

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : Génie de l'Environnement
Entreprise : General Electric (ALGESCO)

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie de
l'Environnement

Etude des émissions des turbines maintenues par General Electric

Présenté par :

MERAOUNA Farida

REZGUI Ryma

Sous la direction de :

M. Rabah KERBACHI, Professeur à l'ENP

M. Sofiane BOUZAR, Field Resource MANAGER à ALGESCO

Présenté et soutenu publiquement le : 2 juillet 2019

Devant le jury composé de :

Président	M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur à l'ENP
Encadreur	M. Rabah KERBACHI,	Professeur à l'ENP
Encadreur	M. Sofiane BOUZAR,	Field Resource MANAGER à ALGESCO
Examineur	M. Yassine KERCHICHE	Maitre conférence A

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : Génie de l'Environnement

Entreprise : General Electric (ALGESCO)

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie de
l'Environnement

Etude des émissions des turbines maintenues par General Electric

Présenté par :

MERAOUNA Farida

REZGUI Ryma

Sous la direction de :

M. Rabah KERBACHI, Professeur à l'ENP

M. Sofiane BOUZAR, Field Resource MANAGER à ALGESCO

Présenté et soutenu publiquement le : 2 juillet 2019

Devant le jury composé de :

Président	M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur à l'ENP
Encadreur	M. Rabah KERBACHI,	Professeur à l'ENP
Encadreur	M. Sofiane BOUZAR,	Field Resource MANAGER à ALGESCO
Examineur	M. Yassine KERCHICHE	Maitre conférence A

ملخص

الغرض من هذا العمل هو اكتشاف وتعميق معرفتنا بتشغيل تكنولوجيا التوربينات الغازية الجديدة من جنرال إلكتريك. هذه التوربينات التي تعمل على نظام الاحتراق المنخفض الانبعاثات لها تأثير على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وأكاسيد النيتروجين. لقد وصفنا بالتفصيل التقدم المحرز في عمليات التحكم التي تشكل جزءاً من صيانة هذه التوربينات ، بهدف تحقيق نافذة تشغيل مثالية تضمن حلاً وسطاً جيداً بين تقليل انبعاثات ملوثات الهواء المختلفة والزيادة الإنتاجية. تم تحليل النتائج التي تم الحصول عليها ومقارنتها بالمعايير التي تنظم انبعاثات الدخان. تعرض الدراسة معدلات الغاز المنبعثة سنوياً بواسطة هذه الآلات وكذلك نشأتها في الهواء المحيط.

الكلمات الدالة

انبعاثات الغازات، الاحتراق المنخفض الانبعاثات، توربينات الغاز المطورة

ABSTRACT

The purpose of this work is to discover and deepen our knowledge of the operation of General Electric's new aerodrome gas turbine technology. These turbines running on the low-emission combustion system have an impact on CO and NOX emissions. We described in detail the progress of the control operations that are part of the maintenance of these turbines, aiming to achieve an optimal operating window that ensures a good compromise between the reduction of emissions of different air pollutants and the increase productivity. The results obtained were analyzed and compared to standards regulating smoke emissions. The study presents the rates of gas emitted annually by these machines as well as their dispersion in the ambient air.

Key words

Mapping, emissions, pollutants, dispersion, combustion.

RESUME

Ce travail a comme but de découvrir et d'approfondir nos connaissances sur le fonctionnement de la nouvelle technologie des turbines à gaz aérodérivées de General Electric. Ces turbines fonctionnant au système de combustion à faible émission sèche ont un impact sur les émissions du CO et des NOX. Nous avons décrit en détails le déroulement des opérations de contrôle qui entrent dans le cadre de la maintenance de ces turbines, visant à atteindre une fenêtre d'opération optimale qui assure un bon compromis entre la réduction des émissions de différents polluants atmosphériques et l'augmentation de la productivité. Les résultats obtenus ont été analysés et comparés aux normes réglementant les émissions des fumées. L'étude présente les taux de gaz émis annuellement par ces machines ainsi que leur dispersion dans l'air ambiant.

Mots clés

Turbine à gaz, combustion, faible émission sèche, contrôle des émissions, polluants atmosphériques.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma chère mère N. AILEM

Mon cher père A. MERAOUNA

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer
mon amour pour eux

Mes chers frères : Imade, Oussama, Abd Ellah, et mon adorable
sœur Sihem

A Ma Très Chère famille

A tous mes professeurs du primaire à l'université

A Tous mes Amies

Merci pour votre gentillesse et votre générosité et pour les bons
moments qu'on a passé ensemble.

Mon binôme, Ryma, pour son grand cœur et sa patience.

A tous ceux ou celles qui me sont chers

M. Farida

Dédicace

*Bien qu'aucun discours ne saurait être assez éloquent pour
m'exprimer,*

Je dédie ce travail A :

*Ma mère puis mon père, ces deux êtres à qui je dois ma vie et toutes mes
réussites,*

A Abdelillah, qui a toujours su me pousser vers le haut !

A mon oncle Mustapha, qui m'a toujours inspirée et cru en moi,

*A mon oncle Ahmed et sa femme, de m'avoir soutenue lors des moments
difficiles,*

A mon grand-père, merci pour tes duaa.

*A mes sœurs Rania et Ahlem, merci de me supporter ! Et à Abdou, notre
rayon de soleil.*

*A Amina, Maha, Mounia, Sarah... et toutes mes amies qui ont
constamment été présentes,*

Au Club d'Activités Polyvalentes pour avoir été une seconde école.

A mon binôme,

Et à toute personne qui aurait contribué à ce que je suis aujourd'hui,

Merci.

Ryma.

Remerciements

Nous tenons à saisir cette occasion pour présenter nos profonds remerciements et notre profonde estime à l'ensemble de l'équipe pédagogique du Département Génie de l'Environnement de l'Ecole Nationale Polytechnique pour nous avoir formées, éclairées et accompagnées le long de ces trois années de spécialité.

Nous adressons nos vifs remerciements à Monsieur CHERGUI qui nous a fait l'honneur de présider notre jury. Ainsi qu'à Monsieur KERCHICHE, membre du Jury, pour le temps et l'énergie qu'ils ont accordée à la lecture de notre document.

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur, Pr. KERBACHI. Merci de nous avoir encadrées, aidées et orientées.

Merci à Mr DRAHMOUNE, de nous avoir, prises en charge, accueillies au sein de ALGESCO et donné l'opportunité d'y effectuer notre stage.

Nous adressons notre profonde gratitude à notre promoteur Mr Sofiane BOUZAR, qui nous a encadrées au sein de l'entreprise, et qui a toujours été présent afin de nous orienter, nous motiver, et nous aider.

Nous remercions sincèrement Mr Mohammed CHERIFI, l'ingénieur contrôle qui nous a généreusement transmis un maximum de son savoir, qui a fait preuve de patience et qui a répondu présent tout au long de notre période de stage.

Nous remercions les formateurs Tarek et Reda BOUBENIA pour leur temps et leur partage, ainsi que tous les employés d'ALGESCO qui nous ont chaleureusement accueillies parmi eux et nous ont permis de vivre notre stage dans une aussi bonne ambiance.

Farida et Ryma.

TABLE DES MATIERES

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale

Chapitre 1 : PRESENTATION DE L'ENTREPRISE GENERAL ELECTRIC	15
1.1 General Electric (GE)	18
1.2 General Electric en Algérie	20
1.3 Baker Hughes, a GE Company (BHGE)	20
1.4 Algerian Engineering Service Company (ALGESCO)	21
1.4.1 Shop service	21
1.4.2 Field service	21
Chapitre 2 : LES TURBINES A GAZ	18
2.1 Généralités sur les turbines à gaz	23
2.1.1 Définition	23
2.1.2 Composantes d'une turbine à gaz.....	23
2.1.3 Fonctionnement	24
2.1.4 Applications industrielles des turbines à gaz	25
2.1.5 Types de turbines	25
2.2 Turbine à gaz PGT 25.....	27
2.3 Maintenance des turbines à gaz	29
2.4 Système de combustion	29
2.4.1 Généralités sur la combustion	29
2.4.2 Paramètres de gaz et de carburant liquide	30
2.4.3 Pouvoir calorifique du combustible	31
2.4.4 Chaînes d'inflammabilité.....	32
2.4.5 Point de rosée des hydrocarbures	32
2.4.6 Indice de WOBBE.....	32
2.4.7 Flamme.....	32
2.4.8 Emission de polluants.....	34
Chapitre 3 : COMBUSTION ET POLLUTION ATMOSPHERIQUE	23
3.1 Généralités sur la pollution atmosphérique	36
3.1.1 Gaz composants de l'atmosphère	36
3.1.2 Pollution atmosphérique.....	37

3.2	Combustion et pollution atmosphérique.....	37
3.2.1	Généralités sur les combustibles fossiles	37
3.2.2	Polluants liés à la combustion	39
3.2.3	Dioxyde de carbone.....	46
3.2.4	Normes et réglementation algérienne ⁶	47
3.3	Paramètres influençant la diffusion des polluants	47
3.3.1	Influence des facteurs météorologiques	48
Chapitre 4:	SYSTEME DRY LOW EMISSION (DLE)	53
4.1	Introduction	51
4.2	Système DLE.....	51
4.2.1	Principe.....	51
4.2.2	Historique	51
4.2.3	Combustion	52
4.3	Le mapping.....	54
4.3.1	Composants de contrôle du système DLE.....	55
4.3.2	Système de carburant	55
4.4	Système de purge.....	56
i)	Contrôle du carburant	57
ii)	Contrôle de la température de la flamme.....	58
iii)	Température de flamme en vrac	58
Chapitre 5:	OPERATIONS DE CONTROLE.....	12
5.1	Introduction	62
5.2	Description du projet In Salah Gaz.....	62
5.3	Mesure des émissions	64
5.3.1	Différentes phases de mesure des émissions.....	64
5.3.2	Appareil de mesure.....	64
5.4	Méthodologie et déroulement de l'opération de Mapping	65
5.4.1	Pré-mapping	66
5.4.2	Le mapping.....	67
5.4.3	Mapping en mode ABC.....	67
Chapitre 6 :	CALCUL DES EMISSIONS - RESULTATS ET INTERPRETATION.....	62
6.1	Calcul des émissions en CO ₂	71
6.2	Emissions annuelles en polluants	75

