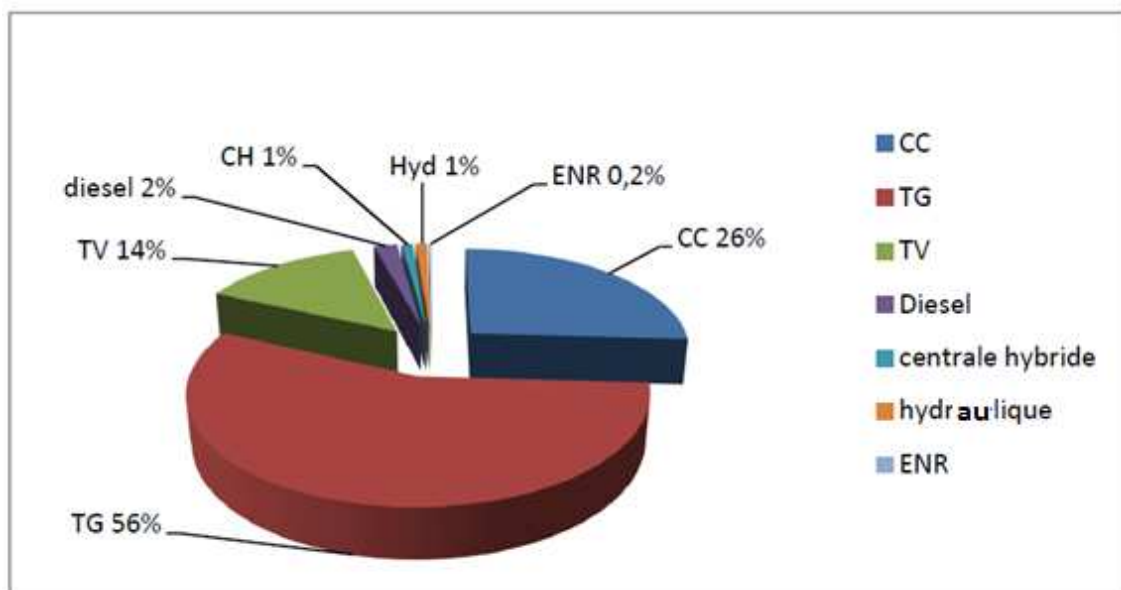


Figure 2.1 Puissance installée par type d'équipement en 2015. [3]

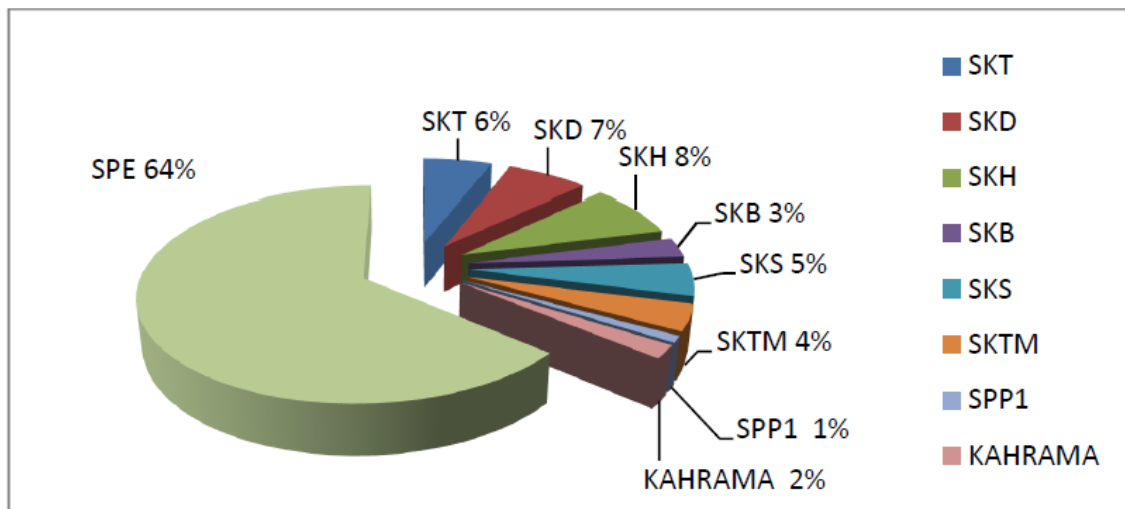


Figure 2.2 Puissance installée par producteur en 2015. [3]

L'énergie électrique algérienne produite en 2015 a étendue 64 662 MW, dont 40.40 % de cet énergie électrique totale a été produite par les cycles combinés soit environ 26 122 MW. Les chiffres clés 2017 fournis par SONELGAZ sont :

Capacité installée : 19 321 MW.

- SPE/SKTM : 14 175,7 MW.
- Autres producteurs : 5 145,4 MW.

Production d'électricité : 69 792 GWh.

- SPE/SKM : 36 631, 5 GWh.
- Autres producteurs : 33 60,8 GWh. [21]

Production de l'électricité en 2017-2027

La capacité supplémentaire nationale de production d'électricité au cours de la période 2017-2027 sera de 21 307 MW, dont 20 994 MW ont déjà été décidés et 313 MW sont en projets. [22]

Nous remarquons qu'en termes de capacité installée, les centrales à cycle combiné dont le début d'installation a commencé en 2005 sont classées deuxième après la Société Algérienne de Production de l'Électricité (SPE). Etant donné que ces centrales répondent aux critères d'efficacité énergétique, il est intéressant de considérer un cas réel représenté par la centrale à cycle combiné 1227 MW de Hadjret En Nouss comme échantillon pour étudier l'impact de la composition du Gaz combustible sur le rendement électrique et l'émanation des gaz à effet de serre et les déchets toxiques.

2.2 La centrale à cycle combiné (SKH)

SNC- Lavalin a conçu et construit une centrale thermique à cycle combiné à Hadjret En Nouss située dans la wilaya de TIPAZA, à environ 80 km à l'ouest d'Alger, pour fournir 1227 MW d'électricité, soit 6.35 % de la capacité installée en Algérie pour l'année 2017.

La production de l'électricité est obtenue au moyen de trois groupes turbines à arbre unique de général électrique (GE), soit trois unités de production d'une puissance d'environ 400 MW chacune et d'un rendement total d'environ 60%.

La centrale a une puissance nette d'environ 1 200 MW (combustible gaz naturel garantie à 30°C) ou 1 000 MW (combustible gasoil) comme combustible de secours. La centrale est exploitée toute l'année en charge de base pour répondre à la demande d'énergie vers un réseau général interconnecté. Sur une base annuelle, la centrale génère au maximum environ 10 TWh, ce qui correspond à une disponibilité de 94 % ou à 8 234 heures de fonctionnement par année.

C'est en 2009, alors que s'achevait la construction de l'usine, que SNC-Lavalin a obtenu un mandat distinct visant l'exploitation et l'entretien des installations pendant 20 ans [23].



Figure 2.3. La centrale thermique 1227 MW de HAJRET EN NOUSS.

2.2.1 Les intervenants au projet

Le promoteur du projet et maître de l'ouvrage est la société Shariket Kahraba Hadjret EnNouss SpA (SKH). Les actionnaires de la société sont :

- SNC Lavalin
- Sonelgaz
- Sonatrach
- AEC(AlgerianEnergyCompany)

2.2.2 Approvisionnement de la centrale

Le combustible principal de la centrale est le gaz naturel et le combustible de secours, le gasoil. L'exploitation de la centrale nécessite approximativement 2 000 millions de mètres cubes de gaz naturel par année.

Le gaz naturel est livré au site par l'intermédiaire d'une nouvelle conduite de gaz à haute pression installée par SONEGAS.

Un poste de détente et une station de mesurage installés sur le site de la centrale assurent l'ajustement définitif de la pression d'alimentation du gaz naturel [23].

2.3 Configuration générale de la centrale SKH

La centrale SKH est pourvue des principales composantes suivantes :

- Turbines à Gaz et alternateurs
- Chaudières de récupération
- Turbines à vapeur et alternateurs
- Station de pompage/condenseur/système de refroidissement
- Transformateurs élévateurs et poste de départ

La centrale est d'une configuration à arbre unique. Dans ce cas, la turbine à gaz et la turbine à vapeur sont assemblées sur un arbre commun et par conséquent, les deux turbines entraînent un seul alternateur. La figure 2.4 présente un schéma simplifié d'une configuration de ce type.

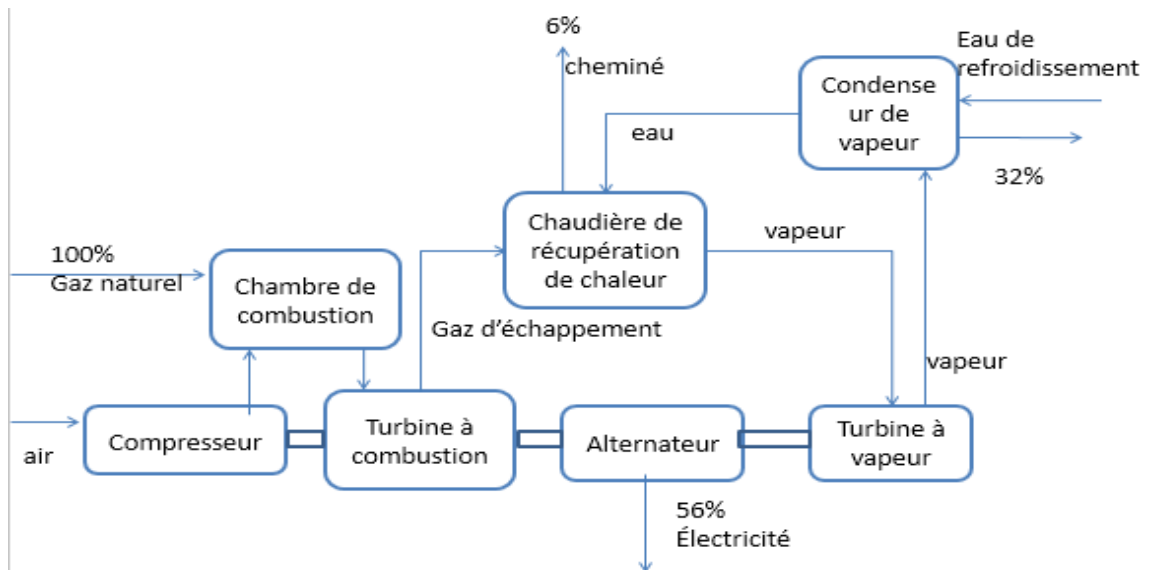


Figure 2.4 Configuration de centrale à cycle combiné à arbre unique

| Caractéristique | |
|--|--|
| Modèle de turbine | PG9371FB |
| Puissance brute générée par les turbines à gaz(1) (MW) | 3 x 425 |
| Puissance brute générée par les turbines à vapeur (MW) | |
| Puissance brute totale générée (MW) | 1275 |
| Puissance totale nette (MW) (garantie à 30°C) | 1227 |
| Consommation de gaz naturel par turbine (t/h) | 57.24 |
| Consommation de gaz naturel par brûleurs d'appoint (t/h) | 0 |
| Vapeur générée par les chaudières de récupération (t/h) | 3 x 381 |
| Débit d'eau de circulation (m3/h) | 84000 |
| Equipement intérieur : | |
| . Turbines à combustion | 3 |
| . Turbine à vapeur | 3 |
| . Alternateurs | 3 |
| . Condenseurs | 3 |
| Autres équipements intérieurs : | |
| . Unité de dessalement de l'eau de mer | Oui |
| . Systèmes auxiliaires | Oui |
| . Unité de déminéralisation d'eau | Oui |
| Equipement extérieur : | |
| . Cheminées | 3 |
| . Transformateurs | 3 |
| . Poste de départ | 3 |
| . Chaudières de récupération | 3 |
| Contrôle des émissions atmosphériques | Turbine à faible dégagement d'oxydes d'azote (NOx) |

Tableau 2.1. Sommaire des caractéristiques de la centrale thermique SKH.

2.3.1 Turbine à gaz

La turbine à gaz constitue le cœur du cycle composite et détermine les principales caractéristiques des autres équipements de production en aval. Le modèle sélectionné est le modèle PG9371FB de GE (général électrique).

Les turbines sont dotées d'un système de combustion étagé avec pré-mélange d'air et de gaz de combustion, afin de réduire les émissions atmosphériques, ainsi que d'un système de suivi de combustion dynamique.

Les alternateurs des turbines à gaz ont une capacité nominale d'environ 330 MVA à une température du gaz froid de 40°C, la sortie a une fréquence de 50 Hz, et une tension de 15,75 kV ou 17,5 kV en fonction de la configuration.

Les turbines à gaz ont leur propre enceinte acoustique dotée de dispositifs de levage ainsi que de système de ventilation et de protection contre l'incendie. Elles sont reliées à un alternateur à excitation statique refroidi à l'hydrogène. Le système de démarrage est à convertisseur statique. L'entrée des turbines à gaz est dotée de filtres à air autonettoyants à débit pulsé.

Durant les périodes chaudes, afin d'augmenter le rendement des turbines à gaz, l'air de combustion est refroidie par des refroidisseurs [31].

La figure 2.5 présente le corps et les éléments de la turbine à gaz

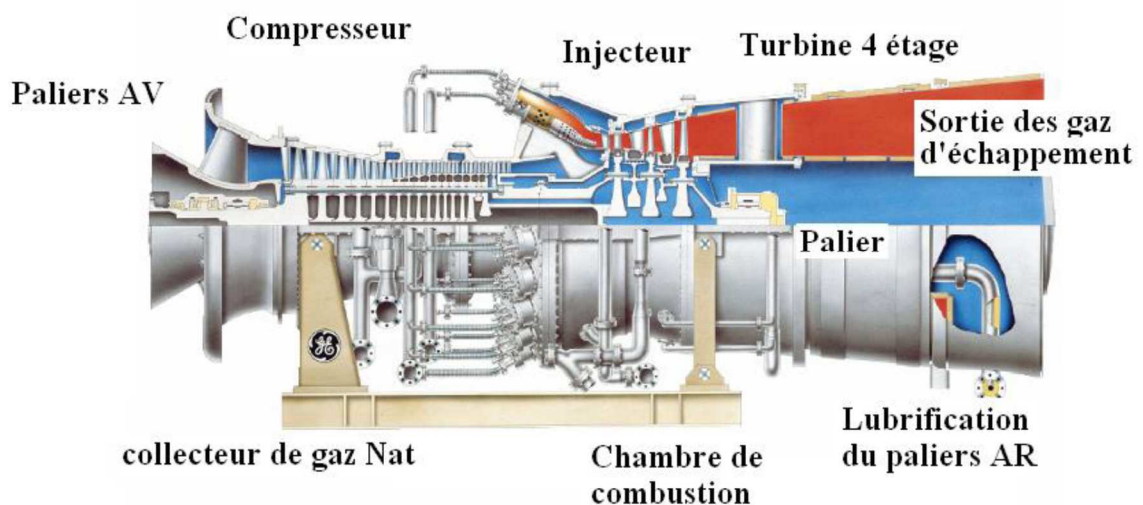


Figure 2.5. Le corps et les éléments de la turbine à gaz modèle PG9371FB de (GE).