6.2.1	Site TEG.....	76
6.2.2	Site REG.....	79
6.2.3	Calcul des émissions annuelles de tout le site TEG et REG	82
6.3	Calcul de la dispersion.....	85
6.3.1	Modèle de Gauss	85
6.3.2	Classes de stabilité atmosphérique selon Pasquill.....	86
6.3.3	Conditions météorologiques choisies	88
6.3.4	Calcul des concentrations en polluants à des distances éloignées de la source .	91
6.4	Discussion et interpretation	98
6.4.1	Emissions annuelles en polluants	98
6.4.2	Emissions annuelles en CO ₂	101
6.4.3	Dispersion des polluants.....	101
	Conclusion générale	105
	Références	110
	Annexes	113

LISTE DES FIGURES

Fig. 1-1 Diagramme circulaire représentant les business de General Electric [13].	18
Fig. 1-2 Organigramme représentant les activités et les sous-activités de GE [6].	19
Fig. 1-3 Sites d'implantation et d'intervention de General Electric en Algérie [13].	20
Fig. 2-1 Composantes d'une turbine à gaz [23].	24
Fig. 2-2 Schéma d'un groupe d'une turbine à gaz [11].	24
Fig. 2-3 Evolution de température des flammes de diffusion et prémélangée [13].	33
Fig. 2-4 Schéma illustrant les émissions d'une turbine à gaz [13].	34
Fig. 3-1 Emissions d'oxyde d'azote par secteur d'activité (année 2000) [30].	39
Fig. 3-2 Définition des trois mécanismes de formation de NO [45].	42
Fig. 3-3 Emissions de CO et de NOX en fonction de la richesse [46].	45
Fig. 3-4 Notion de stabilité statique verticale d'une particule [72].	49
Fig. 4-1 Chambre de combustion DLE [13].	52
Fig. 4-2 Configurations de la chambre de combustion [13].	53
Fig. 4-3 Comparaison entre le moteur DLE avec étage de la chambre de combustion et le moteur non DLE [78].	53
Fig. 4-4 Moteur DLE avec étage de la chambre de combustion et modulation de la purge [78].	54
Fig. 4-5 Système d'alimentation à trois vannes [13].	56
Fig. 4-6 Effet de la configuration de la chambre de combustion et de la purge du compresseur [13].	57
Fig. 4-7 Fenêtre de température de flamme en vrac [13].	58
Fig. 5-1 Projet In Salah Gaz	62
Fig. 5-2 Turbine PGT25 dans le site TEG	64
Fig. 5-3 l'appareil de mesure TESTO	65
Fig. 6-1 Panache de fumée (distribution gaussienne) [82].	86
Fig. 6-2 Détermination du nombre d'octas en fonction des symboles [83].	88
Fig. 6-3 Relevé météorologique du 26/04/2019 à 17h [84].	88
Fig. 6-4 Relevé météorologique du 25/04/2019 à 13h [84].	89
Fig. 6-5 Relevé météorologique du 22/05/2019 à 16h [84].	90
Fig. 6-6 Relevé météorologique du 09/06/2019 à 15h [84].	90
Fig. 6-7 Concentrations des NOx à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques pour le site TEG	94

Fig. 6-8 Concentrations du CO à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques pour le site TEG	95
Fig. 6-9 Concentrations des NOx à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques pour le site REG	97
Fig. 6-10 Concentrations du CO à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques pour le site REG	98

LISTE DES TABLEAUX

Tab. 2-1 PCI des combustibles gazeux courants	31
Tab. 3-1 Composition chimique de l'atmosphère [17, 18]	36
Tab. 3-2 Caractéristiques de combustibles fossiles et synthétiques [24].	38
Tab. 3-3 Evolution des pourcentages d'émissions de NO _x en Gg en Algérie par année et par secteur d'activité [31].	40
Tab. 3-4 Normes algériennes du NO ₂ dans l'air ambiant [65]	47
Tab. 3-5 les seuils des polluants à l'émission (dans les fumés) [87].	47
Tab. 4-1 Composants de commande LM2500 supplémentaires pour l'application DLE.....	55
Tab. 6-1 Teneurs en polluants en fonction du taux d'O ₂ pour différents modes de flamme pour la turbine GT1 du TEG.	76
Tab. 6-2 Quantités de NO _x émises par la Turbine GT1 du site TEG	76
Tab. 6-3 Quantités de CO émises par la Turbine GT1 du site TEG	77
Tab. 6-4 Teneurs en polluants en fonction du taux d'O ₂ pour différents modes de flamme pour la turbine GT2 du TEG.	77
Tab. 6-5 Quantités de NO _x émises par la Turbine GT2 du site TEG	78
Tab. 6-6 Quantités de CO émises par la Turbine GT2 du site TEG	78
Tab. 6-7 Teneurs en polluants en fonction du taux d'O ₂ pour différents modes de flamme pour la turbine GT1 du REG	79
Tab. 6-8 Quantités de NO _x émises par la Turbine GT1 du site REG	79
Tab. 6-9 Quantités de CO émises par la Turbine GT1 du site REG	80
Tab. 6-10 Teneurs en polluants en fonction du taux d'O ₂ pour différents modes de flamme pour la turbine GT2 du REG	80
Tab. 6-11 Quantités de NO _x émises par la Turbine GT2 du site REG	81
Tab. 6-12 Quantités de CO émises par la Turbine GT2 du site REG	81
Tab. 6-13 Teneurs moyennes en polluants en fonction du taux d'O ₂ pour différents modes de flamme pour le site TEG	82
Tab. 6-14 Quantités de NO _x émises par tout le site TEG	82
Tab. 6-15 Quantités de CO émises par tout le site TEG	83
Tab. 6-16 Teneurs moyennes en polluants en fonction du taux d'O ₂ pour différents modes de flamme pour le site REG	83
Tab. 6-17 Quantités de NO _x émises par tout le site REG	83
Tab. 6-18 Quantités de CO émises par tout le site REG	84
Tab. 6-19 Quantités de NO _x émises par l'ensemble des deux sites TEG et REG	84

Tab. 6-20 Quantités de CO émises par l'ensemble des deux sites TEG et REG	85
Tab. 6-21 Classes de stabilité atmosphérique de Pasquill [82].	86
Tab. 6-22 Réduction du rayonnement solaire entrant par les nuages [82]	87
Tab. 6-23 Paramètres de diffusion de Pasquill. [82].	88
Tab. 6-24 Valeurs de σ_y pour toutes les classes atmosphériques étudiées et pour des distances différentes à partir de la source	91
Tab. 6-25 Valeurs de σ_z pour toutes les classes atmosphériques étudiées et pour des distances différentes à partir de la source	92
Tab. 6-26 Concentrations des NO _x à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques pour le site TEG	93
Tab. 6-27 Concentrations du CO à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques pour le site TEG	94
Tab. 6-28 Concentrations des NO _x à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques pour le site REG	96
Tab. 6-29 Concentrations du CO à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques le site de REG	97

LISTE DES ABREVIATIONS

ALGESCO: ALGERian Engineering Service COmpany

BHGE: Baker Hughes, une entreprise de General Electric

CO : Monoxyde de carbone

CO₂ : Dioxyde de carbone

COV: Composés Organiques Volatiles

CPG: Chromatographie en Phase Gazeuse

DLE: Dry Low Emission

DLN : Dry Low NOx

GE: General Electric

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC :Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GNL: Gaz Naturel Liquéfié

GT : Gas Turbine (Turbine à gaz)

LVDT : Linear Variable Differential Transformer (Transformateur différentiel variable linéaire)

NOx : Oxydes d'azote

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur

RTD: Resistance Temperature Detectors (thermomètre à résistance de platine)

SONATRACH: SOciété NAtionale pour la recherche, la production, le TRAnsport, la transformation, et la Commercialisation des Hydrocarbures

SONELGAZ : Société Nationale de l'Electricité et du GAZ

TC : Transformateur de Courant

UHC : Unburned Hydrocarbons (Hydrocarbures imbrulés)

UV :Ultraviolet

Introduction générale

En Algérie, comme dans un grand nombre de pays, la consommation énergétique basée sur les énergies fossiles est à l'origine de fortes émissions de polluants atmosphériques tels que le CO, les NOx, les particules, les COV, etc.

Bien que l'Algérie soit un peu privilégiée, car utilisant en grande partie du gaz naturel, il n'en demeure pas moins que quelque soit le type d'énergie fossile utilisée, une combustion émet toujours des polluants nocifs.

Etant un pays producteur d'énergie fossile, pétrole et gaz, l'Algérie dispose de grandes infrastructures de forage et de production et de transport d'énergie dans le Sud du pays. Ces infrastructures qui sont généralement importées et installées en partenariat avec les grands groupes mondiaux nécessitent un savoirfaire technologique que nos entreprises nationales Sonatrach et Sonelgaz ne maîtrisent pas entièrement. Afin de réaliser le programme d'investissement et le plan de production, ces entreprises coopèrent avec des sociétés étrangères leader dans le monde.

Dans son développement socio-économique, l'Algérie a consentis d'immenses efforts pour augmenter les quantités d'hydrocarbures à exporter et satisfaire les besoins de la consommation interne. C'est ainsi que le parc de centrales électriques est passé d'une capacité de 5600 MW en 2001 à 21000 MW actuellement. Cette production d'énergie génère des émissions atmosphériques de plus en plus fortes.

La technologie a fait beaucoup d'efforts dans le but d'améliorer les systèmes de combustion des installations. General Electric (GE), fournisseur puissant des turbines à gaz, et qui travaille depuis plusieurs années en Algérie, a développé ses appareils et systèmes de combustion dans ce sens. En 1993 les entreprises nationales Sonatrach et Sonelgaz ont créé en partenariat avec GE, l'entreprise ALGESCO, pour acquérir le savoir technologique dans ce domaine.

Compte tenu de son rôle central dans le processus de conversion du combustible en énergie, la chambre de combustion est l'élément essentiel pour atteindre des objectifs de performance, à savoir une excellente opérabilité sur une large plage de charge et avec de faibles émissions de polluants atmosphériques, les NOx et le CO.

Le système de combustion à faible émission sèche (DLE) est une technologie de différenciation clé dans les moteurs aérodérivés de GE, qui offre des performances de pointe en matière d'émissions avec une excellente flexibilité en matière de carburant.

C'est dans ce contexte que s'insère notre étude portant sur l'efficacité du contrôle de la maintenance des turbines aérodérivées sur les émissions engendrées. Nous proposons, dans ce travail, un plan basé sur trois phases :

- Etat de l'art portant sur l'impact des émissions des appareils dépendants des combustibles fossiles, ainsi que sur les turbines aérodérivatives, notamment les PGT25 fonctionnant au système DLE, et leur particularité par rapport aux systèmes classiques de combustion.
- Ordonnancement des opérations de « Mapping » visant à optimiser les dispositifs de mélange préalable air / carburant qui permettent de réduire les émissions de polluants du système de combustion tout en assurant sa rentabilité, sa fiabilité, et la diminution des acoustiques.

Introduction générale

- Etude des émissions annuelles en polluants et en CO₂ engendrées par les turbines PGT25 placées dans les deux sites Teg et Reg du projet « In Salah Gas », ainsi que les concentrations de ces polluants suite au phénomène de diffusion.

Partie I :

Etat de l'art

**Chapitre 1 : PRESENTATION DE L'ENTREPRISE
GENERAL ELECTRIC**

Afin de réaliser le programme d'investissement et le plan de production, les entreprises énergétiques algériennes coopèrent avec des sociétés étrangères leader dans le monde. Une de ces entreprises est la compagnie américaine General Electric spécialisée, entre autre, dans les turbines que nous présentons sommairement dans les paragraphes suivants.

1.1 General Electric (GE)

L'entreprise General Electric (GE) possède 36 filiales dans 180 pays [1] et est une valeur symbole du New York Stock Exchange, son siège se trouve depuis juin 2016 à Boston (Massachusetts) aux États-Unis. Classée 12ème des entreprises les plus rentables au monde en 2018 [2], General Electric est une entreprise diversifiée dans l'industrie, la technologie et les services.

Ses activités dans le domaine de l'énergie sont concrétisées par le fournissement d'équipements pour la production, le transport et distribution d'électricité, des centrales thermiques à base de turbines à vapeur et / ou de turbines à gaz avec les alternateurs associés, des éoliennes, des logiciels de gestion de réseaux. Elle est également un acteur majeur dans la désalinisation et le traitement des eaux usées et compte plus de 300 000 salariés dans le monde [3].

Dans le domaine du transport, GE est un important fournisseur de réacteurs d'avions et de locomotives. Elle fournit également des équipements médicaux aux hôpitaux, elle produit du matériel d'éclairage, des silicones et des abrasifs, ainsi que des appareils électroménagers. GE est cofondatrice de la chaîne de télévision NBC. La branche GE Capital fournit des services financiers aux particuliers, mais aussi aux entreprises : immobilier, leasing entre autres [4].

Nous illustrons en figure 1-1 les business de GE

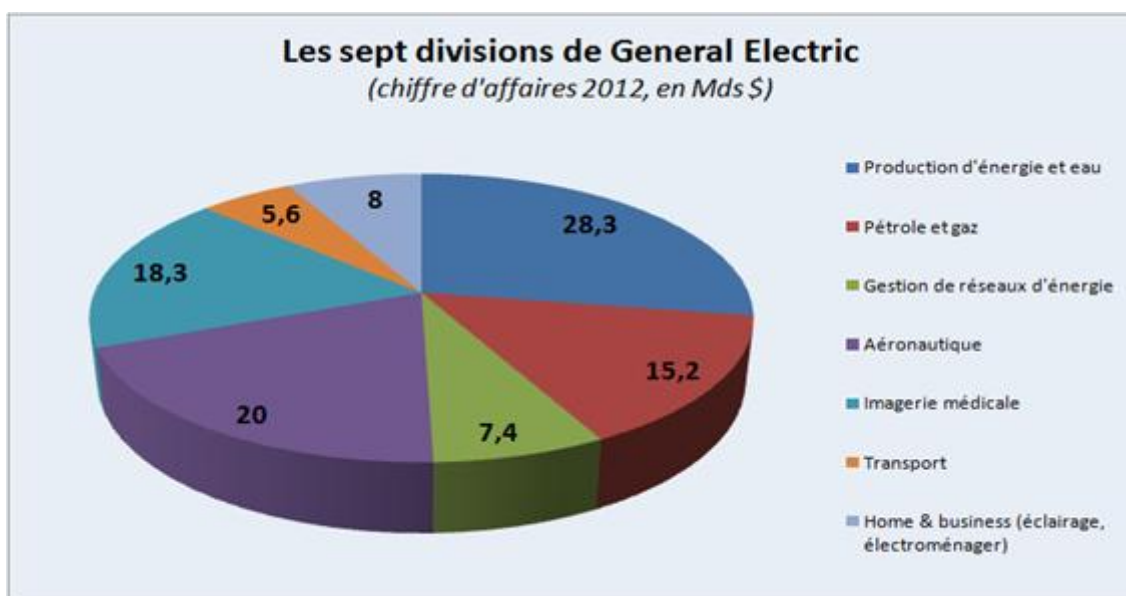


Fig. 1-1 : Diagramme circulaire représentant les business de General Electric [5].

Les origines de GE remontent à Thomas Edison qui créa l'Edison Electric Light Company en 1878. En 1892, elle fusionne avec Thomson-Houston Electric Company pour donner naissance à la General Electric Company, aujourd'hui GE.

Actuellement Général Electric a différentes activités que nous illustrons en figure 1-2.

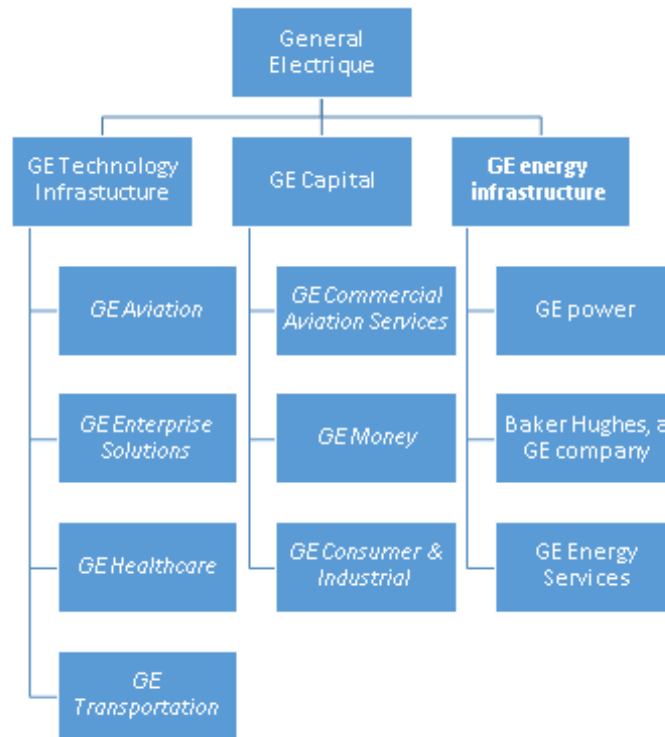


Fig. 1-2 Organigramme représentant les activités et les sous-activités de GE [6].

GE Energy Infrastructure est répartie en 3 grands pôles :

- GE Power and Water : Energies renouvelables tels que les panneaux solaires et les turbines pour éoliennes, barrages hydrauliques et biogaz, production d'électricité et fournisseurs d'équipements et technologies associés (GE Power) ; traitement de l'eau, y compris le dessalement (GE Water et Process Technologies).
- GE Energy Services : Fourniture de services, conseils et personnel pour les entreprises liées au domaine de l'énergie.
- GE Oil and Gas : Baker Hughes, a GE company Equipements et services pour l'industrie du pétrole et du gaz naturel.

Tous ces pôles sont spécialisés dans les services et les solutions de financement dans la recherche, l'exploitation et la mise en œuvre des ressources naturelles telles que le vent, l'énergie solaire, le gaz, le pétrole et l'eau.

1.2 General Electric en Algérie

Depuis plus de 40 ans, GE collabore avec l'Algérie dans plusieurs domaines. Elle fournit des solutions d'imagerie de pointe ainsi que d'autres technologies médicales innovantes qui améliorent l'accès à des soins de santé abordables et de qualité.

GE aviation est un leader mondial dans la fabrication de moteurs d'avions commerciaux et un partenaire d'Air Algérie depuis plus de 25 ans.

En 2008, GE et ses partenaires algériens ont créé la station Hamma, la plus grande infrastructure de dessalement d'eau de mer d'Afrique. Grâce à ses membranes d'osmose inverse, conformes à la technologie Ecomagination de GE, Hamma approvisionne plus d'un million d'algérois en eau potable tous les jours [7].