2.3.2 chaudières de récupération

Les trois turbines à gaz de la centrale sont chacune équipées d'une chaudière de récupération incluant des bruleurs d'appoint (HRSG – HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR), cette dernière produit de la vapeur à 3 niveaux de pression différents, ce qui permet une récupération très poussée de l'énergie thermique contenue dans les gaz d'échappement en limitant au maximum les pertes d'énergie à la cheminée. Les chaudières de récupération sont installées à l'extérieur des bâtiments principaux. La hauteur minimale de chaque cheminée est environ 55 m.

La chaudière de récupération de chaleur (HRSG) consiste en un ensemble d'échangeurs tubulaires de chaleur par convection, où les gaz chauds d'échappement de la turbine à gaz, réchauffent l'eau et la vapeur qui circulent à l'intérieur des tubes. Les chaudières de récupération de chaleur peuvent être de types et de configurations diverses.

Le type le plus répandu est celui à trois niveaux de pression avec surchauffeur et réchauffeur intermédiaire. [23]

Les caractéristiques de la chaudière de récupération :

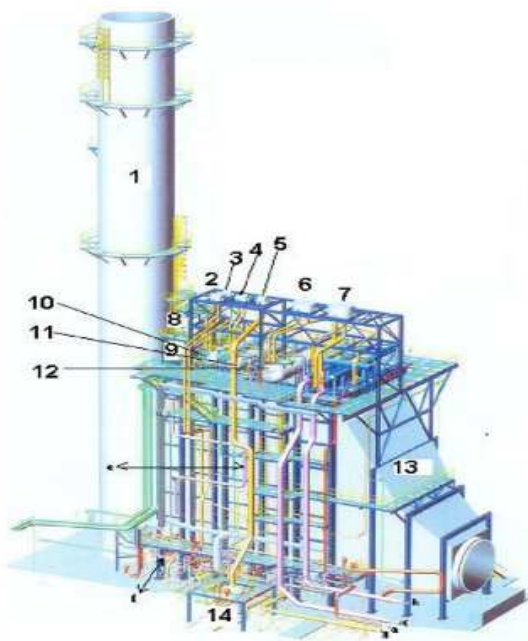
- Fabricant : Doosan
- Tirage : Flux de Gaz horizontal avec Circulation naturelle
- 3 niveaux Pression et réchauffement intermédiaire
- Hauteur de la Cheminée : 65 m
- Diamètre de la Cheminée : 6,9 m
- Température des Gaz de sortie : 82,8 °C

Propriétés de la Vapeur à la sortie de chaque étape de la Chaudière de Récupération

| | Haut pression | Moyenne pression | Basse pression |
|----------------|---------------|------------------|----------------|
| Pression Bar | 124 | 34 | 4 |
| Température C° | 565 | 565 | 302 |
| Débit t/h | 464 | 10 | 7 |

Tableau 2.2. Les caractéristiques typiques de la vapeur produite par chacune des chaudières de récupération. [23]

Composants de la chaudière de récupération :



1. Cheminée
2. Silencieux vapeur basse pression
3. Silencieux dégazeur
4. Silencieux vapeur moyenne pression
5. Silencieux ballon d'éclatement
6. Silencieux vapeur haute pression
7. Silencieux resurchauffeur
8. Sortie de gaz
9. Collecteur des incondensables
10. Ballon basse pression
11. Ballon moyenne pression
12. Ballon haute pression
13. Arrivée des gaz d'échappement TG
14. Ballon d'éclatement

Figure 2.6 Les composants de la chaudière de récupération.

2.3.3 Turbines à Vapeur

Les turbines à vapeur sont de type « à condensation avec resurchauffe ». La vapeur haute pression produite dans les chaudières de récupération est injectée dans les turbines où elle est détendue. Les turbines à vapeur de type à arbres multiples sont équipées d'un alternateur à excitation statique refroidi avec des échangeurs air/eau (TEWAC : Totally enclosed horizontal water-air cooled).

Les alternateurs des turbines à vapeur ont une capacité nominale d'environ 270 MVA à une température de gaz froid de 40°C et la sortie à une fréquence de 50 Hz et une tension de 15.75 kV [23].



Figure 2.7 Le rotor de la turbine à vapeur.

2.3.4 Le Condenseur

La vapeur saturée qui s'échappe des turbines à vapeur est condensée dans un échangeur à faisceau tubulaire refroidi par une circulation continue d'eau de mer. Un condenseur est requis pour chaque turbine à vapeur et l'eau ayant circulée dans le condenseur est rejetée en totalité dans la mer. Par contre le condensat, qui circule en circuit fermé, sera retourné aux chaudières de récupération afin d'y être de nouveau évaporé, pressurisé et surchauffé aux conditions requises par la turbine à vapeur [23].

Caractéristiques du condenseur :

- Fabricant : FOSTER WHEELER
- Modèle : Rectangulaire,
- Entrée de Vapeur : verticale
- Nombre de Passe : 2
- Nombre de Tubes : 11826
- Diamètre des Tubes : 25.4 mm
- Longueur des Tubes : 10028 m
- Matériel des Tubes : Titane
- Débit d'Eau de Circulation : 20387 m³/h
- Débit de Vapeur : 362.61 Tm³/h
- Pression de Travail : 0.030701 Bar
- Système de Propreté de Tubes : procédé Taprogge

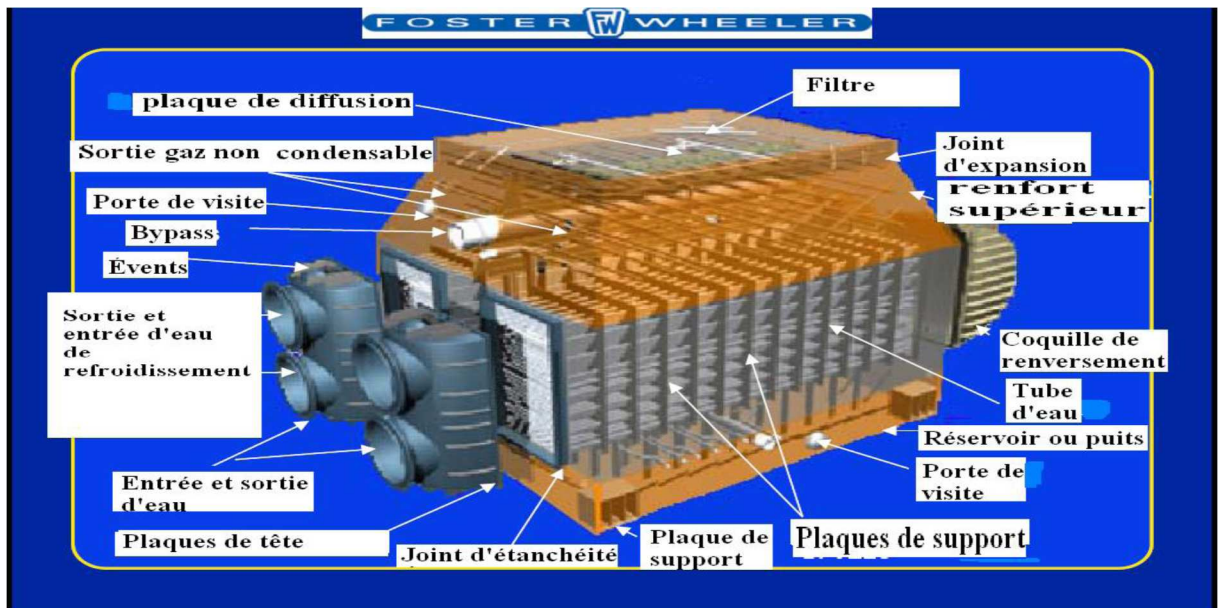


Figure 2.8. Les composants du condenseur.

2.3.5 Systèmes de refroidissement des équipements auxiliaires

La centrale est équipée d'un système de refroidissement pour chaque groupe incluant entre autres les turbines, les alternateurs, le circuit d'huile de lubrification, les pompes et les compresseurs. Le refroidissement de chaque groupe est assuré par un circuit fermé où circulera de l'eau qui sera refroidie en passant par un échangeur de chaleur à plaques, où circulera de l'eau de mer.

2.3.6 Utilisation de l'eau

L'approvisionnement en eau nécessaire à la centrale se fait à partir d'une prise d'eau et d'une station de pompage. La majeure partie (99%) de l'eau de mer, soit environ 84 000 m³/h, est utilisée dans le procédé, sans être dessalée comme eau de circulation pour le condenseur (utilisation principale) et pour le refroidissement des systèmes auxiliaires du groupe turbines à vapeur. L'autre partie de l'eau de mer (1%) passera dans le système de dessalement avant d'être utilisée dans le procédé comme :

- Eau d'appoint pour les chaudières de récupération (après traitement de déminéralisation)
- Eau de service (nettoyage des équipements, planchers , etc ..)
- Eau de protection d'incendie
- Eau potable

2.3.7 Transformateurs et poste de départ

Afin d'élever la tension de livraison à 400 kV, un poste de départ est érigé à l'extérieur des bâtiments abritant les turbines. Ce poste comprendra principalement trois transformateurs éleveurs de tension et l'équipement d'interface reliant deux lignes à 400 kV. La compagnie d'électricité (Sonelgaz) fournit la ligne de transport qui permet de relier la centrale à son réseau interconnecté de distribution électrique.

2.3.8 Equipements connexes

a Génératrice de démarrage

La centrale est équipée d'un ensemble de groupes diesel qui permettront d'alimenter les composants critiques de la centrale dans l'éventualité d'arrêt ainsi que pour son redémarrage. Ces génératrices sont alimentées au Gasoil.

b Transformateurs auxiliaires

Contrairement aux transformateurs principales, les transformateurs auxiliaires diminuent la tension de 18.5 KV jusqu'à 6.6 KV et cela pour l'alimentation des auxiliaires (pompes, moteur, ventilateur, éclairage, etc.). [23]

c Raccordement du gaz naturel

Pour alimenter les 2000 millions m³/an de gaz naturel par année, la centrale est raccordée au réseau de Sonelgaz. Le gaz naturel est filtré, comprimé ou détendu et réchauffé avant d'être injecté aux turbines à gaz, dans une station de traitement.

d Entreposage des combustibles et des produits chimiques

Il s'agit de réservoirs de stockage du gasoil qui servira pour les groupes diesel et comme combustible d'appoint pour les turbines à gaz et des aires d'entreposage confinées et conçues pour le stockage d'huile de lubrification et de produits chimiques.

2.3.9 Bâtiments connexes

- ***Bâtiment administration/entretien***

Ce bâtiment comprend des bureaux, une cantine et une aire d'entretien pour usage comme magasin et pour la réparation d'équipement et appareillage

- ***Poste de garde***
- ***Usine de dessalement/déminéralisation***
- ***Salles électriques et salle de contrôle***
- ***Traitement des eaux***
- ***Poste de très haute tension de type fermé à isolation gazeuse (GIS)***

2.4 Conclusion

Ce chapitre n'aurait pas abouti sans la courtoisie de SNC Lavalin qui a mis à notre disposition la documentation essentielle sur la conception de la centrale SKH à partir de laquelle nous avons repris ou résumé certains passages. Ainsi il a été possible de déterminer à travers la présentation de la centrale, les postes clés dans lesquels intervient la combustion du gaz en entrée et en sortie. Il est maintenant tout à fait naturel de procéder, dans les deux chapitres suivants à l'analyse métrologique de la composition du gaz et de son impact aux niveaux de ces postes.

Chapitre 3 Présentation des ressources métrologiques d'analyse

3.1 Introduction :

Que ce soit au niveau de la production, de la gestion de la qualité ou des essais de conformité, la globalisation des marchés et la concurrence accrue imposent de nos jours à toute entreprise une fonction métrologie non seulement performante et adaptée aux besoins, mais aussi apte à prouver aux clients l'exactitude des mesures et le bien-fondé des méthodes.

La qualité s'appuie et s'appuiera toujours sur des essais et des mesures tant il est vrai que l'on ne progresse que si l'on mesure. La qualité même de ces mesures repose sur une bonne métrologie.

La métrologie industrielle, consiste à organiser l'ensemble des ressources métrologiques de l'entreprise dans le but de :

- maîtriser les caractéristiques de ses instruments (étalonnage).
- maîtriser les performances des opérateurs (formation).
- maîtriser les spécificités de ses produits (le métier).
- maîtriser les exigences de ses clients (la relation commerciale).
- maîtriser les exigences de son référentiel qualité (l'excellence).

En définitive, la maîtrise de la mesure dans le cadre de la métrologie industrielle, permet de :

- maîtriser la conformité des produits.
- maîtriser les coûts.
- garantir une meilleure rentabilité.
- augmenter la satisfaction du client.

Nous nous proposons donc dans ce chapitre de présenter l'organisation de l'ensemble des ressources métrologiques qui nous permettront d'analyser la

composition du gaz combustible à l'entrée de la chaîne de production et son impact à la sortie. Il est évident qu'une telle étude aura pour objectifs tout d'abord de garantir les résultats de notre travail et de fournir un modèle qui servira comme exemple pratique pour l'enseignement de la métrologie industrielle au niveau du Master instrumentation.