Nous illustrons en figure 1-3 les sites d'implantation et d'intervention de General Electric en Algérie

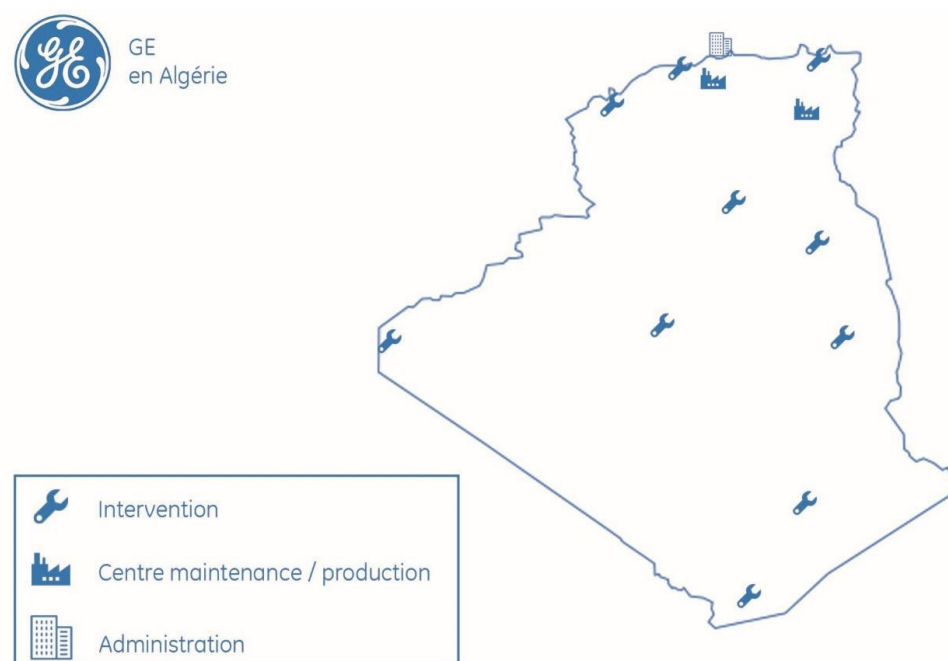


Fig. 1-3 Sites d'implantation et d'intervention de General Electric en Algérie [5].

1.3 Baker Hughes, a GE Company (BHGE)

BHGE est une fusion établie en 2017 entre Baker Hughes, une entreprise parapétrolière américaine spécialisée dans les forages horizontaux et les produits chimiques nécessaires à la fracturation hydraulique, et GE Oil & Gas. C'est la première et unique entreprise à proposer des équipements, des services et des solutions numériques leaders dans l'industrie d'un bout à l'autre de la chaîne de production et d'exploitation du pétrole et du gaz [8].

En effet, les produits et services de la société comprennent les secteurs amont, intermédiaire, aval, industriel et numérique.

L'amont de la société, comprend l'évaluation, le forage, la production et l'accomplissement. L'intermédiaire permet une efficacité de la puissance et de la compression pour le GNL, le pipeline et le stockage.

En aval, la fiabilité et la sécurité de la construction sont intégrées dans les opérations de traitement. De plus, en aval, il propose des produits chimiques de traitement des turbomachines.

Structurée sur plus de 40 ans de présence, BHGE a été associée à plusieurs missions de développement majeures, notamment avec SONATRACH et SONEGAS pour le développement d'ALGESCO.

1.4 Algerian Engineering Service Company (ALGESCO)

ALGESCO est une coentreprise entre General Electric, Sonatrach et Sonelgaz née en 1993 à HassiR'mel où elle intervenait dans la réparation et la maintenance des turbines à gaz.

Le site industriel de Boufarik (Wilaya de Blida) né en 2010 est spécialisé dans la réparation, l'ingénierie, le service sur site et d'autres fonctions de support. Il s'agit du plus grand centre de maintenance dédié aux turbomachines au monde.

Ses capacités de réparation comprennent les services d'entretien et d'optimisation de turbines, compresseurs et auxiliaires pour l'industrie pétrolière et gazière algérienne. Ce centre d'environ 18 000 m², d'un investissement de 36 millions de dollars US et d'un effectif de 238 employés, est équipé de la technologie la plus récente de revêtement thermique, d'un système de réparation au laser et des dernières technologies d'usinage.

Un des domaines dans lequel intervient ALGESCO est la maintenance des installations énergétiques (optimisation de la combustion) pour réduire les émissions de polluants atmosphériques

1.4.1 Shop service

Le centre de maintenance dispose d'un atelier capable d'assurer plusieurs opérations, ou process selon le type de tâche (revêtement, soudure, calibrage. . .) et selon les pièces à réparer, la plupart du temps les pièces suivent un process selon le dommage et l'objectif de la maintenance. Les procédés de réparation sont à la pointe de la technologie.

1.4.2 Field service

Avec plus de 150 experts hautement qualifiés et expérimentés, BHGE Field Service fournit des compétences sur site qualifiées et engagées pour tous les types de maintenance, que ce soit pour les turbines à gaz, les turbines à vapeur et les générateurs, elle propose des solutions innovantes de service sur terrain. BHGE Field Service est réactif et fournit une assistance sur site fiable qui peut aboutir sur des partenariats solides à long terme et aider à protéger les actifs pendant toute la durée de vie de l'usine.

ALGESCO offre une garantie de sa maintenance d'un an ou 8000 heures de bon fonctionnement sur les turbines à gaz.

Chapitre 2 : LES TURBINES A GAZ

2.1 Généralités sur les turbines à gaz

Lorsque le générateur de turbine à gaz a été introduit dans le secteur de la production d'énergie à la fin des années 1940, il s'agissait d'une centrale révolutionnaire autonome alimentée par des combustibles fossiles. Vingt ans plus tard, les turbines à gaz constituaient un moyen important de faire face aux charges de pointe croissantes des systèmes de services publics. Au début des années 90, les turbines à gaz de divers cycles d'application constituaient une part importante des nouveaux ajouts à la production d'énergie dans le monde. En moins de 50 ans, ce qui était à l'origine une technologie de moteur à réaction s'est transformé en une solution de haute technologie essentielle pour répondre à de nombreux besoins en matière de production d'énergie [9].

2.1.1 Définition

D'après le dictionnaire Larousse, la turbine est définie comme étant une : « Turbomachine dans laquelle l'énergie d'un fluide moteur (eau, vapeur, gaz, etc.) fait tourner une roue mobile sur laquelle on recueille un travail » [10].

Ce sont des machines tournantes thermodynamiques appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique (rotation d'un arbre) à partir de l'énergie contenue dans un hydrocarbure (fuel, gaz...). Elles sont utilisées, d'une part, pour la cogénération et la production d'électricité, d'autre part, pour la compression de gaz sur les réseaux de grand transport [11].

2.1.2 Composantes d'une turbine à gaz

La turbine à gaz est composée des éléments suivants :

- Un compresseur axial : la fonction principale du compresseur est de comprimer l'air atmosphérique à une pression plus élevée.
- Chambres de combustion : l'air comprimé provenant du compresseur est mélangé au carburant et le mélange s'enflamme. Le produit de cette combustion est une veine de gaz chaude à haute pression.
- La roue de turbine : les gaz chauds entraînent d'une part le compresseur de la turbine et d'autre part la charge.

La figure 2-1 illustre les composantes d'une turbine à gaz.

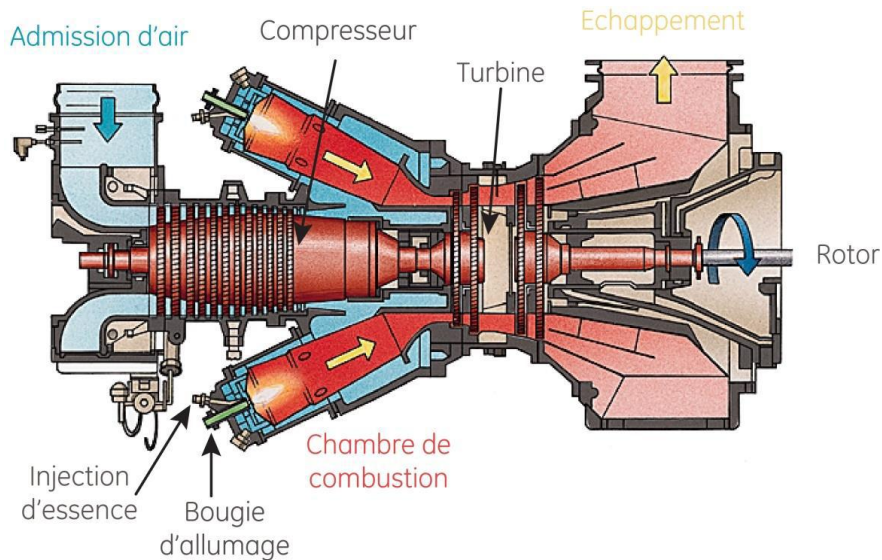


Fig. 2-1 Composantes d'une turbine à gaz [5].

2.1.3 Fonctionnement

L'air atmosphérique est aspiré par le compresseur axial. Cet air est comprimé puis refoulé dans la chambre de combustion où est introduit le combustible ; le mélange désiré (air comprimé et gaz sous pression) est obtenu. Une étincelle fournie par une bougie provoque la combustion. La chaleur produite dans la chambre de combustion et l'énergie dégagée par le produit de la combustion sont dirigées vers la première roue de la turbine où cette énergie thermique se transforme en énergie mécanique. Une partie de la puissance développée par la turbine sert à l'entraînement du compresseur axial (après son désaccouplement du moteur ou turbine de lancement). L'autre partie de la puissance développée est convertie en énergie utilisable, c'est-à-dire servant à entraîner la machine réceptrice [12]. La figure 2-2 présente un schéma d'une turbine à gaz.

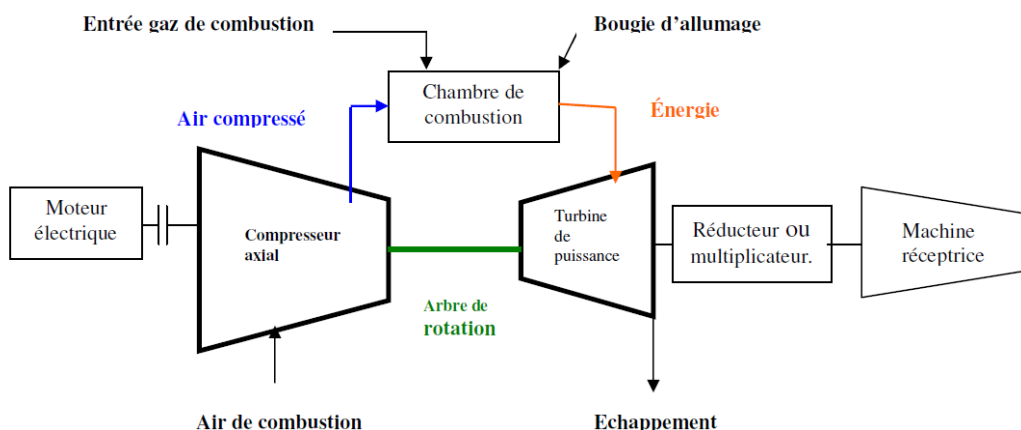


Fig. 2-2 Schéma d'un groupe d'une turbine à gaz [12].

2.1.4 Applications industrielles des turbines à gaz

- Dans les stations de compression pour une activité de production :

Une station de compression est une unité où une série de compresseurs aspire le fluide à une pression assez basse et rejette ce fluide à une pression nettement plus élevée ; afin de pouvoir soutirer le maximum de gaz ou de pétrole d'un gisement par injection de gaz ou d'eau comprimé ; ou d'un puits en irruption par injection de gaz lift ¹ pour faire sortir le maximum de gaz ou de pétrole. Pour ce faire, on fait passer le gaz ou le liquide à injecter à travers plusieurs étages de compression qui le compriment petit à petit jusqu'à la pression désirée. C'est ainsi qu'au bout de la chaîne de compression, on peut avoir jusqu'à 500 bars [13].

- Dans les stations de compression relais pour une activité transport gaz par canalisation :

Pour une activité de transport du gaz par canalisation, des compresseurs des stations de compression relais sont entraînés par des turbines à gaz pour faire progresser les gaz dans les gazoducs [13].

- Dans les stations de pompage relais :

Une station de pompage relais a pour rôle de re-comprimer le pétrole pendant son écoulement dans le gazoduc pour compenser la perte de charge le long des milliers de kilomètres qu'il parcourt. La puissance des compresseurs mis en place dépend de la configuration du terrain, accidenté ou non, de la distance entre les deux stations relais et aussi selon la densité et la viscosité du brut. D'une manière générale, la pression résiduelle à l'entrée du compresseur ne doit pas être inférieure à la capacité d'aspiration de celui-ci. Comme très souvent un oléoduc ² traverse des régions désertiques, caniculaires ou froides, tout cet ensemble est régulé à distance par ordinateur et de manière automatique [13].

- Dans une centrale électrique pour la production de l'énergie électrique

Les turbines à gaz sont utilisées dans les centrales électriques couplées à des alternateurs pour produire de l'énergie électrique [13].

2.1.5 Types de turbines

« GE Energy » fabrique une gamme complète de turbines à gaz pour toutes les principales applications de l'industrie du pétrole et du gaz. Elles sont installées dans les usines de gaz naturel, les stations de compression de gaz, les stations de pompage de pétrole, les usines pétrochimiques et les installations de production d'énergie et de cogénération dans le monde entier. Les modèles de base produits par GE Energy couvrent la plage de puissance allant de 5000 à 124 000 kW. Ils peuvent être fournis en cycles simples ou régénératifs pour des applications à entraînement mécanique ou à entraînement de générateur. Les principaux modèles de turbines proposées par GE sont décrits ci-après [14].

- **Turbines à gaz GE5**

La nouvelle GE5 est une turbine à gaz industrielle compacte à la pointe de la technologie de 6 MW. L'unité a été développée en deux configurations : un arbre simple d'entraînement à extrémité froide pour la génération de puissance et un arbre double d'entraînement à tête chaude pour les applications d'entraînement mécanique. Le moteur à deux arbres est obtenu en retirant simplement la turbine du deuxième étage de l'unité à un seul arbre et en ajoutant une turbine de puissance à deux étages.

- **Turbines à gaz GE10**

La GE10 est une turbine à gaz à usage intensif de la gamme 12 MW, disponible en version à un ou deux arbres. Le générateur de gaz comprend un compresseur à flux axial à rendement élevé et à 11 étages, ainsi qu'une chambre de combustion unique capable de brûler une grande variété de combustibles.

- **Turbines à gaz MS5001**

La turbine à arbre unique MS5001 est un moteur primaire robuste et compact conçu pour une longue durée de vie et une facilité d'utilisation et de maintenance. Les faibles coûts d'exploitation et d'investissement font de la centrale MS5001 un système économiquement attrayant pour la génération de charges.

- **Turbines à gaz MS5002C-D**

La MS5002 est une turbine à gaz spécialement conçue pour les applications d'entraînement mécanique telles que l'alimentation en gaz, l'injection / réinjection de gaz, les oléoducs et gazoducs, les installations de GNL et le stockage de gaz.

- **Turbines à gaz MS5002E**

Le MS5002E, le dernier-né de la famille des turbines à gaz GE Energy, est une machine de la classe 32 MW conçue pour un rendement élevé, un faible impact sur l'environnement et une grande fiabilité. Le MS5002E offre des niveaux d'émission de NOx allant jusqu'à 25 ppm grâce à l'utilisation d'un système de combustion sec / faible émission dérivé de la technologie de combustion GE Ennergy DLN2.

- **Turbines à gaz aérodérivées PGT16**

La turbine à gaz PGT16 se compose d'un générateur de gaz à double corps aérodérié LM1600 et d'une turbine de puissance industrielle robuste conçue par les activités GE Energy- Oil & Gas. Le générateur de gaz LM1600 est dérivé du moteur d'avion à double flux F404.

- **Turbines à gaz aérodérivés PGT25 +**

La turbine à gaz PGT25 + a été développée pour un service d'alimentation sur arbre ISO de 30 MW avec le rendement thermique le plus élevé (environ 40%). La turbine à gaz PGT25 + se compose du générateur de gaz GE Aeroderivé LM2500 +, couplé à une turbine de puissance à 2 étages d'une vitesse de 6100 tr / min.

- **Turbines à gaz aérodérivées LM6000**

La LM6000 est une turbine à gaz haute performance à deux arbres et à cycle simple. Offrant plus de 44,8 MW avec un rendement thermique supérieur à 42,7%, la puissante LM6000 est la turbine à gaz à cycle simple la plus économique en carburant au monde.

- **Turbines à gaz aérodérivées PGT25**

La turbine à gaz PGT25 comprend un générateur de gaz aérodérivé LM2500 associé à une turbine de puissance industrielle robuste conçue par GE Energy.

Comme c'est ce type de turbine qui a fait l'objet de notre étude, nous allons la décrire en détails dans le paragraphe suivant.

2.2 Turbine à gaz PGT 25

La turbine à gaz PGT25 combine le rendement élevé de la technologie des moteurs d'avions aux caractéristiques robustes des turbines à gaz industrielles à usage intensif. La machine se compose d'un générateur à gaz aérodérivé LM2500 et de deux étages de turbine de puissance à usage intensif. Avec une efficacité thermique à cycle simple allant de 32 à 37%, la turbine à gaz PGT25 offre l'un des meilleurs niveaux de performance dans la plage de puissance de 17 000 à 32 000 cv* [5].

La vitesse de l'arbre de sortie, 6 500 tr / min, est idéale pour un accouplement direct dans les applications d'entraînement mécanique [5].

Les huit premiers groupes turbo PGT25 équipés de compresseurs centrifuges de pipeline PCL600 ont été installés dans des stations de surpression le long du pipeline Transméditerranéen en 1983. Depuis cette introduction, le PGT25 a été doté de nombreuses améliorations techniques axées sur la puissance, l'efficacité et les niveaux d'émission [5].

Les composants de la turbine de puissance PGT25 ont été conçus pour tirer parti de toute l'expérience acquise dans le domaine des turbines à gaz à usage intensif et des compresseurs axiaux / centrifuges. La simplicité de conception et la haute qualité des matériaux entraînent de longs intervalles entre les révisions et des coûts de maintenance réduits [5].

L'objectif principal de la conception aérodynamique de l'aube était d'obtenir une turbine à très haut rendement, à la fois au point de conception et à des vitesses réduites.

La vitesse de conception de 6 500 tr / min permet l'utilisation de deux étages de turbine avec une charge aérodynamique modérée et un rendement de détente élevé. Les mêmes superalliages de moulage de précision utilisés dans les turbines à gaz à usage intensif ont été sélectionnés pour l'assemblage de turbine PGT25 ; c'est-à-dire une base de cobalt pour les injecteurs et une base de nickel pour les aubes de rotor [5].

La turbine est composée des parties suivantes :

- **Générateur de gaz :**

GE Oil & Gas a choisi le générateur de gaz LM2500, éprouvé et hautement fiable, pour entraîner la turbine de puissance PGT25. Ce générateur a accumulé des millions d'heures de fonctionnement en tant que moteur d'avion (moteurs d'avion TF39 et CF6-6) et de propulsion de navire. Il compte également environ 30 millions d'heures de fonctionnement dans les applications industrielles, y compris les gazoducs, la réinjection de gaz à haute pression, les applications de production d'électricité, y compris la plate-forme offshore et la puissance FPSO (production flottante, stockage et déchargement) et d'autres applications d'entraînement mécanique.