3.2 Structure de la chaîne de production

3.2.1 Schéma fonctionnel du flux de gaz

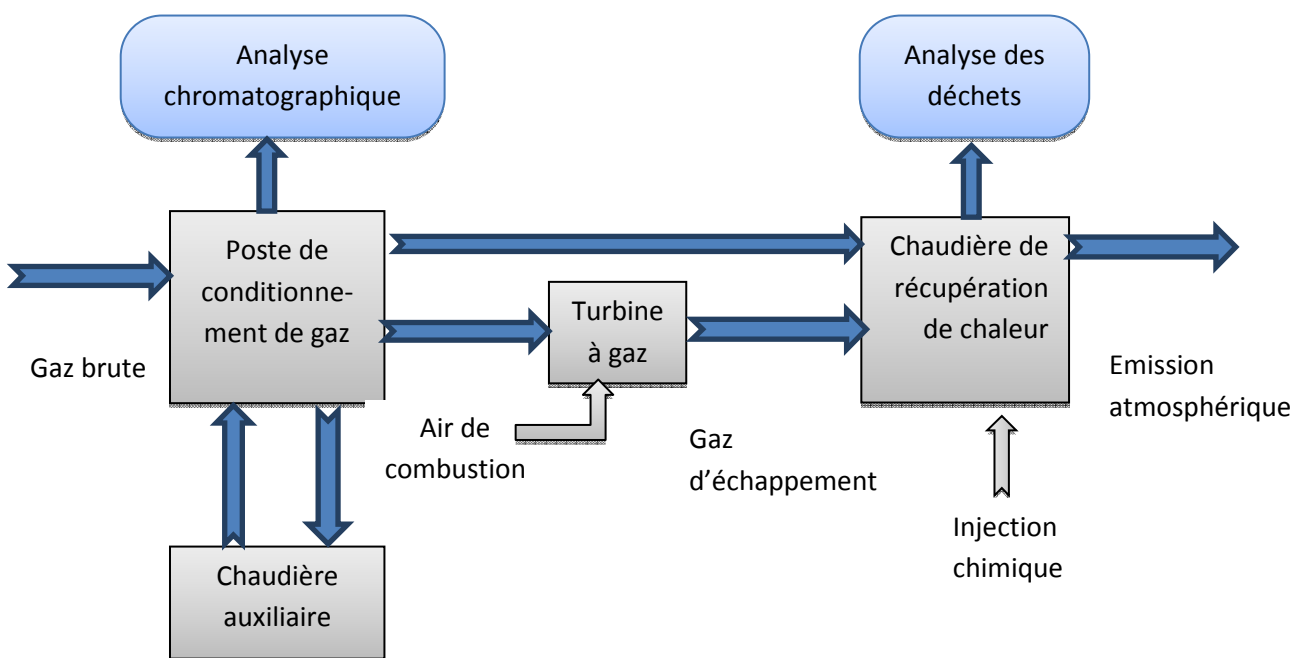


Figure .3.1 Schéma fonctionnel du flux de gaz

Le réseau SONEGAS fournit 2000 millions de mètres cubes par an à l'entreprise. La centrale reçoit du gaz avec une pression de 69 bars mesurée par le manomètre situé à l'entrée du système de conditionnement. Le gaz est alors filtré et détendu pour être dirigé vers le chromatographe et la chaudière auxiliaire avant d'être injecté dans la turbine à gaz.

La cheminée reçoit les résidus de combustion du gaz à la sortie de la turbine à gaz ainsi que les résidus du processus de filtration du gaz à la sortie du système de conditionnement et procède à son envoi dans l'air. Une analyse des déchets est

effectuée par un système de surveillance continue des émissions atmosphériques en sortie.

3.2.2 Les caractéristiques imposées par le producteur liées au Gaz

a Pression du gaz

- La pression du gaz naturel vers le système de conditionnement varie de 41 à 69 barg. (Barg = le bar gauge (aussi appelé le bar relatif))
- Les pressions cibles du gaz naturel à la sortie du système de conditionnement vers la centrale sont de :
 - ✓ 35.5 à 38 barg, vers les turbines des tranches.
 - ✓ 2.5 barg, vers Les chaudières auxiliaires.
 - ✓ 1.37 à 1.72 barg, vers le chromatographe.

Les instruments de mesure de pression utilisés au niveau de la centrale sont des manomètres et des transmetteurs de pression [23].

b Débit du gaz

Le dimensionnement du système de gaz naturel tient compte des débits de consommations tolérés suivants :

- ✓ D'un minimum de 302 Nm³/min à un maximum de 1274 Nm³/min. pour chaque tranche
- ✓ D'un minimum de 5 Nm³/min à un maximum de 62 Nm³/min. pour les chaudières auxiliaires
- ✓ D'un minimum de 302 Nm³/min à un maximum de 3864 Nm³/min. pour l'entrée du système de conditionnement

Les instruments de mesure de débit utilisés au niveau de la centrale sont des débitmètres et des transmetteurs de débit [23].

c *Température*

- ✓ La température du gaz naturel vers le système de conditionnement varie de 5 à 43 °C.
- ✓ La température du gaz naturel à la sortie du système de conditionnement vers la centrale est de 15 °C minimum continue.
- ✓ La température de combustion air-gaz est 1928 °C.
- ✓ La température de combustion oxygène-gaz est 1928 °C.
- ✓ La température ambiante varie de -10 °C à 60 °C

Les instruments de mesure de la température utilisés au niveau de la centrale sont des thermomètres et des thermocouples [23].

d *Composition du gaz combustible*

Le combustible principal est le gaz naturel de HASSI R'MEL, dont les caractéristiques chimiques et physiques mentionnées dans les tableaux 3.1 et 3.2, sont analysées par le chromatographe (Rosemount modèle 700) :

| Constituants | Constituants symbol | Pourcentage molaire % minimum | Pourcentage molaire % maximum | Pourcentage molaire % moyenne |
|----------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Hélium | He | 0.11 | 0.21 | 0.15 |
| Azote | N2 | 3.32 | 6.00 | 4.44 |
| Dioxyde de carbone | CO2 | 0.18 | 0.30 | 0.24 |
| Méthane | CH4 | 82.80 | 87.38 | 85.30 |
| Ethane | C2H6 | 6.77 | 7.90 | 7.29 |
| Propane | C3H8 | 1.48 | 2.15 | 1.73 |
| i-butane | IC4H10 | 0.20 | 0.40 | 0.26 |
| n-butane | NC4H10 | 0.30 | 0.50 | 0.40 |
| i-pentane | IC5H12 | 0.07 | 0.16 | 0.09 |
| n-pentane | NC5H12 | 0.07 | 0.17 | 0.10 |
| Constituants lourdes | C6+ | 0.00 | 0.20 | 0.00 |

Tableau 3.1. Caractéristiques chimiques du gaz naturel de HassiR'Mel [23].

| | |
|--|---|
| Pouvoir calorifique supérieur (PCS) | Compris entre 9320 et 9420 kcal/m ³ Valeur moyenne : 9380 kcal/ m ³ à (15°C ,1 bar) |
| Pouvoir calorifique inférieur (PCI) | Compris entre 8420 et 8510 kcal/ m ³ à (15°C ,1 bar) |
| Rapport des chaleurs spécifiques à pression constante et à volume constant | CP/CV= 1.26 |

Tableau 3.2.Caractéristiques physiques du gaz naturel de Hassi R'MeL [23].

e Capacité de production

La centrale a une puissance nette d'environ 1 200 MW (combustible gaz naturel garantie à 30°C) ou 1 000 MW (combustible gasoil) comme combustible de secours.

Sur une base annuelle, la centrale génère au maximum environ 10 TWh, ce qui correspond à une disponibilité de 94 % ou à 8234 heures de fonctionnement par année. L'exploitation de la centrale nécessite approximativement 2 000 millions de mètres cubes de gaz naturel par année.

La puissance de production est mesurée à l'aide de compteurs installés au niveau de la station de départ de réseau d'électricité [23].

f Déchets de production

Les principaux aspects environnementaux de la centrale touchent les émissions atmosphériques, les effluents, la gestion des matières dangereuses et de l'impact du bruit. Ces aspects doivent être considérées de manière préliminaire en fonction du degré d'avancement des études, puis évaluer précisément afin d'en quantifier les impacts.

La combustion du gaz naturel dans des turbines à gaz génère principalement des oxydes d'azote et du monoxyde de carbone (l'émission de particules est pratiquement nulle lors de l'utilisation du gaz naturel). L'utilisation de la technologie de General Electric (fabricant des turbines) permet de répondre aux spécifications du tableau suivant :

| Contaminant | Critère de conception | Limites à respecter |
|---|-----------------------|---------------------|
| NOx (mg/Nm ³ – 15% O ₂ , sec) | 53 | 75 |
| CO (ppmvd 15% O ₂) | 15 | <15 |
| SO ₂ (mg/Nm ³ – 15% O ₂ , sec) | 1.9 | 35 |
| PM10 (mg/Nm ³ – 15% O ₂) | 3.5 | 5 |

Tableau 3.3. Critères de conception et limites à respecter pour les émissions atmosphériques [23].

3.2.3 Les infrastructures métrologiques

La métrologie est la science de la mesure associée à une évaluation de l'incertitude de cette mesure. Elle définit les principes et les méthodes permettant de garantir et de maintenir la confiance envers les mesures résultant des processus de mesure. Il s'agit d'une science transversale qui s'applique dans tous les domaines où des mesures quantitatives sont effectuées.

Dans un ou des mesurages, une incertitude de mesure caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées.

La métrologie est divisée en trois catégories comprenant différents niveaux de complexité et d'exactitude :

- La métrologie scientifique
- La métrologie industrielle
- La métrologie légale [24].

Pour assurer la meilleure qualité de mesure au niveau de la centrale, tous les appareils doivent être soumis aux normes de la métrologie en termes de capabilité, de conformité, d'étalonnage, de calibration et de traçabilité. Toutes les opérations de maintenances des instruments doivent être enregistrées et approuvées.

a Capabilité

Dans un processus de production :

- Les produits sont fabriqués dans des tolérances de fabrication, soit *IT* l'intervalle de tolérance d'une caractéristique que l'on veut mesurer ;

- Les mesurages sont effectués avec des moyens de mesure ayant leur incertitude propre, soit U l'incertitude élargie du moyen de mesure.

On appellera **capabilité d'un moyen de mesure** le rapport existant entre l'incertitude U du moyen de mesure et la tolérance IT de la caractéristique. Certaines normes préconisent que ce rapport, dans des relations client-fournisseur, doit être inférieur à $1 / 8$. Cette relation s'écrit :

$$U \leq IT/8$$

La notion de capabilité doit vérifier qu'il y a un équilibre entre la tolérance à vérifier et l'incertitude de mesure. Si cette relation est vérifiée, alors on peut mettre en œuvre le processus de mesure et déclarer la conformité dans un processus de production [25].

***b* Conformité**

Selon la norme ISO/CEI 17000, l'évaluation de la conformité est « la démonstration que des exigences spécifiées relatives à un produit, processus, système, personne ou organisme sont respectées ».

Au sens strict, l'évaluation de la conformité est « l'opération qui consiste à vérifier que des produits, matériaux, services, systèmes ou individus sont conformes aux spécifications d'une norme pertinente »

Le tableau 3.4 ci-dessous présente une méthode permettant la déclaration de la conformité des moyens de mesure mis en œuvre aux seins de la centrale, selon les exigences de tolérances imposées par le producteur.

| | Cas 1 | Cas 2 | Cas 3 | Cas 4 | Cas 5 |
|-----------------------------|---|---|---|--|--|
| | le résultat mesuré est sous la limite supérieure, même lorsque augmenté de la moitié de l'intervalle de l'incertitude. Le produit est donc conforme aux spécifications. | le résultat mesuré est au-dessous de la limite supérieure, mais avec une marge plus petite que la moitié de l'intervalle; Il n'est donc pas possible de statuer sur la conformité. Cependant, Lorsqu'un niveau de confiance de moins de 95% est acceptable, une déclaration de conformité peut être possible. | Le résultat mesuré est sur la limite ; il n'est donc pas possible de statuer sur la conformité ou la non conformité. Cependant, Lorsqu'un niveau de confiance de moins de 95% est acceptable, et la limite de la spécification est défini comme \leq , une déclaration de conformité peut être possible. Lorsque la limite de spécification est définie comme $<$, une déclaration de non conformité peut être possible. | le résultat mesuré est au-dessus de la limite supérieure par une marge plus petite que la moitié de l'intervalle de l'incertitude; il n'est donc pas possible de déclarer la conformité. Cependant, Lorsqu'un niveau de confiance de moins de 95% est acceptable, une déclaration de conformité peut être possible. | le résultat mesuré est au delà de la limite supérieure, même lorsque prolongé en bas par la moitié de l'intervalle d'incertitude. Le produit donc n'est pas conforme aux spécifications. |
| Limite supérieure spécifiée | | | | | |
| Limite inférieure spécifiée | | | | | |
| | Cas 6 | Cas 7 | Cas 8 | Cas 9 | Cas 10 |
| | le résultat mesuré est au-dessus de la limite inférieure, même lorsque diminué de la moitié de l'intervalle d'incertitude. Le produit est donc conforme aux spécifications. | le résultat mesuré est au-dessus de la limite inférieure, mais avec une marge plus petite que la moitié de l'intervalle de l'incertitude ; il n'est donc pas possible de déclarer la conformité. Cependant, Lorsqu'un niveau de confiance de moins de 95% est acceptable, une déclaration de conformité peut être possible. | Le résultat mesuré est sur la limite; il n'est donc pas possible de statuer sur la conformité ou la non conformité. Cependant, Lorsqu'un niveau de confiance de moins de 95% est acceptable, et la limite de la spécification est définie comme \geq , une déclaration de conformité peut être possible. Lorsque la limite de spécification est définie comme $>$, une déclaration de non conformité peut être possible. | le résultat mesuré est au-dessous de la limite inférieure, mais par une marge plus petite que la moitié de l'intervalle de l'incertitude ; il n'est donc pas possible de déclarer la conformité. Cependant, lorsqu'un niveau de confiance de moins de 95% est acceptable, un déclaration de conformité peut être possible. | le résultat mesuré est au delà de la limite inférieure, même lorsque prolongé vers le haut par la moitié de l'intervalle d'incertitude. Le produit n'est donc pas conforme aux spécifications. |

◆ = le résultat de mesure avec la méthode convenue

I = intervalle de l'incertitude de la méthode convenue a indiqué

Figure 3.2 Méthode d'évaluation de la conformité

c Etalonnage

Un ensemble d'opérations établissant dans des conditions spécifiées la relation entre les valeurs de la grandeur indiquées par un appareil de mesure ou un système de mesure ou les valeurs représentées par une mesure matérialisée par un matériau de référence et les valeurs correspondantes de la grandeur réalisée par des étalons.

Un outil de base qui assure la traçabilité d'une mesure, est l'étalonnage d'un appareil de mesure ou d'un matériau de référence. L'étalonnage détermine les performances caractéristiques d'un instrument ou d'un matériau de référence. Ceci est atteint au moyen d'une comparaison directe à un étalon de mesure ou à un matériau de référence certifié. Un certificat d'étalonnage est édité et dans la plupart des cas une étiquette est apposée sur l'instrument.

Le résultat d'un étalonnage peut être enregistré dans un document appelé certificat d'étalonnage ou rapport d'étalonnage [26].

d Calibration

En métrologie, l'ajustage d'un instrument de mesure, parfois aussi appelé réglage ou improprement auto-étalonnage ou calibrage, est une opération réalisée pour permettre à un appareil de mesure d'afficher des valeurs correspondant à des valeurs données de la grandeur physique à mesurer. Contrairement à un étalonnage, l'ajustage se fait sur une valeur fixée par le besoin, et non pas par un étalon.

Parmi les différents types d'ajustage se trouvent le réglage de zéro, le réglage de décalage ou le réglage d'étendue [27].

e Traçabilité

Une chaîne de traçabilité est "une chaîne ininterrompue de comparaisons, ayant toutes des incertitudes déterminées". Ceci assure qu'un résultat de mesure, ou la valeur d'un étalon, est raccordée à une référence aux plus hauts niveaux, le plus haut niveau étant l'étalon primaire.

Un utilisateur final doit obtenir la traçabilité aux étalons internationaux de plus haut niveau soit directement via un institut national de métrologie, soit par un laboratoire secondaire ou service d'étalonnage. La traçabilité peut être obtenue de laboratoires hors du pays des utilisateurs, résultat des nombreux arrangements de reconnaissance mutuelle [26].

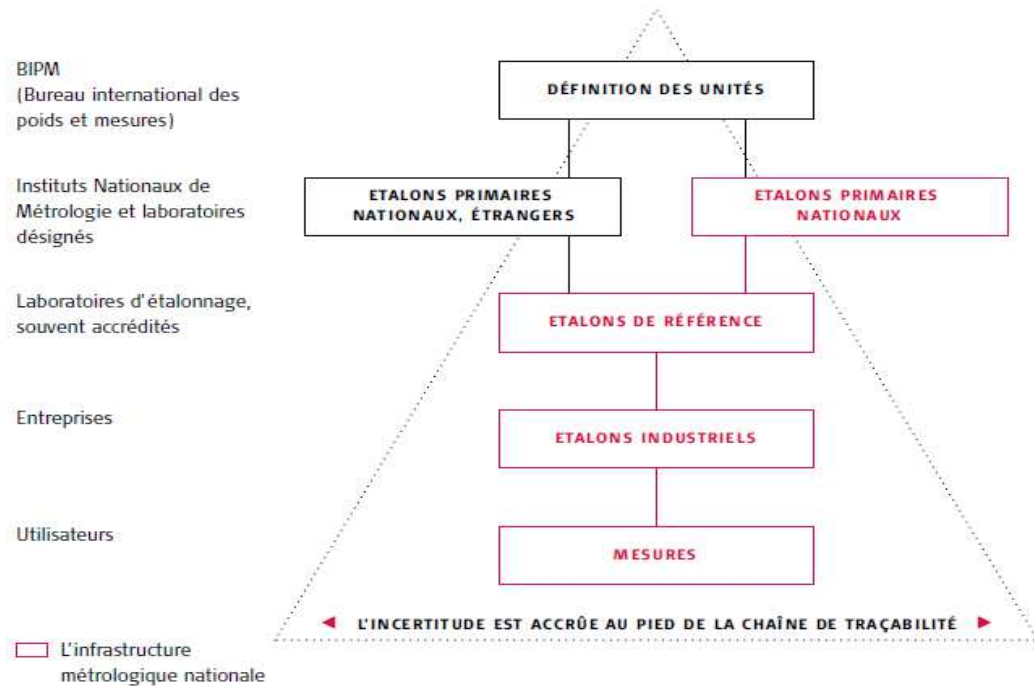


Figure .3.3 chaîne de traçabilité [26].

3.3 Analyse métrologique du gaz

3.3.1 Analyse chromatographique

a La chromatographie en phase gazeuse

C'est une technique qui permet de séparer des molécules d'un mélange éventuellement très complexe de nature très diverses. Elle s'applique principalement aux composés gazeux susceptibles d'être vaporisés par chauffage sans décomposition [28].

b Description du système (chromatographe Rosemount model 700)

Le modèle Rosemount 700 est un chromatographe (GC) de gaz à grande vitesse qui est conçu pour répondre aux exigences spécifiques d'application sur le terrain basée sur la composition du flux de gaz naturel typique et la concentration anticipée des composants sélectionnés. Dans sa norme de configuration, le modèle 700 peut gérer jusqu'à quatre flux généralement, trois pour l'échantillon et un pour l'étalonnage.

Le système Model Rosemount 700 se compose de trois pièces : l'analyseur, le contrôleur Assemblage et système de conditionnement d'échantillons.

Les sous-systèmes du modèle Rosemount700 sont : détecteurs de conductivité thermique (TCD), Détecteur d'ionisation de la flamme (Micro-FID), un injecteur d'échantillon liquide (LSIV) et un méthaniseur. [29]

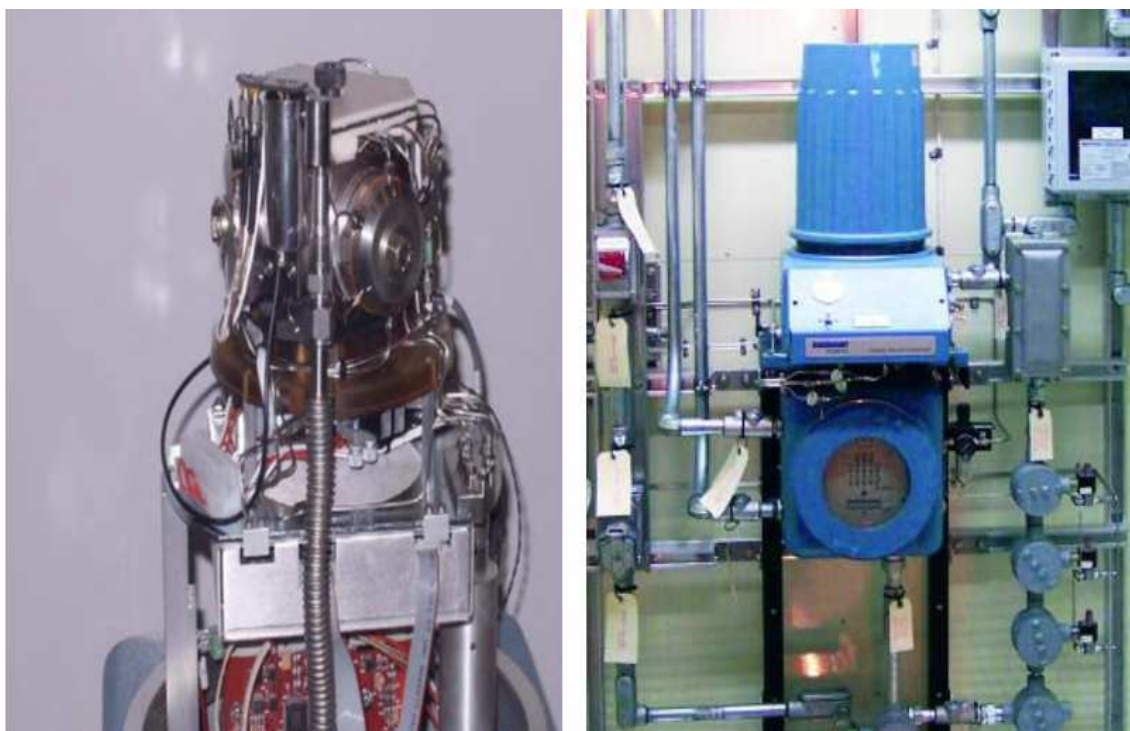


Figure 3.4 Modèle Rosemount 700 Chromatographe en phase gazeuse. [29]

c Description fonctionnelle

Un échantillon de gaz à analyser est prélevé en continu dans le procédé à l'aide d'une sonde d'échantillonnage installée dans la ligne du procédé. L'échantillon est acheminé par une ligne d'échantillonnage vers un système de conditionnement, dans

lequel il est filtré. Après conditionnement, l'échantillon est acheminé jusqu'à l'analyseur qui assure la séparation et la détection des composants du gaz.

La séparation chromatographique des composants de l'échantillon de gaz est réalisée comme suit. Un volume précis d'échantillon de gaz est injecté à l'entrée d'une colonne de séparation. La colonne inclut une phase stationnaire (remplissage).

L'échantillon de gaz est entraîné dans la colonne par une phase mobile (gaz porteur ou vecteur). Les molécules sont plus ou moins retardées selon leur affinité pour la phase fixe, et chaque composant traverse donc la colonne à des rythmes différents. Les gaz et les vapeurs composant l'échantillon sont ainsi séparés.

Un détecteur situé au niveau de la sortie de la colonne analytique détecte l'élution des composants de la colonne et génère des sorties électriques proportionnelles à la concentration de chaque composant [29].

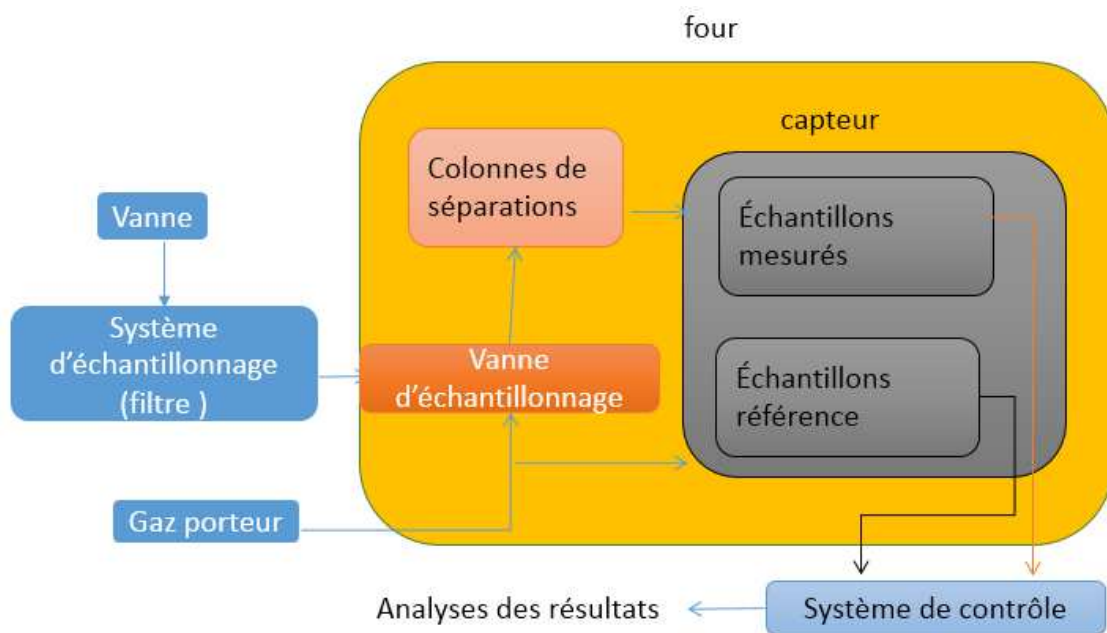


Figure 3.5 Schéma de principe de la chromatographie en phase gazeuse.

3.3.2 Les logiciels mis en œuvre

Un logiciel de chromatographe est un logiciel capable d'interpréter les informations générées par des détecteurs spécifiques de chromatographie. L'interprétation concerne l'identification de composés chimiques, leur quantification et leur calibrage [30].

a Description du logiciel

Le GC utilise trois types distincts de logiciel. Cela permet une flexibilité totale pour définir la séquence de calcul, imprimer, signaler le contenu, le format, le type et la quantité de données pour visualisation, contrôle et / ou transmission à un autre ordinateur ou un contrôleur. Les trois types sont :

- ✓ Système d'exploitation de base (BOS)
- ✓ Logiciel de configuration d'application
- ✓ Logiciel de maintenance et d'exploitation (MON2000 version 2.2 ou ultérieure) [29].

b Fonctions disponibles sur le système GC et son logiciel MON2000

Fonctions Gaz Chromatographe (GC) pouvant être initiées ou contrôlées par le système GC et son logiciel MON2000, comprenant :

(Activations de valve, Séquences de flux, Etalonnages, Analyses, Assignations de flux / détecteurs, Assignations de table de flux / composants, Les flux / calculs, Diagnostic

Le traitement des alarmes et des événements, Les réglages de la table de composants, Ajustements de calcul, Réglages de l'échelle analogique) [29].

c Rapports et journaux produits par le système GC

Rapports et journaux pouvant être produits en fonction de l'application GC utilisée, incluant :

- Rapport de configuration.
- Liste des paramètres.
- Chromatogramme d'analyse.
- Comparaison du chromatogramme.
- Journal des alarmes (non reconnu et actif alarmes).
- Journal des événements.
- Différents rapports d'analyse [29].

3.3.3 Calibration du GC Rosemount model 700

Le gaz d'étalonnage contient des concentrations **connues** et peut être **traçable**. Lorsqu'un gaz d'étalonnage est utilisé à partir d'une combinaison de concentrations différentes, les concentrations des composants dans l'unité de contrôle doivent être saisies avant le premier étalonnage utilisant ce gaz.

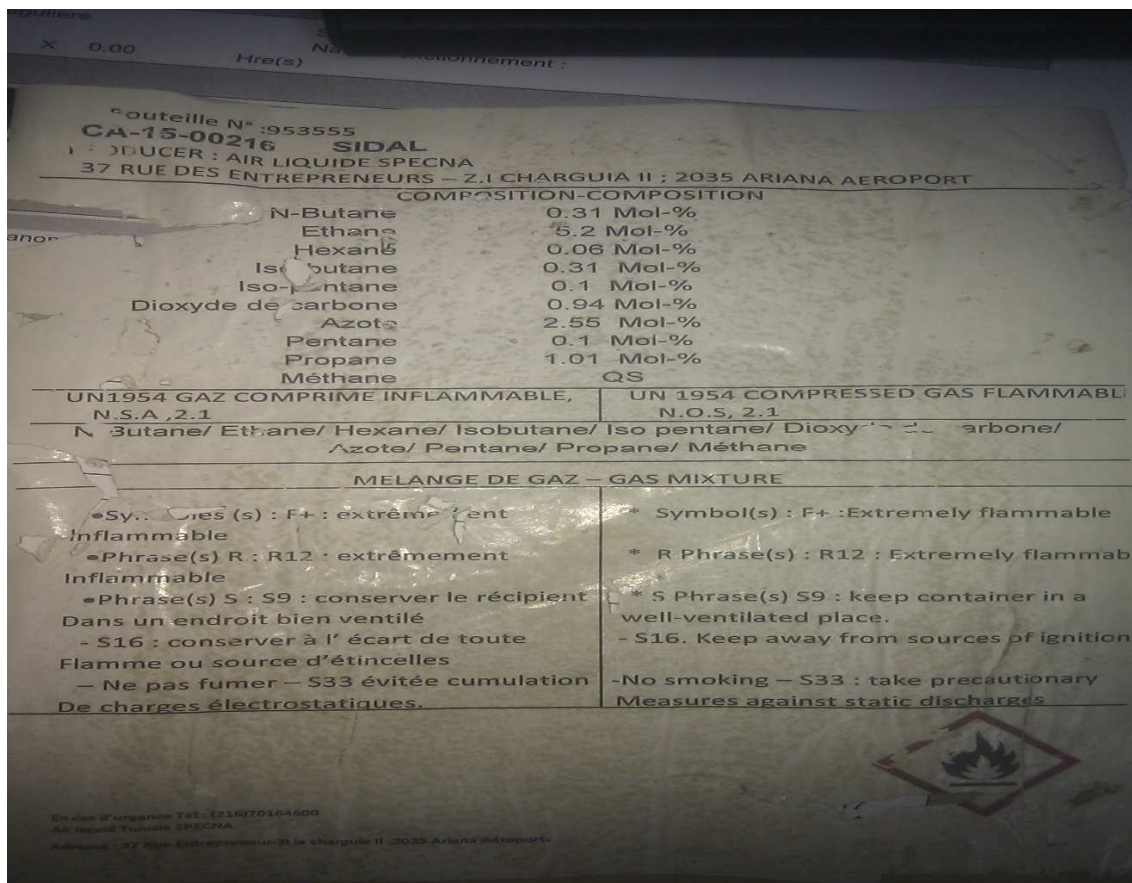


Figure 3.6 Plaque signalétique de bouteille de gaz de Calibration de centrale SKH.