Le générateur de gaz LM2500 comprend un compresseur à flux axial à 16 étages. Les aubes d'entrée de guidage et les aubes de stator variables sur les six premiers étages du compresseur assurent un fonctionnement efficace sur toute la plage de fonctionnement. La répartition uniforme de la température dans la turbine haute pression à deux étages entraînant le compresseur axial est fourni par une chambre de combustion annulaire. Toutes les aubes et les buses de la turbine sont refroidies à l'air et revêtues afin d'améliorer la résistance à l'érosion, à la corrosion et à l'oxydation. Un entraînement de boîte de vitesse accessoire est également fourni [5].

- **Turbine de puissance :**

Le rotor à deux étages est suspendu sur l'arbre et supporté par deux paliers inclinés logés dans un logement cylindrique. Le système peut être facilement démonté avec un simple déplacement du générateur de gaz dans les limites de l'ensemble, réduisant ainsi le temps requis pour une révision majeure de la turbine de puissance à quelques jours [5].

- **Système de combustion :**

Les émissions de NO_x et de CO du PGT25 peuvent être réduites afin de répondre aux exigences du projet en utilisant l'injection d'eau ou de vapeur ou le matériel du système de combustion DLE. Le niveau d'émission de NO_x pour le générateur de gaz PGT25 peut être garanti à partir de 25 ppm pour le gaz naturel. Pour le DLE, une chambre de combustion prémélangée a été choisie pour obtenir un mélange uniforme du carburant et de l'air. Ce mélange préalable produit un mélange à valeur calorifique réduite qui brûle à des températures de flamme inférieures requises pour atteindre de faibles niveaux d'émissions des NO_x.

L'augmentation du volume du dôme de la chambre de combustion est utilisée pour augmenter le temps de séjour afin d'obtenir une réaction complète du CO et des imbrulés. Afin de réduire les émissions dans toute la plage de fonctionnement, le débit de carburant est régulé par l'utilisation de 3 anneaux de prémélangeurs de carburant contrôlés indépendamment.

La PGT25 peut brûler des combustibles gazeux avec des valeurs de chauffage aussi basses que 6 500 Btu / lb (15 120 kJ / kg). Les 30 prémélangeurs ou injecteurs de carburant peuvent être remplacés sur le terrain [5].

2.3 Maintenance des turbines à gaz

Les normes NF X 60-010 et 60 011 définissent la maintenance comme l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. La fonction maintenance est un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion [15].

Les pièces de turbines à gaz qui requièrent la plus grande attention sont celles associées au processus de combustion, ainsi que celles exposées aux gaz chauds dégagés par le système de combustion. Celles-ci sont appelées parties de la section de combustion et du circuit de gaz chaud. Elles comprennent les chemises de combustion, les capuchons d'extrémité, les ensembles de buses de combustible, les tubes à flammes croisées, les pièces de transition, les buses de turbine, les carénages fixes de turbine et les seaux de turbine. La durée de vie du rotor du compresseur, du rotor de la turbine, des carters et du diffuseur d'échappement est un autre domaine à long terme à prendre en compte et à planifier. La conception de base et la maintenance recommandée des turbines à gaz sont orientées vers :

- Périodes de fonctionnement maximales entre les inspections et révisions
- Inspection et maintenance sur place et sur site
- Recours aux compétences locales pour désassembler, inspecter et réassembler les composants des turbines à gaz.

Outre la maintenance de la turbine à gaz de base, les autres auxiliaires de la station nécessitent un entretien périodique, notamment les dispositifs de commande, les doseurs de carburant et les auxiliaires de turbines à gaz.

L'entretien principal implique cinq systèmes de base : Commandes et accessoires, combustion, turbine, génératrice et balance des installations. Les commandes et accessoires sont généralement réparés lors de pannes de courte durée, tandis que les quatre autres systèmes sont maintenus pendant des pannes moins fréquentes et de plus longue durée [16].

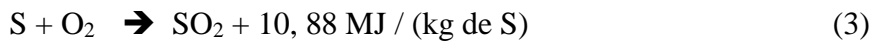
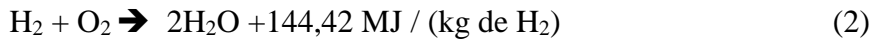
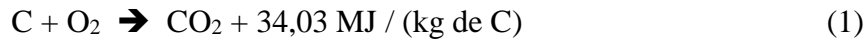
2.4 Système de combustion

2.4.1 Généralités sur la combustion

La combustion est un processus exothermique rapide qui fournit des produits à haute température.

Dans un processus de combustion typique, les réactifs, combustible + air, subissent un processus d'oxydation générant des produits de combustion, généralement de l'eau, des oxydes et dioxydes de carbone, des oxydes d'azote, etc. ... Pendant le processus de

combustion, la chaleur est libérée, la température des produits est donc supérieure à celle des réactifs. On trouvera ci-après certaines réactions typiques du processus de combustion :



Une réaction de combustion générale peut s'écrire comme suit :



Aucun feu ne peut exister sans que tous les éléments soient en place. Une fois allumé, une réaction en chaîne se produit et le feu est auto-entretenu : en fait, l'énergie nécessaire au processus provient de la chaleur dégagée par le processus de combustion lui-même. S'il y a un apport continu d'oxydant et de carburant, le feu se propage.

Un feu se déclenche lorsqu'un matériau inflammable et / ou combustible contenant suffisamment d'oxygène ou d'un autre oxydant est soumis à une chaleur suffisante et est capable de supporter une réaction en chaîne. Ceci est communément appelé le tétraèdre du feu.

Le feu peut s'éteindre en supprimant l'un des éléments du tétraèdre. Extinction du feu par exemple si de l'eau est ajoutée, car l'eau élimine la chaleur du feu plus rapidement que la combustion ne la génère.

2.4.2 Paramètres de gaz et de carburant liquide

Les combustibles liquides et gazeux sont caractérisés par différents paramètres.

Combustibles gazeux :

- Composition
- Pouvoir calorifique inférieur
- Densité
- Contaminants
- Indice de Wobbe
- Limites d'inflammabilité
- Température du point de rosée
- La température d'auto-inflammation

Combustibles liquides :

- Viscosité cinématique
- Densité
- Pouvoir calorifique inférieur
- Propriétés physiques
- Clarté
- Pression et température

2.4.3 Pouvoir calorifique du combustible

La valeur calorifique ou le pouvoir calorifique d'une substance est la quantité de chaleur dégagée lors de la combustion d'une quantité spécifiée de celle-ci.

La valeur calorifique est une caractéristique de chaque substance. Elle est mesurée en unités d'énergie par unité de substance, généralement en masse, telles que : kcal / kg, MJ / kg.

Deux puissances calorifiques différentes peuvent être définies :

Puissance calorifique supérieure (PCS) ou valeur calorifique brute ou énergie brute ou valeur calorifique supérieure : C'est la chaleur totale contenue dans les produits de combustion. C'est la quantité d'énergie disponible de sa combustion complète.

Puissance calorifique inférieure (PCI) (ou valeur calorifique nette) : c'est le PCS moins la chaleur de vaporisation de la vapeur d'eau résultant de la combustion. Ceci prend en compte H₂O formé et transformé en vapeur ; l'énergie nécessaire pour vaporiser l'eau n'est donc pas disponible en chaleur à la fin du processus de combustion.

- **Valeurs calorifiques inférieures des combustibles courants**

PCI est la valeur qui définit la quantité de chaleur dégagée par une quantité fixe de combustible lorsqu'il est complètement brûlé dans des conditions de pression et de température standard et en supposant que la vapeur d'eau formée ne soit pas condensée à l'état liquide. Le tableau 2-1 résume les PCI de combustibles gazeux courants.

Tab. 2-1 PCI des combustibles gazeux courants

	M (g/mol)	PCI kcal/kg	PCI MJ/kg
Méthane CH ₄	16	11953	50.0
Ethane C ₂ H ₆	30	11350	47.5
Propane C ₃ H ₈	44	11079	46.4
n-butane C ₄ H ₁₀	58	10932	45.8
n-pentane C ₅ H ₁₂	72	10840	45.4
Ethylène C ₂ H ₄	28	11272	47.2
benzène (gaz) C ₆ H ₆	78	9698	40.6
Hydrogène H ₂	2	28670	120.0

- **Valeur calorifique de mélange d'hydrocarbures**

Les carburants sont souvent un mélange d'hydrocarbures et de gaz inertes différents, tels que N₂, CO₂, H₂O. La valeur calorifique inférieure du mélange est la moyenne pondérée en masse des méga-poids lourds des différents composants. Notez que le PCI d'un inerte est égal à zéro, ce qui diminue donc le PCI moyen du mélange.

$$PCI_{\text{mélange}} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \cdot PCI_i}{m(\text{mélange})} \quad m : \text{fraction massique} \quad (5)$$

2.4.4 Chaînes d'inflammabilité

La combustion se produit si le carburant et l'air sont mélangés dans les proportions appropriées. Si la teneur en carburant est trop élevée (mélange riche en excès) ou trop faible (mélange maigre en excès), la combustion ne se produira pas. Les limites d'inflammabilité supérieure et inférieure (LS et LI respectivement) définissent la plage d'opérabilité d'un carburant donné.

Un mélange de différents gaz combustibles peut avoir une plage d'inflammabilité plus large.

2.4.5 Point de rosée des hydrocarbures

La température de point de rosée est la température (à une pression donnée) à laquelle les composants du gaz combustible vont commencer à se condenser hors de la phase gazeuse. Une fois le point de rosée atteint, la condensation se forme dans la chambre de combustion. Finalement, les gouttes de carburant dans la chambre de combustion peuvent atteindre une masse critique et finalement écraser la chemise. Plus la concentration en hydrocarbures lourds est élevée, plus la température du point de rosée est élevée, plus le risque de condensation dans la chambre de combustion est élevé.