➤ Différents rapports sur le mono 2000

MON2020 peut générer les types de rapports suivants :

a Rapport d'analyse des composants

Le logiciel affiche une liste des composants détectés, en fonction des données brutes et affiche une liste de comptes pour chaque composant, en fonction du tableau de l'application → Comptes → Contrôle.

Analysis

Date-Time: 01/31/18 12:00 Analysis Time: 240 Cycle Time: 250
Stream: 2 Calibration Mode: FCAL Cycle Start Time: 11:56
Analyzer: 198272-1 Strm Seq:1
G E
S/N 9005376 S/O 198272-1

| Component Name | Mole Percent | BTU Gross | BTU Net | Relative Density | HV Sup MJ/kg | HV Inf MJ/kg |
|----------------|--------------|-----------|---------|------------------|--------------|--------------|
| C6+ 47/35/17 | 0.0575 | 3.04 | 2.82 | 0.0019 | 0.1482 | 0.1373 |
| PROPANE | 1.0962 | 27.65 | 25.44 | 0.0167 | 1.3480 | 1.2402 |
| i-BUTANE | 0.3036 | 9.90 | 9.13 | 0.0061 | 0.4825 | 0.4452 |
| n-BUTANE | 0.2962 | 9.69 | 8.94 | 0.0059 | 0.4723 | 0.4359 |
| NEOPENTANE | 0.0000 | 0.00 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| i-PENTANE | 0.0527 | 2.11 | 1.95 | 0.0013 | 0.1031 | 0.0953 |
| n-PENTANE | 0.0864 | 3.47 | 3.21 | 0.0022 | 0.1692 | 0.1565 |
| NITROGEN | 2.5731 | 0.00 | 0.00 | 0.0249 | 0.0000 | 0.0000 |
| METHANE | 89.2397 | 903.41 | 813.07 | 0.4944 | 44.0491 | 39.6589 |
| CARBON DIOXIDE | 1.0413 | 0.00 | 0.00 | 0.0158 | 0.0000 | 0.0000 |
| ETHANE | 5.2534 | 93.18 | 85.25 | 0.0545 | 4.5435 | 4.1557 |
| TOTALS | 100.0000 | 1052.44 | 949.80 | 0.6237 | 51.32 | 46.32 |

'*' indicates user-defined components

Compressibility Factor (1/Z) @ 14.73000 PSIA _60.0 DEG.F= 1.00237

Base Pressures 14.73000

| | | | |
|---------------------------|---|---------|---|
| Gross Dry BTU | = | 1054.94 | Corrected/Z |
| Net Dry BTU | = | 952.05 | Corrected/Z |
| HeatVal Sup. Dry (MJ/kg) | = | 51.32 | |
| HeatVal Inf. Dry (MJ/kg) | = | 46.32 | Corrected/Z |
| Real Relative Density Gas | = | 0.6249 | |
| Unnormalized Mole Percent | = | 97.614 | |
| WOBBE | = | 1334.46 | |
| Gas Density | = | 47.807 | lb/1000 cu.ft. at 14.73 PSIA and 60 Deg.F |

ACTIVE ALARMS
None

Figure 3.7 Rapport d'analyse (ISO) cas de la centrale de Hadjret En Nous.

b Rapport de calibration

Le mono 2000 affiche la liste des composants détectés, ainsi que chaque concentration d'étalonnage du composant, valeur de données brutes, nouvelle réponse facteur, et nouveau temps de rétention.

c Rapport de calibration Final

Le rapport Final Calibration affiche la liste des composants avec les anciens et les nouveaux facteurs de réponse de chaque composant et les anciens et nouveaux temps de rétention, basés sur les données moyennées.

Final Calibration

Date-Time: 01/31/18 12:00 Analysis Time: 240 Cycle Time: 250
 Stream: 2 Calibration MODE: FCAL Cycle Start Time: 11:56
 Analyzer: 198272-1 Strm Seq:1
 G E
 S/N 9005376 S/O 198272-1

| Component Name | Cal Conc. | Old RF | New RF | * RF % DEV. | Old RT | New RT | * RT % DEV. |
|----------------|-----------|------------|-------------|-------------|--------|--------|-------------|
| C6+ 47/35/17 | 0.05930 | 2.46923e+7 | 2.33626e+7 | * -5.39 | 34.9 | 35.0 | * 0.29 |
| PROPANE | 1.09000 | 1.49124e+7 | 1.46415e+7 | * -1.82 | 57.1 | 57.0 | * -0.18 |
| i-BUTANE | 0.30300 | 1.88949e+7 | 1.84859e+7 | * -2.16 | 74.2 | 73.8 | * -0.54 |
| n-BUTANE | 0.29500 | 1.88612e+7 | 1.84875e+7 | * -1.98 | 85.5 | 84.9 | * -0.70 |
| NEOPENTANE | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 100.00 | 92.3 | 0.0 | 100.00 |
| i-PENTANE | 0.09550 | 2.02236e+7 | 1.10351e+7 | * -45.43 | 125.0 | 125.4 | * 0.32 |
| n-PENTANE | 0.09730 | 4.68164e+6 | 4.08555e+6 | * -12.73 | 141.5 | 142.2 | * 0.49 |
| NITROGEN | 2.58000 | 8.24794e+6 | 8.02683e+6 | * -2.68 | 158.3 | 158.4 | * 0.06 |
| METHANE | 89.18990 | 6.77752e+6 | 6.61986e+6 | * -2.33 | 162.9 | 162.9 | * 0.00 |
| CARBON DIOXIDE | 1.04000 | 1.03254e+7 | 1.00932e+7 | * -2.25 | 197.8 | 197.1 | * -0.35 |
| ETHANE | 5.25000 | 1.09831e+7 | 1.0729e+007 | * -2.31 | 221.3 | 220.1 | * -0.54 |

ACTIVE ALARMS
None

Figure 3.8 Rapport final de calibration cas de la centrale de Hadjret En Nous.

3.3.4 Les résultats d'analyse de gaz réalisé par la centrale

La centrale effectue des analyses 24/ 24 h sans interruption et ses analyses seront enregistrées dans des archives très ordonnées.

Le système de contrôle a une interface spéciale des résultats de chromatographie à chaque instant.

- Le tableau suivant montre les résultats d'analyse pour le mois d'avril avec une période de 1 semaine, Les tests sont effectués quotidiennement à minuit.

| pourcentage % mol | date de prélèvement | | | | | moyen |
|-------------------------------|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 01/04/2018 | 07/04/2018 | 14/04/2018 | 21/04/2018 | 28/04/2018 | |
| méthane | 90,5654831 | 90,8199005 | 89,8027191 | 89,6285172 | 87,4234085 | 89,6480057 |
| éthane | 6,17191601 | 6,20337963 | 6,4078126 | 6,44082212 | 7,70683432 | 6,58615294 |
| propane | 1,00693381 | 0,83920968 | 1,17844141 | 1,21220815 | 1,41569972 | 1,13049855 |
| ibutane | 0,10557701 | 0,07241119 | 0,14594354 | 0,15574822 | 0,18579723 | 0,13309544 |
| nbutane | 0,12072987 | 0,08397982 | 0,17732418 | 0,18855874 | 0,20919667 | 0,15595786 |
| ipentane | 0,06167565 | 0,04153363 | 0,08675138 | 0,08830319 | 0,1125162 | 0,07815601 |
| npentane | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| neo pentane | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| c6+ | 0,03208106 | 0,02101318 | 0,03829154 | 0,03832953 | 0,05076219 | 0,0360955 |
| azote | 0,7218895 | 0,89025515 | 0,80698746 | 0,84362686 | 0,99058604 | 0,850669 |
| co2 | 1,18653369 | 1,04688478 | 1,35711622 | 1,40786064 | 1,88428414 | 1,37653589 |
| indice wobbe | 1227,03748 | 1224,41553 | 1226,25903 | 1225,0885 | 1221,92493 | 1224,94509 |
| densité relative | 0,61495024 | 0,61060941 | 0,62149405 | 0,62325245 | 0,63687068 | 0,62143537 |
| pouvoir calorifique inférieur | 47,5809364 | 47,6441383 | 47,2975426 | 47,2023849 | 46,5023155 | 47,2454636 |
| puissance MW | 429,724548 | 426,12674 | 426,177246 | 429,921844 | 428,260559 | 428,042188 |

Tableau 3.4 Les résultats d'analyse pour le mois d'avril.

3.3.5 capabilité et conformité du GC Rosemount model 700

➤ **Tolérance des caractéristiques chimiques selon le manuel de model GC 700**

Les plages de concentration des composants du gaz naturel auxquels le dispositif d'étalonnage est adapté, comme décrit ci-dessous pour le gaz d'étalonnage

| pourcentage % mol | standard | tolérance +/- | min de plage | max de plage |
|----------------------|----------|---------------|--------------|--------------|
| méthane | 80,47 | 0,6 | 78 | 100 |
| éthane | 7 | 0,3 | 0 | 18 |
| propane | 3,3 | 0,15 | 0 | 0,35 |
| ibutane | 0,5 | 0,03 | 0 | 1 |
| nbutane | 0,5 | 0,03 | 0 | 1 |
| ipentane | 0,11 | 0,015 | 0 | 0,35 |
| npentane | 0,11 | 0,015 | 0 | 0,35 |
| neo pentane | 0,11 | 0,015 | 0 | 0,35 |
| c6+ | 0,11 | 0,015 | 0 | 0,35 |
| azote | 4,5 | 0,25 | 0 | 10 |
| co2 | 3,3 | 0,15 | 0 | 7 |

Tableau 3.5 Tolérance des caractéristiques chimiques de chromatographe.

Not : La température minimale de fonctionnement pour ce mélange gazeux d'étalonnage est de 10 ° C, La pression de remplissage maximale pour ce gaz d'étalonnage est de 40 barg (bar relatif) [31].

- Pour le gaz combustible la centrale mise sur le méthane qui est responsable du pouvoir calorifique.

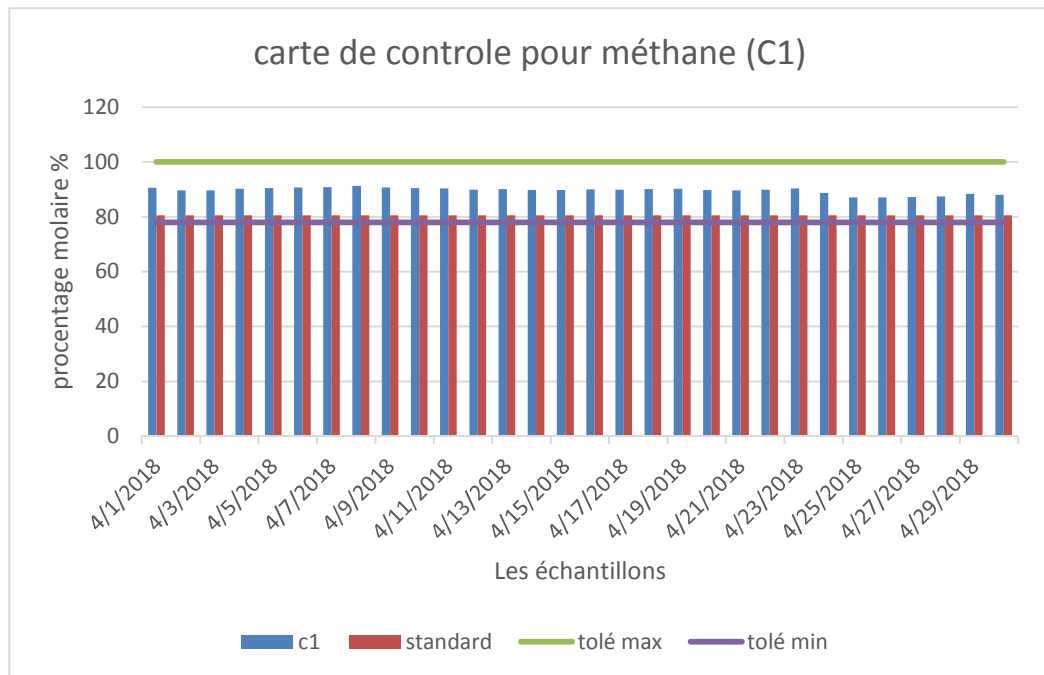


Figure 3.9 Les résultats d'analyse pour le méthane par rapport au cahier de charge de GC model 700 (le mois d'avril 2018).

- Nous remarquons que les concentrations molaires du méthane sont dans l'intervalle de tolérance et qu'il n'y a pas de concentration en dehors de cet intervalle d'où la capacité des moyens.
- Selon les caractéristiques d'analyse de la centrale on peut déclarer la conformité du gaz combustible.

3.3.6 Traçabilité des mesurages par comparaison (laboratoire accrédité)

a La traçabilité dans la centrale thermique 1227 MW

La centrale analyse le gaz naturel fourni par Sonelgaz à chaque instant et sans interruption à l'aide du chromatographe de l'entreprise connecté à la salle de contrôle. Les résultats d'analyse peuvent être consultés à tout moment au niveau de la fenêtre du chromatographe sur l'interface du système de contrôle distribué (DCS). Après la fin de chaque journée les résultats de l'analyse sont enregistrés dans l'archive et renvoyés pour référence si nécessaire. Chaque 15 jours, l'entreprise envoie des échantillons au laboratoire de la direction centrale de recherche et de développement technologique / division technologie et développement (DC RDT/DTD) de SONATRACH, afin de comparer les résultats chromatographique de l'entreprise avec les résultats du laboratoire accrédité.

b Résultat d'analyse réalisé par laboratoire accrédité de SONATRACH

سوناتراک
sonatrach
DC RDT/DTD

RAPPORT D'ESSAIS

N° : 09E/ET/18

Version : 07
Page 8 sur 8

Tableau : Compositions Molaires et Propriétés de Quatre (04) Echantillons de Gaz Naturel Prélevés au Niveau de la Centrale Thermique de HADJRET EN NOUSS

| Identification | TR#2 | | | |
|----------------------------|------------|----------|----------|------------|
| Date prélevement | 03/01/2018 | | | 31/12/2017 |
| Date Réception | 04/01/2018 | | | 31/12/2017 |
| Heure prélevement | 13h05 | 14h03 | 15h05 | 11h55 |
| Température du gaz, C° | 19.83 | 19.9 | 19.95 | 19.5 |
| Pression prélevement, bars | 53.7 | 53.8 | 54.0 | 55.2 |
| Date Analyse | 11/01/2018 | | | 02/01/2018 |
| Constituants | % Molaire | | | |
| N2 | 1.256 | 1.187 | 1.129 | 1.080 |
| CO2 | 1.131 | 1.111 | 1.114 | 1.190 |
| C1 | 89.146 | 89.301 | 89.038 | 88.980 |
| C2 | 6.947 | 6.933 | 7.142 | 7.310 |
| C3 | 1.098 | 1.078 | 1.117 | 1.110 |
| iC4 | 0.111 | 0.106 | 0.117 | 0.090 |
| nC4 | 0.162 | 0.159 | 0.168 | 0.150 |
| neoC5 | 0.014 | 0.010 | 0.021 | 0.000 |
| iC5 | 0.033 | 0.029 | 0.038 | 0.030 |
| nC5 | 0.062 | 0.053 | 0.074 | 0.040 |
| iC6 | 0.015 | 0.013 | 0.016 | 0.010 |
| C6 | 0.009 | 0.008 | 0.010 | 0.010 |
| iC7 | 0.012 | 0.009 | 0.012 | 0.010 |
| C7 | 0.004 | 0.003 | 0.004 | 0.000 |
| TOTAL | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.00 |
| PROPRIETES DU GAZ REEL | | | | |
| M, (g/mole) | 18.00 | 17.96 | 18.03 | 18.00 |
| Zmél (t2, p2) | 0.9975 | 0.9975 | 0.9975 | 0.9975 |
| d (t2, p2) | 0.6227 | 0.6213 | 0.6239 | 0.6226 |
| p (t2, p2), (kg/m3) | 0.7631 | 0.7614 | 0.7645 | 0.7630 |
| P CAL SUP, (MJ/ m3) | 39.90 | 39.89 | 40.06 | 39.96 |
| (Kcal/m3) | 9530.82 | 9526.38 | 9569.32 | 9543.78 |
| P CAL INF, (MJ/ m3) | 36.03 | 36.01 | 36.17 | 36.08 |
| (Kcal/m3) | 8604.69 | 8600.28 | 8640.18 | 8616.45 |
| INDICE DE WOBBE (MJ/ m3) | 50.57 | 50.60 | 50.72 | 50.64 |
| (Kcal/m3) | 12077.76 | 12085.53 | 12115.42 | 12094.82 |

NE : Ces résultats ne se rapportent qu'aux objets soumis aux essais.

DIRECTION CENTRALE RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT - DIVISION TECHNOLOGIES ET DEVELOPPEMENT
Avenue du 1er Novembre - 35000 Boumerdes (Algérie)
Tél. : (213) 024 79 11 28 à 30 - Fax : (213) 024 79 10 89
sec.dtd@ep.sonatrach.dz

Figure 3.10 Les résultats d'analyse de 4 échantillons de gaz naturel prélevés au niveau de la centrale thermique de HAJRET EN NOUSS.

c Comparaison entre les résultats du laboratoire DC RDT/DTD et de la centrale thermique de HAJRET EN NOUSS

➤ L'histogramme ci-dessous présente une comparaison entre les résultats du laboratoire accrédité DC RDT/DTD et de SNC.

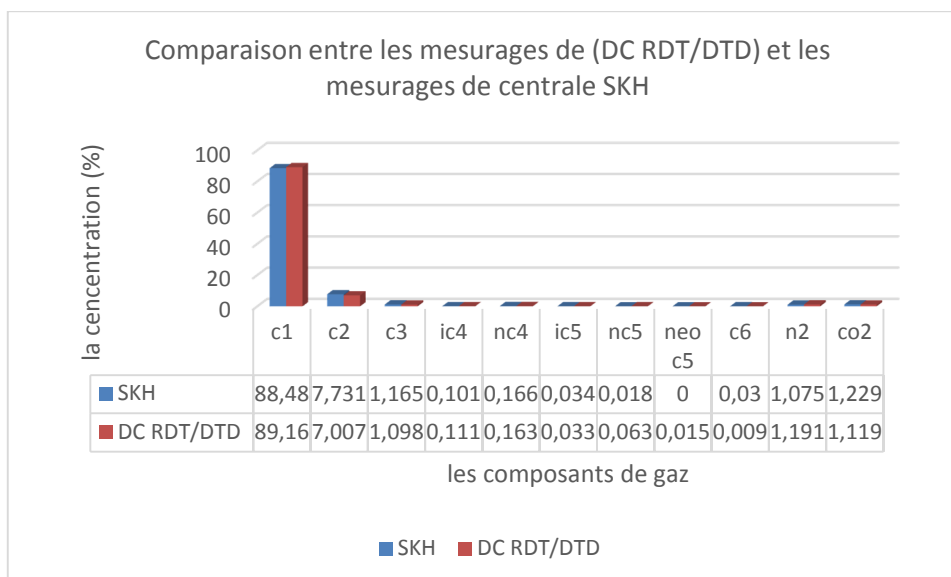


Figure 3.11 Comparaison entre les mesurages de (DC RDT/DTD) et les mesurages de SKH

3.3.7 Mesures de la puissance

✓ **Valeurs Garanties du Contrat O&M (opération & maintenance)**

Tableau 3.6 Valeurs garanties du Contrat O&M telles que mesurées et ramenées simplement aux conditions de références.

| désignation | Unité | Tranche 1 | Tranche 2 | Tranche 3 | Centrale |
|--|--------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Puissance valeurs certificat de réception provisoire | kW | 406863 | 413681 | 416158 | 1236702 |
| Facteur de correction de la dégradation EPC (courbe de GE) | % | 99,12% | 99,44% | 99,30% | |
| Puissance garantie O&M | kW | 403283 | 411364 | 413245 | 1227892 |
| Consommation spécifique valeur certificat de réception | KJ/kWh | 6368,9 | 6330,8 | 6392 | 6364 |

| | | | | | |
|--|--------|---------|---------|---------|------|
| provisoire | | | | | |
| Facteur de correction de la dégradation EPC (courbe de GE) | % | 100,28% | 100,16% | 100,18% | |
| Consommation spécifique garantie O&M | KJ/kWh | 6386,7 | 6340,9 | 6403,5 | 6377 |

Tableau 3.6 Valeurs garanties du Contrat O&M telles que mesurées et ramenées simplement aux conditions de références.

✓ **Conditions de base**

| Paramètre | Base | Unités | Référence |
|---|-------|----------|---|
| Température atmosphérique | 30 | °C | Contrat EPC, annexe 5, section 3.2 |
| Pression barométrique | 1,013 | Bar(a) | Contrat EPC, annexe 5, section 3.2 |
| Humidité relative | 76 % | % | Contrat EPC, annexe 5, section 3.2 |
| Fréquence | 50 | Hz | Contrat EPC, annexe 5, section 3.2 |
| Facteur de puissance de la turbine | 0,85 | Leggin g | Contrat EPC, annexe 5, section 3.2 |
| Température de l'eau de mer (entrée) | 24 | °C | Contrat EPC, annexe 5, section 3.2 |
| Combustible selon la spécification du Projet | | | Contrat EPC, PIECE III, ou Contrat ECA |
| Heure de flamme lors des essais de la Réception, sur la Tranche No 1 | 4093 | Heures | Rapport d'essai de performance de LERSOY pour la Centrale |
| Heure de flamme lors des essais de la Réception, sur la Tranche No 2 | 2227 | Heures | Rapport d'essai de performance de LERSOY pour la Centrale |
| Heure de flamme lors des essais de la Réception, sur la Tranche No 3 | 2398 | Heures | Rapport d'essai de performance de LERSOY pour la Centrale |
| Les refroidisseurs d'air d'entrée et la postcombustion opérationnelle telle que prévu par l'opérateur en fonction des conditions ambiantes, en conformité avec les dispositions du contrat O&M. | | | |

Tableau 3.7 Conditions de base pour les puissances garantie O&M

3.3.8 Mesure des déchets

La centrale mesure les déchets de combustion à l'aide des systèmes de surveillance continue des émissions (CEMS Continuous Emission Monitoring Systems) utilisés comme outil de surveillance des gaz de combustion pour l' oxygène , le monoxyde de carbone et le dioxyde de carbone afin de fournir des informations pour le contrôle de la combustion dans les environnements industriels.

Le système CEM standard comprend une sonde à échantillon, un filtre, une ligne d'échantillonnage, un système de conditionnement de gaz, un système de gaz d'étalonnage et une série d'analyseurs de gaz qui reflètent les paramètres surveillés.

Les émissions typiques surveillées comprennent : le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone et l'oxygène. Les systèmes CEM peuvent également mesurer le débit d'air, l'opacité des gaz de combustion et l'humidité.

✓ **Fonctionnement**

Un petit échantillon de gaz de combustion est transporté par une conduite d'échantillon chauffé à haute température dans une unité de conditionnement d'échantillons. L'échantillon est filtré pour éliminer les particules et séché, généralement avec un refroidisseur, pour éliminer l'humidité. Une fois conditionné, l'échantillon entre dans un collecteur d'échantillonnage et est mesuré en utilisant : l'infrarouge et adsorption ultraviolette, chimiluminescence, fluorescence et absorption du rayon bêta.

Après analyse, le gaz sort de l'analyseur vers un collecteur commun à tous les analyseurs où il est évacué à l'extérieur. Un système d'acquisition et de traitement des données reçoit le signal de chaque analyseur afin de collecter et d'enregistrer les données sur les émissions.

Un contrôle interne de l'assurance qualité est réalisé par l'introduction quotidienne d'une concentration certifiée de gaz dans la sonde de prélèvement.

3.3.9 Les instruments utilisés pour l'analyse CEMS

a L'analyse d'O₂

Le matériel utilisé : (SERVOPRO 4900 SERVOMEX Emissions Analysers)



Figure 3.12 Analyseur d'O₂ (SERVOPRO 4900 SERVOMEX Emissions Analysers)

Performance

- ✓ La technologie : Paramagnétique
- ✓ Gamme : 0-25% O₂
- ✓ Erreur intrinsèque (précision) : <0,05% O₂
- ✓ Erreur de linéarité : <0,05% O₂
- ✓ Répétabilité : 0,05% de la lecture [32].

b L'analyse de CO

Le matériel utilisé : (Thermo 48 i CO Analyzer)



Figure 3.13 Analyseur de CO (Thermo 48 i CO Analyzer)

Caractéristiques :

- ✓ Puissance : 100W, 120VAC
- ✓ Sorties : 0-10V, RS232 / RS485, TCP / IP, 10 relais d'état,
- ✓ Indication de panne de courant, sortie de courant isolée 4-20 mA
- ✓ Gamme suggérée Clean Air : 0-100ppm à 1000ppm
- ✓ Gammes de fabrication : 0-1 ppm à 10 000 ppm
- ✓ Temps de réponse : 1min
- ✓ Températures de fonctionnement : 20-30oC
- ✓ Débit : 0.5 - 2lpm
- ✓ Limite de détection : 0.04ppm
- ✓ Linéarité : + 1% FS
- ✓ Temps de chauffe : 2h [33].

c L'analyse de NOx

Le matériel utilisé : (analyser EcoPhysics CLD 800)



Figure 3.14 Analyseur de NOx (analyser Eco Physics CLD 800)

Caractéristiques :

- ✓ Gamme de mesure en ppm : min 0.005 à max 5 ppm
- ✓ Température de fonctionnement : min 5 à max 40 C°

d L'assurance qualité

Chaque analyseur reçoit un test approfondi avant de quitter l'usine. Les procédures de test et les équipements de test sont conformes aux normes ISO 9001 et sont définis conformément aux réglementations internationales. Ces tests de performance peuvent être rappelés pour chaque analyseur quittant l'usine.

Avant l'acquisition d'un équipement, la centrale entreprend une étude métrologique générale mettant l'accent sur la conformité, la capacité, la traçabilité et la formation de main d'œuvre. Ceci pour assurer le bon rendement de l'équipement et pour obtenir des résultats qui respectent les normes internationales [34]

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié les concepts de base de la mesure et son importance dans le développement et l'amélioration de l'efficacité de la production et de la conformité aux normes internationales.

Nous avons mené une étude métrologique sur les instruments de mesure relative aux caractéristiques de gaz naturel, nous nous sommes donc concentrés sur l'analyse chromatographique en tant que dispositif d'analyse des composants du gaz naturel et nous avons également présenté les instruments d'analyse des émissions de gaz issus de la combustion du gaz naturel.

La centrale utilise un système sophistiqué de mesure des caractéristiques et d'analyse représenté par le Chromatographe model 700, les dispositifs de surveillance, la calibration et la traçabilité. On peut dire que ce système présente d'excellentes infrastructures métrologiques capables de fournir des résultats exactes permettant d'entreprendre une étude valable sur leur impact sur la puissance électrique et le rendement dans le quatrième chapitre.

Chapitre 4 Impact de la composition du gaz combustible sur le rendement et l'environnement

4.1 Introduction

L'utilisation massive du gaz naturel comme combustible principal dans les centrales à cycle combiné joue un rôle non insignifiant comptabilisable dans l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre [35]. Ce Gaz contribue par sa composition riche en méthane à obtenir de l'électricité en récupérant la chaleur des gaz d'échappement de la turbine à gaz (turbine à combustion) au travers des chaudières de récupération afin de produire de la vapeur haute pression, laquelle entraîne une turbine à vapeur. Il résulte de l'échappement de cette chaleur productrice de puissance un impact sur le rendement électrique qu'il faut maintenir à 1227 MW et un impact sur le dégagement des gaz à effet de serre qu'il faut maintenir dans les normes prescrites par les pouvoirs publics algériens.