2.4.6 Indice de WOBBE

Est un indicateur de l'interchangeabilité du carburant dans une turbine à gaz. Les chambres de combustion peuvent être conçues pour des gaz combustibles ayant des valeurs calorifiques très différentes, mais un système d'alimentation spécifique peut fonctionner correctement avec des combustibles dont le PCI est compris dans sa plage de conception. Une fois qu'il est nécessaire de brûler un combustible différent du combustible de conception, l'WI doit être calculé. Si la variation d'IW est inférieure à 5%, le matériel convient toujours pour le nouveau combustible, sinon le brûleur doit être repensé.

$$IW = \frac{PCI(\text{vol})}{\sqrt{\frac{\mu(\text{carburant})}{\mu(\text{air})}}} \quad (6)$$

PCI : Pouvoir calorifique inférieur [kJ / Nm³]

μ : poids moléculaire [kg / kmol]

L'indice de WOBBE est généralement exprimé en mégajoules par mètre cube standard.

2.4.7 Flamme

La flamme est la région qui sépare les réactifs des produits et où la température la plus élevée est atteinte dans la région de combustion.

La flamme pré-mélangée : est une flamme où le carburant et l'oxydant sont mélangés au niveau moléculaire avant la réaction chimique. Elle se produit en aval du pré-mélange :

Laminaire : dans le Bec Bunsen

Turbulent : dans un moteur à allumage commandé

Pour les systèmes de combustion à turbine à gaz DLN / DLE

La flamme de diffusion : est une flamme où les réactifs sont initialement séparés et la réaction ne se produit qu'à l'interface entre le combustible et l'oxydant, où le mélange et la réaction ont lieu. L'air et le carburant se diffusent ensemble aux limites :

Turbulent : dans les fours

Laminaire : dans la bougie

Pour les systèmes de combustion à turbine à gaz standard

3.2.1.1 Flamme de diffusion et flamme prémélangée

La figure 2-3 représente l'évolution de la température de la flamme de diffusion, et la flamme prémélangée.

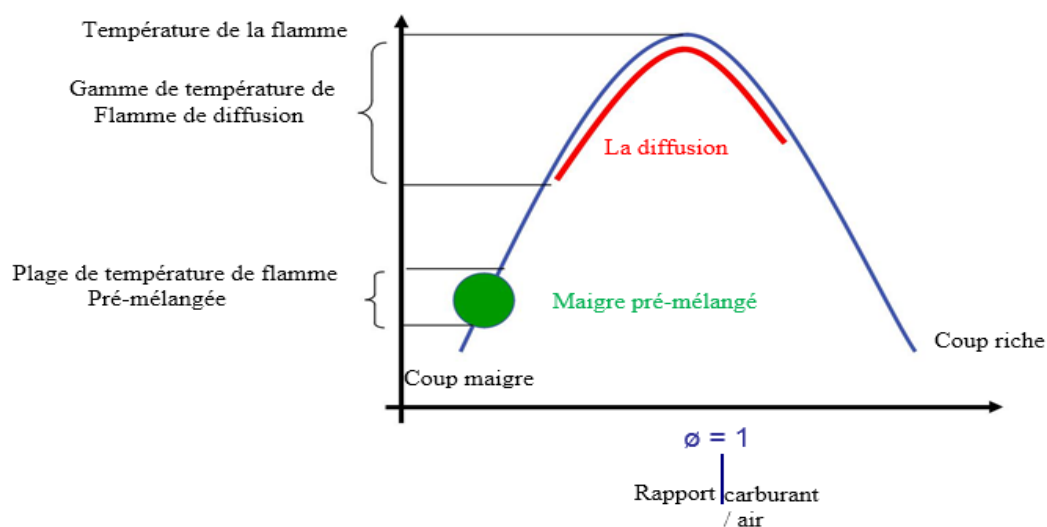


Fig. 2-3 Evolution de température des flammes de diffusion et prémélangée [5].

Pré-mélange :

- Fenêtre d'exploitation très étroite
- Peut atteindre de très faibles émissions de NOx
- Les faibles émissions de CO peuvent être difficiles

La diffusion :

- Flamme très robuste et stable
- Émissions élevées de NOx
- Faibles émissions de CO

3.2.1.2 Flamme prémélangée

La flamme prémélangée est caractérisée par les paramètres suivants :

- rapport carburant / air

- Températures initiales du carburant et de l'air
- Température finale des produits de combustion

Le rapport carburant / air stœchiométrique c'est le rapport carburant /air tel qu'aucun oxyde ne reste dans les produits de combustion lorsque tout le carburant est brûlé.



Température de la flamme : La température de la flamme est fonction du rapport d'équivalence et de la température initiale des réactifs.

La perte de chaleur vers l'environnement extérieur et les processus de décomposition diminuent la température réelle de la flamme.

2.4.8 Emission de polluants

La figure 2-4 indique les émissions d'une turbine à gaz.

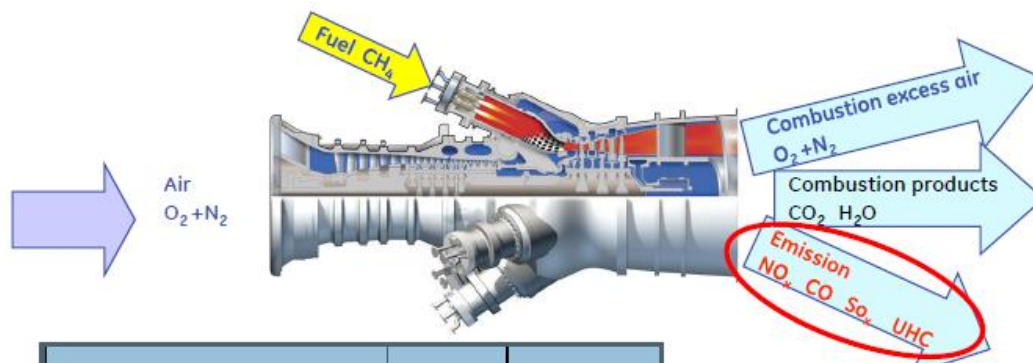


Fig. 2-4 Schéma illustrant les émissions d'une turbine à gaz [5].

Oxydes d'azote ou «NOx» : Produit toxique du processus de combustion (réaction rapide, températures élevées).

CO - Monoxyde de carbone : Produit toxique du processus de combustion en raison d'une combustion incomplète

UHC - Hydrocarbures non brûlés : Produit toxique du processus de combustion en raison d'une combustion incomplète, d'une mauvaise atomisation, d'une vitesse de combustion insuffisante et des effets de refroidissement de l'air de refroidissement par film.

La législation sur la protection de l'environnement est principalement axée sur les valeurs-limites des NO_x et du CO.

**Chapitre 3 : COMBUSTION ET POLLUTION
ATMOSPHERIQUE**

3.1 Généralités sur la pollution atmosphérique

3.1.1 Gaz composants de l'atmosphère

Le tableau 3-1 représente une liste des principaux composants atmosphériques gazeux et leur évolution.

Tab. 3-1 Composition chimique de l'atmosphère [17]

Nom	Formule	Proportion
Dioxyde d'azote	NO ₂	0,02 ppmv
Dioxyde de carbone	CO ₂	0,04 % mol (400 ppmv)
Xénon	Xe	0,087 ppmv
Dihydrogène	H ₂	0,5 ppmv
Protoxyde d'azote	N ₂ O	0,5 ppmv
Argon	Ar	0,934 % mol
Ozone	O ₃	0–0,01 ppmv
Krypton	Kr	1,14 ppmv
Méthane	CH ₄	1,7 ppmv
Néon	Ne	18,18 ppmv
Dioxygène	O ₂	20,95 % mol
Hélium	He	5,24 ppmv
Monoxyde d'azote	NO	5 ppmv
Radon	Rn	6,0×10 ⁻¹⁴ ppmv
Diazote	N ₂	78,08 % mol

L'oxygène est nécessaire à la vie aérobie, mais devient dangereux à des teneurs excessives.

Le gaz carbonique, lui aussi, est indispensable à la vie des végétaux, mais c'est un gaz à effet de serre dont la teneur atmosphérique est en nette augmentation. [18]

La vapeur d'eau est nécessaire à la vie avec à des concentrations limitées. Au-delà de sa tension de vapeur saturante, elle se condense et donne naissance aux nuages [19]

Dans la troposphère, l'ozone peut, en présence de forte pollution par les précurseurs NO_x et COV, atteindre des teneurs élevées très nocives.

A ces gaz s'ajoutent des poussières qui sont vecteurs de polluants chimiques, noyaux de condensation des vapeurs d'eau et absorbants de rayonnements solaires incidents.

3.1.2 Pollution atmosphérique

Par pollution de l'air, on entend la contamination de l'environnement intérieur ou extérieur par un agent chimique, physique ou biologique qui modifie les caractéristiques naturelles de l'atmosphère. Les polluants les plus nocifs pour la santé publique sont notamment les matières particulaires, le monoxyde de carbone, l'ozone, le dioxyde d'azote et le dioxyde de soufre. La pollution de l'air à l'extérieur comme à l'intérieur entraîne entre autres des maladies respiratoires qui peuvent être mortelles [20].

La pollution atmosphérique peut donc être d'origine naturelle ou artificielle. Ces substances peuvent être sous forme de gaz, particules solides, gouttelettes liquides ou un mélange de ces trois états.