4.2 Impact sur le rendement électrique

Les centrales à cycle combiné sont reconnues pour produire le rendement net le plus élevé, soit environ 57 %, rapporté au pouvoir calorifique inférieur du combustible (PCI). Le rendement dépend de la puissance produite, de la quantité massique du gaz et du pouvoir calorifique inférieur, comme illustré par le tableau suivant.

| | Puissance (MW) | Débit massique Qm (Kg/s) | PCI (MJ/Kg) | Rendement (%) |
|------------|----------------|-----------------------------|-------------|---------------|
| 2018-01-01 | 433.125 | 15.8333333 | 47.2284813 | 57.9211154 |
| 2018-01-02 | 432.125 | 15.8217593 | 47.1437988 | 57.9335372 |
| 2018-01-03 | 430.135417 | 15.7986111 | 47.0898514 | 57.8174555 |
| 2018-01-04 | 423.8125 | 15.6944444 | 47.1215286 | 57.3071016 |
| 2018-01-05 | 422.21875 | 15.5902778 | 47.1061897 | 57.4917708 |
| 2018-01-06 | 418.40625 | 15.462963 | 47.0888252 | 57.4629069 |
| 2018-01-07 | 419.010417 | 15.4513889 | 47.1722832 | 57.4870998 |
| 2018-01-08 | 427.625 | 15.6944444 | 47.0981216 | 57.8513573 |
| 2018-01-09 | 430.489583 | 15.6712963 | 47.135601 | 58.2785417 |
| 2018-01-10 | 429.03125 | 15.6018519 | 47.0166321 | 58.4872579 |
| 2018-01-11 | 429.916667 | 15.5671296 | 47.1114006 | 58.6205278 |
| 2018-01-12 | 431.541667 | 15.7060185 | 47.0291748 | 58.4237287 |
| 2018-01-13 | 431.166667 | 15.787037 | 47.1037254 | 57.9814796 |
| 2018-01-14 | 425.760417 | 15.7060185 | 47.167778 | 57.4716623 |
| 2018-01-15 | 431.208333 | 15.7986111 | 47.154644 | 57.8820316 |
| 2018-01-16 | 429.427083 | 15.8217593 | 47.2144012 | 57.4857461 |
| 2018-01-17 | 428.291667 | 15.7523148 | 47.154068 | 57.6601909 |
| 2018-01-18 | 427.385417 | 15.7523148 | 47.1783829 | 57.5085299 |
| 2018-01-19 | 424.53125 | 15.6597222 | 47.2273483 | 57.402664 |
| 2018-01-20 | 430.46875 | 15.7291667 | 47.1143456 | 58.0875089 |
| 2018-01-21 | 423.9375 | 15.7407407 | 47.0838699 | 57.201118 |
| 2018-01-22 | 427.083333 | 15.7523148 | 47.0852547 | 57.5815455 |
| 2018-01-23 | 428.447917 | 15.8449074 | 47.1040878 | 57.4050014 |
| 2018-01-24 | 427.072917 | 15.7175926 | 47.128212 | 57.654743 |
| 2018-01-25 | 424.770833 | 15.625 | 47.1211624 | 57.6924081 |
| 2018-01-26 | 425.333333 | 15.6018519 | 47.1073227 | 57.8715145 |
| 2018-01-27 | 430.739583 | 15.9259259 | 47.1103935 | 57.4107685 |
| 2018-01-28 | 429.34375 | 15.787037 | 46.891449 | 57.9977125 |
| 2018-01-29 | 429.635417 | 15.8796296 | 47.0891571 | 57.45645 |
| 2018-01-30 | 431.9375 | 15.8310185 | 47.1210556 | 57.9024636 |
| 2018-01-31 | 432.572917 | 15.6041667 | 47.1306725 | 58.8186576 |

Tableau 4.1 Relevé du rendement par tranche.

Le rendement η : $\eta = \frac{\text{puissance produite}}{Q_m * PCI}$

Puissance produite : [MW].

Quantité massique Q_m du gaz naturel : [Kg/s].

Pouvoir calorifique inférieur PCI : [KJ/KG].

Les représentations graphiques sont illustrées dans les figures suivantes :

a Relation entre le pouvoir calorifique inférieur (PCI) et le rendement

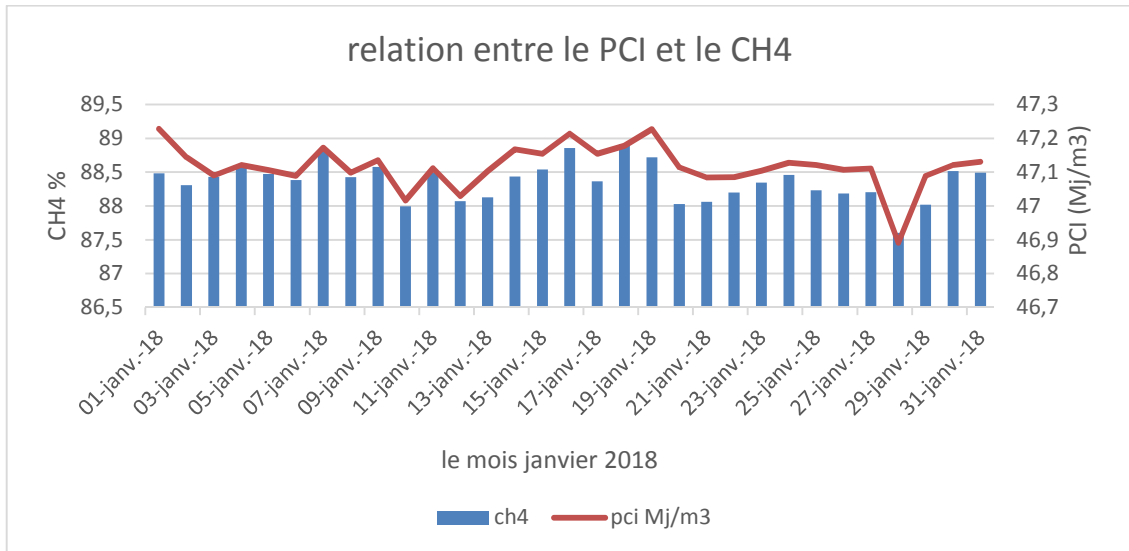


Figure 4.1. Impact du méthane sur le PCI

b Relation entre le rendement et la puissance électrique produite.

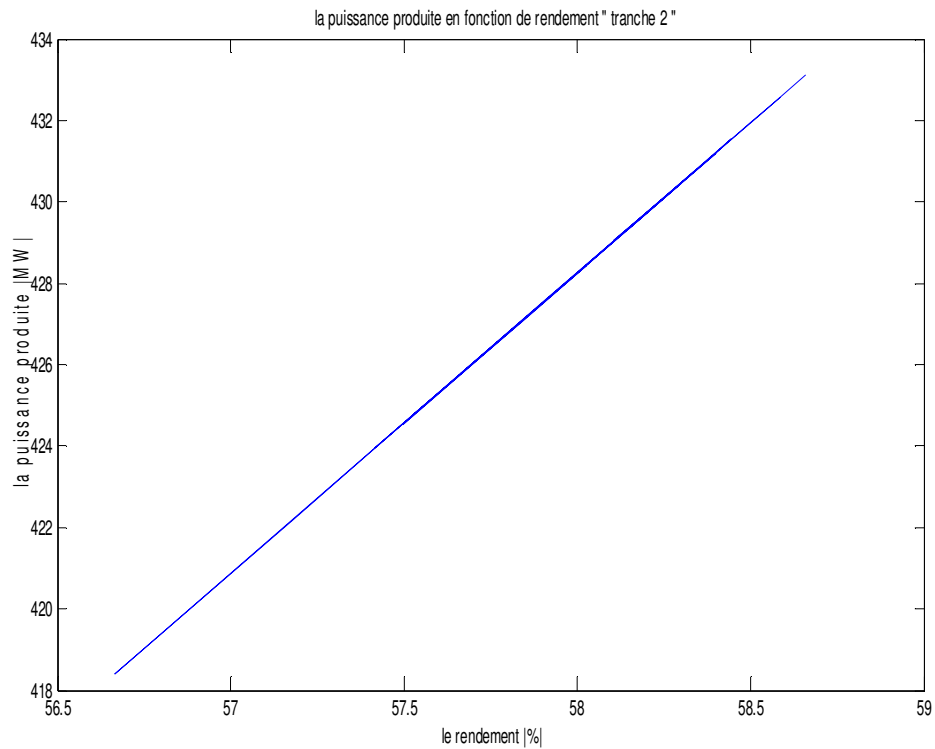


Figure 4.2 Impact du rendement sur la puissance.

c Relation entre le rendement et le pouvoir calorifique inférieur.

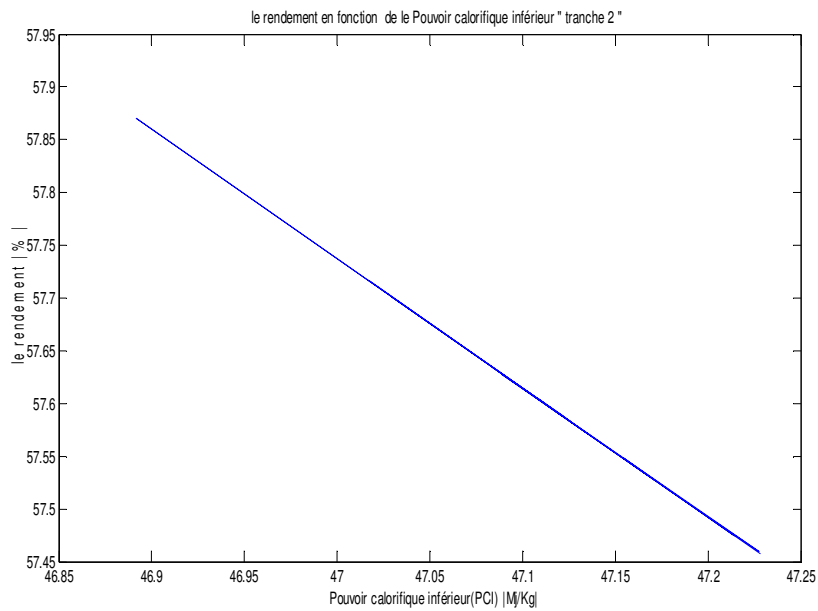


Figure 4.3. Impact du pouvoir calorifique inférieur sur le rendement.

4.3 Impact sur l'atmosphère

L'air atmosphérique est un mélange d'azote (78.08 %) et d'oxygène (20.95 %) avec des traces de gaz rares tels l'argon (0.93 %). Il contient en plus de la vapeur d'eau (0 à 4 %), du gaz carbonique (0.03 %) et des traces de 40 autres gaz dont, l'ozone, l'hélium, l'hydrogène, les oxydes d'azote et de soufre et du néon. On compte en outre, des suspensions diverses de particules solides ou liquides appelées aérosols dont des particules neutres telles les poussières provenant surtout des vents et des éruptions volcaniques ou encore de l'industrie, et des particules provenant de la matière condensée telles les substances hygroscopiques comme l'acide sulfurique, les oxydes d'azote. Ainsi, aucune composition absolue ne peut être définie, l'air atmosphérique étant toujours plus ou moins pollué. Parler donc de qualité de l'air revient à définir une composition ou degré de pollution compatible avec une activité spécifique donnée dans le développement humain durable. Concrètement, cela revient à fixer pour tout ou partie des constituants jugés les plus dangereux, des plages ou limites supérieures de concentrations à ne pas dépasser, de manière à contrôler leur impact sur la santé humaine en particulier et sur l'environnement en général [36].

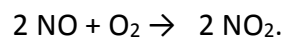
4.3.1 Les principes polluants atmosphériques

a les polluants primaires

Ce sont des polluants directement émis par les activités humaines (usines, voitures...) comme les oxydes de carbone (CO₂) et les oxydes d'azote (NO_x).

➤ **Le dioxyde d'azote NO_x**

Le dioxyde d'azote (NO₂) est fréquemment associé au monoxyde d'azote (NO). Ils ont longtemps été mesurés ensemble par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air car la mesure séparée était difficile. La somme de ces deux polluants est désignée par les oxydes d'azote (NO_x). Ils sont principalement émis sous la forme du monoxyde d'azote NO par les combustions fossiles à haute température (moteur thermique des transports, production d'énergie thermique et d'électricité, etc.). Dans l'atmosphère, au contact de l'oxygène, le NO s'oxyde en NO₂ [37].

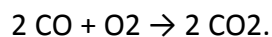


➤ **Le monoxyde de carbone**

C'est un gaz incolore, inodore et très toxique pour les mammifères. Chez l'Homme, il est la cause d'intoxications domestiques extrêmement fréquentes, parfois mortelles [38]

Son émanation provient d'une combustion incomplète de composés carbonés et est accentuée par une mauvaise alimentation en air frais et/ou une mauvaise évacuation des produits de combustion (ventilation). Le mélange avec l'air est facile puisque sa densité est proche de celle de l'air.

Le monoxyde de carbone réagit avec le dioxygène pour former du dioxyde de carbone suivant la réaction exothermique :



b Les polluants secondaires

Ils se forment par photochimie ou par réaction chimique à partir des polluants primaires.

4.3.2 Les réglementations de la pollution de l'air

La combustion du gaz naturel dans des turbines à gaz génère principalement des oxydes d'azote et du monoxyde de carbone (l'émission de particules est pratiquement nulle lors de l'utilisation du gaz naturel). L'utilisation de la technologie de General Electric (fabricant des turbines) permet de répondre aux spécifications tableau suivant.

| Contaminant | Critères de conception | Limites à respecter |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| NOx (mg/Nm3 - 15% O2, sec) | 53 mg/Nm3 - 15% O2 = 26 ppm | 75 mg/Nm3 - 15% O2 = 37 ppm |
| CO (ppmvd - 15% O2) | 18 | < 18 |

Tableau 4.2 Les limites des émissions atmosphériques.

4.3.3 Contrôle de l'émission atmosphérique

Tableau 4.3 Emmisions atmosphérique.

| La date d'analyse | Moyenne de CO (PPM) | Moyenne de NOX (PPM) | O2 (%) |
|-------------------|---------------------|----------------------|--------|
| 01-01-2018 | 0.9 | 30.8 | 12.96 |
| 02-01-2018 | 6.2 | 31.2 | 13.35 |
| 03-01-2018 | 0.8 | 23.9 | 11.90 |
| 04-01-2018 | 0.2 | 18.6 | 10.40 |
| 05-01-2018 | 0.3 | 18.4 | 10.31 |
| 06-01-2018 | 0.2 | 17.9 | 10.47 |
| 07-01-2018 | 0.2 | 20.8 | 10.29 |
| 08-01-2018 | 7.4 | 18.3 | 11.49 |
| 09-01-2018 | 13.3 | 21.4 | 10.83 |
| 10-01-2018 | 21.5 | 20.9 | 10.47 |
| 11-01-2018 | 20.2 | 18.0 | 12.24 |
| 12-01-2018 | 14.1 | 20.5 | 12.56 |
| 13-01-2018 | 9.6 | 22.8 | 12.06 |
| 14-01-2018 | -0.4 | 18.8 | 12.99 |
| 15-01-2018 | 10.2 | 20.9 | 12.05 |
| 16-01-2018 | 0.0 | 20.6 | 12.63 |
| 17-01-2018 | 3.6 | 20.6 | 12.34 |
| 18-01-2018 | 0.3 | 18.1 | 12.87 |
| 19-01-2018 | 0.2 | 18.1 | 12.21 |
| 20-01-2018 | 0.2 | 17.8 | 12.18 |
| 21-01-2018 | 0.1 | 17.5 | 13.00 |

| | | | |
|------------|------|------|-------|
| 22-01-2018 | 0.3 | 19.2 | 12.11 |
| 23-01-2018 | 0.3 | 18.6 | 12.07 |
| 24-01-2018 | 0.3 | 17.6 | 12.22 |
| 25-01-2018 | 0.4 | 17.8 | 12.12 |
| 26-01-2018 | 4.2 | 19.5 | 11.90 |
| 27-01-2018 | 2.0 | 16.6 | 13.69 |
| 28-01-2018 | 0.3 | 18.3 | 13.22 |
| 29-01-2018 | 0.3 | 13.5 | 14.66 |
| 30-01-2018 | 8.2 | 18.7 | 12.51 |
| 31-01-2018 | 17.5 | 19.9 | 11.98 |

Tableau 4.3 Emmisions atmosphérique.(suite)

Tableau 4.6 montrent les valeurs des émissions atmosphériques provenant du C.E.M.S (), ces valeurs étaient dans les limites d'acceptabilité et présentaient une variation stable durant la journée.

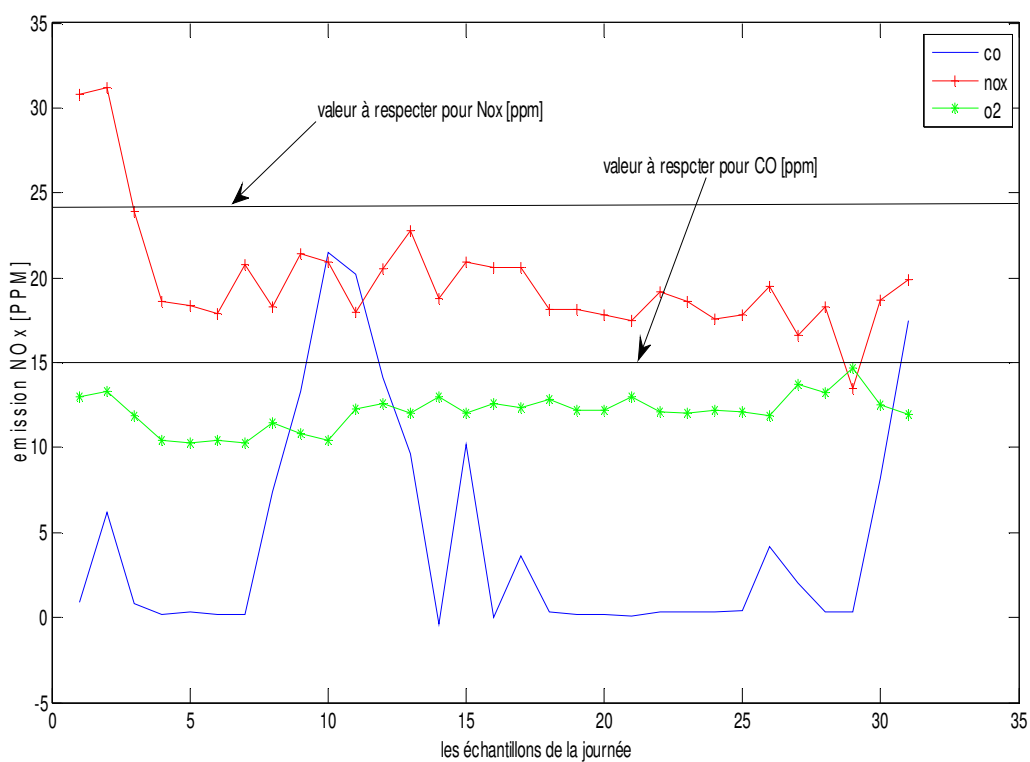


Figure 4.4 Emission atmosphérique.

Relation entre l'émission atmosphérique en fonction du débit de l'air et du gaz.

L'émission atmosphérique indésirable dépend du mauvais mélange entre le gaz et l'air (air insuffisant)

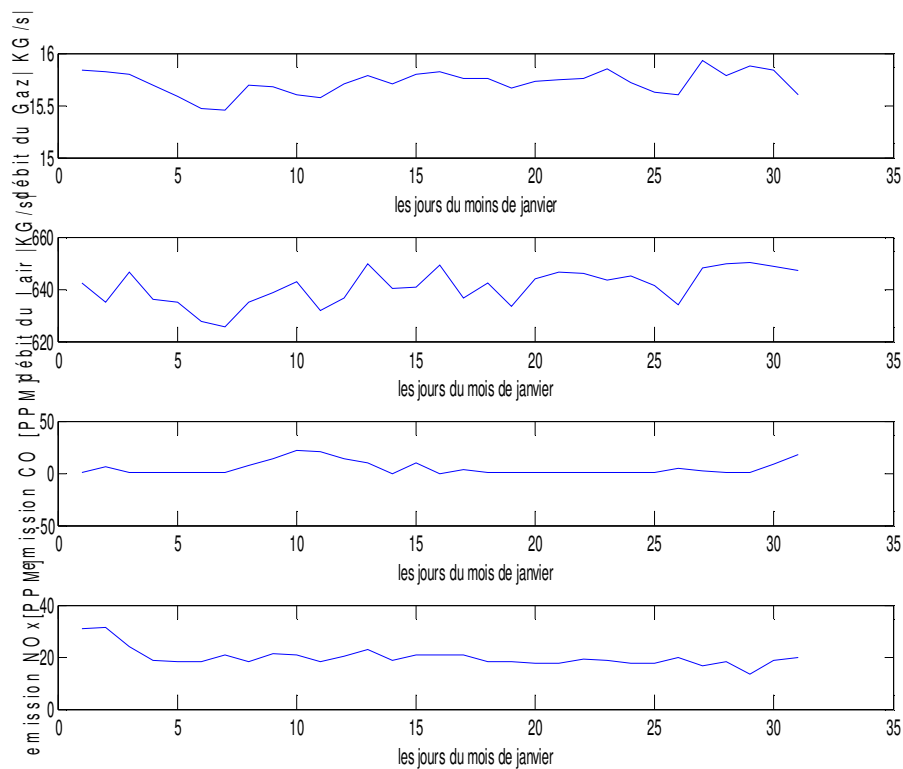


Figure 4.5 Impact de mélange air-gaz sur l'émission.

4.4 Conclusion

Les CCGT permettent de réduire de 50 % les émissions de CO₂, de diviser par trois celles des oxydes d'azote (NO_x) et de supprimer les rejets d'oxydes de soufre (SO₂) par rapport aux moyens de production thermique à flamme « classiques ». En outre, lorsque la combustion utilise du gaz naturel, cela ne produit ni particules de poussière ni odeurs. L'utilisation du gaz naturel comme carburant dans les CCGT présente donc des avantages notables en termes de pollution atmosphérique. Les cycles combiné gaz, au côté de l'efficacité énergétique constituent un recours indispensable.

Une Centrales électriques à Cycle Combiné Gaz (CCCG) peut ainsi atteindre un rendement de 57% alors que des centrales à charbon ou dotées d'une turbine à gaz unique ne dépassent généralement pas un rendement de l'ordre de 40%.

Conclusion générale

La rédaction des résultats du stage de projet de fin d'études qui s'est déroulé au niveau de la centrale Thermique 1227 MW Shariket Kahraba Hadjret En Nouss (SKH), au sein du groupe SNC Lavalin, nous a permis de concrétiser les aspects théoriques enseignés dans les cours de spécialité en termes pratiques. Nous avons pu prévisualiser divers appareils et appareils électroniques dans la centrale électrique, en plus nous avons appris à lire les schémas de P&ID, ce qui nous a permis de mener à bien ce projet, notamment en ce qui concerne la présentation métrologique des ressources utilisées dans l'analyse des gaz.

Nous avons observé lors de l'analyse que les composants du gaz (en particulier l'analyse du méthane) affectent directement le PCI, ce qui à son tour affecte le rendement. En termes d'impact des composants du gaz sur les émissions atmosphériques, il faut considérer plutôt la mauvaise combinaison du débit de gaz et de la quantité d'air nécessaire à la combustion et non pas la composition du gaz.

Enfin, on peut dire que les cycles combinés sont un bon exemple de contribution sur le plan du développement durable, ils présentent des avantages importants en termes d'efficacité énergétique et de réduction de la pollution atmosphérique.

La centrale thermique SKH fournit une capacité très importante 1227 MW (environ 8% de la production d'électricité en Algérie) avec un rendement d'environ 57% (17% de plus que les centrales classiques). La centrale contribue également à la réduction des émissions de CO₂ de 50% et des émissions de NOX de 33% par rapport aux anciennes centrales thermiques et à l'élimination des déchets de SO₂.

Bibliographie

- [1]: 'nouveau programme national sur l'efficacité énergétique (2016-2030)', Date de mise en ligne 15/02/2015, sur le site : https://portail.cder.dz/IMG/article_PDF/article_a4445.pdf
- [2] : 'Electricité et Gaz', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Energie/electricite-gaz-maj.pdf>
- [3] 'Liste des projets du Programme Algérien de Développement des Energies Nouvelles et Renouvelables et de l'Efficacité Energétique', Date de mise en ligne Lundi 25 avril 2011, sur le site : <https://portail.cder.dz/spip.php?article1155>
- [4] 'Centrales électriques diesel', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://www.sauercompressors.com/fr/industrie/production%20denergie/centrales-electriques-diesel/>
- [5] 'groupes électrogènes', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://www.inmesol.fr/systemes-en-parallele/montes-en-parallele-avec-le-reseau.asp>
- [6] 'les centrales électriques', consulté le 15/06/2018, sur le site : http://www.formationeda.com/sciences/guide_de_revision/SCP4011p2-Centrales-FRoche.pdf
- [7] 'Centrale thermique turbine Vapeur', consulté le 15/06/2018, sur le site : http://www.steg.com.tn/fr/institutionnel/tech_vapeur.html
- [8] 'Avantages et Inconvénients des centrales Thermiques à vapeur', consulté le 15/06/2018, sur le site : http://www.clg-champagne-lemesnil.ac-versailles.fr/IMG/pdf/l_energie_thermique_a_flamme.pdf
- [9] 'centrales hydroélectriques' consulté le 15/06/2018, sur le site : <https://www.nbpower.com/fr/about-us/learning/learn-about-electricity/hydro/>
- [10] 'Production électrique par des centrales hydroélectriques en Algérie', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=378>
- [11] 'Schéma d'une centrale à turbine de gaz', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://www.leseoliennes.be/economieolien/turbinegaz.htm>

- [12] 'centrale à cycle combiné', consulté le 15/06/2018, sur le site : <https://www.vivafrik.com/2017/12/27/siemens-et-rotan-power-construisent-une-centrale-de-660-mw-au-ghana-a14153.html>
- [13] 'Avantages et inconvénients des centrales à cycle combiné', consulté le 15/06/2018, sur le site : <https://www.fournisseurs-electricite.com/infos-pratiques-sur-les-fournisseurs-delectricite/les-centrales-electriques/cycle-combine>
- [14] 'les centrales hybrides', consulté le 15/06/2018, sur le site : <https://www.systemespv.com/Systemes+hybrides>
- [15] 'Avantages et Inconvénients des centrales hybrides', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://www.systemoffgrid.com/index.php?P=95&Titre=systemes-hybrides>
- [16] 'Schéma d'une Centrale éolienne', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://nucleaire-nonmerci.net/actualite/nuisance-eoliennes-1609.html>
- [17] 'Avantages et Inconvénients des centrales éoliennes', consulté le 15/06/2018, sur le site : <https://www.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/les-avantages-et-inconvenients-de-l-energie-eolienne>
- [18] 'centrale photovoltaïque', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://lorgues.nature.over-blog.com/article-petite-introduction-aux-systemes-photovoltaiques-57446073.html>
- [19] 'Avantages et Inconvénients de centrale photovoltaïque', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://unblogsurlaterre.com/actualites-environnement-sur-la-terre/avantages-et-inconvenients-energie-solaire-011/>
- [20] 'cycle combiné', consulté le 15/06/2018, sur le site : https://www.fun-mooc.fr/asset-v1:MinesTelecom+04024+session01+type@asset+block/Polycopie_MOOC_CTC2_S3.pdf
- [21] 'Les chiffres clés 2017 fournis par SONEGGAZ', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://www.sonegaz.dz/?page=article&ida=664>
- [22] 'Les chiffres clés 2017 fournis par SONEGGAZ, La capacité de production d'électricité', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://www.sonegaz.dz/?page=article&id=13>
- [23] 'Chapitre 1 - Ensemble BOP / Ilots de Puissance et Communs', programme de formation BOP (Balance Of Plant) Volet OPÉRATION, 2008, 467 pages
- [24] 'métrologie', consulté le 15/06/2018, sur le site : <https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9trologie>
- [25] 'Christophe Rousseau', 'Maîtrise Statistique des Procédés (MSP)', 11/02/2014, 95 pages.
- [26] 'PrebenHowarth', "métrologie – en bref" édition meda 2007, 53 pages
- [27] ' Calibration ', consulté le 15/06/2018, sur le site : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ajustage_\(m%C3%A9trologie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ajustage_(m%C3%A9trologie))

- [28] 'chromatographie en phase gazeuse' consulté le 15/06/2018, sur le site :
https://fr.wikipedia.org/wiki/Chromatographie_en_phase_gazeuse
- [29] 'S'applique aux deux Daniel Danalyzer Modèle 700', RosemountAnalytical Modèle 700
Numéro de pièce 3-9000-521, Révision L FÉVRIER 2006, 290 page.
- [30] 'logiciel de chromatographe', consulté le 15/06/2018, sur le site :
https://fr.wikipedia.org/wiki/Logiciel_de_chromatographie
- [31] 'gaz de calibration ', consulté le 15/06/2018, sur le site :
<https://www.emerson.com/documents/automation/certification-model-700-gc-ofgem-approval-of-calorific-value-measurement-apparatus-en-72090.pdf>
- [32] 'SERVOPRO 4900 SERVOMEX Analyseurs d'émissions', consulté le 10/09/2018, sur le site :
<http://pdf.directindustry.com/pdf/servomex/servopro-4900/2322-322023.html>
- [33] 'Thermo 48 i CO Analyzer', consulté le 10/09/2018, sur le site :
<http://rental.cleanair.com/thermo48icoanalyzer>
http://rental.cleanair.com/sites/default/files/Thermo_48i_CO_Analyzer.pdf
- [34] 'analyser Eco Physics CLD 800', consulté le 10/09/2018, sur le site :
<https://www.environmental-expert.com/products/eco-physics-model-cld-800-series-detecting-nitrogen-oxides-analyzers-152885>
- [35] 'Les gaz à effet de serre', consulté le 10/09/2018, sur le site :
<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/air/questce-ges.htm>
- [36] abdoulayeouedraogo, modèles de quantification et de mitigation des rejets Atmosphériques d'une centrale thermique diesel, publication interne de l'université d'Ouagadougou, octobre 2006.
- [37] ' la pollution de l'air en région parisienne, exposition et perception sur les sites touristiques', paris vii, thèse, 2013.
- [38] Page officielle du ministère français de la santé sur le monoxyde de carbone, 05/06/2018, consulté le 10/09/2018, sur le site :
<http://energie.edf.com/thermique/une-energie-pour-demain/les-cycles-combines-gaz/quyest-ce-quyest-cycle-combine-gaz-47869.html>