On distingue deux classes de polluants :

- **Polluants primaires** : qui sont émis directement par une source de pollution bien définie. C'est le cas par exemple des composés carbonés, composés soufrés, composés métalliques, composés azotés, les composés organiques volatils, irritants ou odorants et les poussières, particules fines et particules grossières [21].
- **Polluants secondaires** : Ce sont des produits des réactions entre différents polluants primaires ou entre les polluants et les constituants de l'atmosphère, avec ou sans radiations solaires.

La vapeur d'eau résultant des combustions n'est pas considérée comme polluant, puisqu'elle représente un constituant majoritaire de la terre [21].

3.2 Combustion et pollution atmosphérique

3.2.1 Généralités sur les combustibles fossiles

Le pétrole et le gaz naturel sont des matières qui se sont formées il y a environ un million d'années à partir d'organismes marins très anciens qui se sont fossilisés. Au fil du temps, la croûte terrestre s'est formée à partir de l'accumulation des couches sédimentaires enterrant ainsi ces organismes fossilisés qui se transforment par la suite en énergie.

L'origine biologique des combustibles fossiles se manifeste par les caractéristiques de molécules biologiques qu'elle présente : chaînes hydrocarbonées, en premier lieu, mais également, dans des proportions moindres, le soufre, l'azote et d'autres minéraux naturellement présents en traces dans tous les organismes vivants.

Le carbone et l'hydrogène sont les éléments principaux dans la production d'énergie thermique. Le soufre et l'azote sont considérés comme contaminants pour les combustibles. C'est le cas également des métaux présents principalement sur la croûte terrestre, et qui se sont mélangés, par la suite, à la matière organique pour se retrouver sous forme d'oxydes de

métaux. Ces oxydes forment des cendres après la combustion de cette matière fossile.

Les principales caractéristiques physiques et chimiques des combustibles fossiles sont :

- La nature physique (gaz, liquide, solide), qui conditionne la facilité d’exploitation, de transport, et de distribution du combustible.
- La viscosité des combustibles liquides qui influe sur leur manutention ainsi que leur volatilisation au moment de l’injection dans le moteur thermique.
- La densité énergétique, massique ou volumique
- Le rapport moyen entre le nombre d’atomes d’hydrogène et de carbone (H/C), ceci affecte la densité énergétique et la fluidité du combustible [21].

Le tableau 3-2 résume les différents combustibles et leurs principales caractéristiques.

Tab. 3-2 Caractéristiques de combustibles fossiles et synthétiques [21].

Combustible	Composition	Etat physique	H/C	MJ /kg
Gaz naturel	70 à 100 % de méthane : CH ₄	<u>GAZ</u> : ébull. -163°C	4 (CH ₄)	55 (1 kg = 1400 L)
Combustibles dérivés du pétrole Essence Kérosène Fuel léger Fuel lourd	Nombre d’atomes de C dans molécules 5 à 12 10 à 16 15 à 22 19 à 35	<u>LIQUIDES</u> point. d’ébull. (°C) 0 – 204 180 – 270 260 – 370 > 340	Env. 2	Env. 44 (1 kg = 1,3 L)
Charbons Lignite Ch. gras Ch. maigres Anthracite	Teneurs en cendres très variables	<u>SOLIDES</u> 5 à 30 % de matières volatiles	Env. 0,8	20 30
Biomasse		Solide		14
Hydrogène	à synthétiser !	<u>GAZ</u> : ébull : -250°C	/	124 (1 kg = 11200L)
Méthanol	à synthétiser !	<u>LIQUIDE</u>	4	21

Plus le rapport H/C augmente, plus la fluidité et l’énergie massique augmente et plus le facteur d’émission du CO₂ diminue. Il est donc moins coûteux de transporter, distribuer et manipuler les combustibles fluides que les combustibles solides.

Gaz naturel : Le gaz naturel est un produit naturel non toxique. Il se compose d’environ 90 % de méthane (CH₄) [22]. Combustible, incolore et inodore, il se forme également lors de fermentations anaérobies de substances biologiques.

Le gaz naturel n’a pas besoin d’être raffiné à sa sortie du gisement, il suffit seulement, s’il le faut, le sécher et éliminer ses impuretés.

Ceci fait du gaz naturel une énergie thermique idéale. Il ne subit pas de transformations génératrices de pertes relativement importantes. Il faut donc moins d’énergie primaire pour

obtenir une quantité donnée d'énergie utile avec le gaz naturel qu'avec d'autres combustibles. Le gaz naturel brûle presque intégralement, ce qui permet de tirer un parti optimal de son énergie [22]. Le rendement du gaz naturel en tant qu'énergie primaire ³ est donc supérieur à 90% [23].

Le gaz naturel peut aussi être liquéfié par refroidissement à -160°C , ce qui divise son volume par 600.

3.2.2 Polluants liés à la combustion

La réduction des émissions polluantes est l'un des axes de recherche les plus d'actualité en combustion. Dans le cas des turbines à gaz fonctionnant au gaz naturel, les émissions sont principalement concentrées sur trois types de polluants : les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et le dioxyde de soufre, nous négligerons l'effet de ce dernier du fait que le gaz naturel algérien ne contient pas ou peu de soufre. Nous allons décrire, dans un premier temps, l'effet, la production et l'impact de ces polluants. Nous expliquerons dans les chapitres suivants les avancements et les choix technologiques effectués par GE.

3.2.2.1 Oxyde d'azote

La famille des oxydes d'azotes contient de nombreuses espèces : N_2O , NO , N_2O_2 , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_4 et N_2O_5 . Parmi ces composés seuls 5 sont gazeux et sont donc susceptibles d'atteindre l'atmosphère : N_2O , NO , NO_2 , N_2O_4 et N_2O_2 [24].

Généralement, nous prenons en compte les NO et NO_2 seulement, que nous regroupons sous le terme NO_x .

Les NO_x sont produits naturellement, mais l'activité humaine est responsable de 70% des émissions. Dans cette production, 57% sont issus de la combustion [25].

➤ Effets des oxydes d'azote sur l'Homme et sur l'Environnement

1) Emissions annuelles

En Algérie, le secteur de l'énergie est responsable de 98% du total des émissions en NO_x . En effet, selon le Ministère chargé de l'environnement, il a été enregistré une quantité de 238Gg et 278,87Gg de NO_x en 1994 et 2000 respectivement pour le secteur d'énergie, et donc un taux de croissance de 17,5%, soit 2,7% par an (Figure 3-1, tableau 3-3) [26].

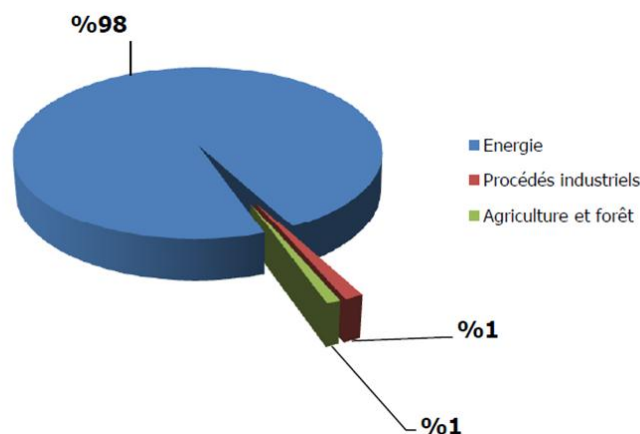


Fig3-1 Emissions d'oxyde d'azote par secteur d'activité (année 2000) [26].

Tab. 3-3 Evolution des pourcentages d'émissions de NO_x en Gg en Algérie par année et par secteur d'activité [27].

Type de gaz	Secteur d'activité	1994	2000	taux de croissance
	Total		1 579,27	
Azote (N₂O)	Energie	0,3	0,51	70
	Procédés industriels	1	0,95	-5
	Agriculture et forêt	28,87	8,68	-69,9
	Déchets	/	10,91	/
	Total	/	21,14	
Oxyde d'azote (NO_x)	Energie	238	278,87	17,2
	Procédés industriels	2	1,3	-35
	Agriculture et forêt	6	3,04	-49,3
	Déchets	0	0	

2) Toxicité sur l'Homme

- **Le monoxyde d'azote (NO)**

Bien que le processus de formation du monoxyde d'azote soit le plus étudié, sa toxicité reste mal identifiée du fait qu'il s'oxyde naturellement et à température ambiante en dioxyde d'azote dans l'atmosphère. Il est donc pas très évident d'estimer ses effets sur la santé. Cependant, son action a été caractérisée par une irritation des bronches et une réduction du pouvoir oxygénateur du sang [28].

- **Le dioxyde d'azote (NO₂) :**

Le dioxyde d'azote est un gaz de couleur brun-rouge quand il est concentré, et brun jaune à plus basse concentration [29]. A 5 ppm, il a une odeur piquante. C'est un gaz irritant à caractère fortement oxydant. Les effets indésirables directs sur l'Homme concernent essentiellement les fonctions respiratoires [30].

Le NO₂ est mortellement toxique (40 fois plus que le CO, 4 fois plus que le NO). Il pénètre profondément dans les poumons et est soluble dans l'eau. Les pics de concentrations sont plus nocifs qu'une même dose étalée sur une longue période [28].

Ces molécules pénètrent facilement les bronchioles, affectent la respiration et provoquent une hyperactivité des bronches chez les asthmatiques, ainsi qu'une vulnérabilité accrue des bronches aux microbes, au moins chez les enfants [31].

« Les symptômes immédiats peuvent se limiter à quelques troubles irritatifs : toux, picotements, larmoiements, irritation oculaire et pharyngée ... mais 2 à 36 heures plus tard, il risque de présenter des troubles graves signant œdème pulmonaire aigu : toux, cyanose, ... »

anxiété, sueurs froides, forte soif. La mort survient dans la plupart des cas en 24 à 48 heures. A signaler que les vapeurs nitreuses sont solubles dans l'eau » [32].

3) Effets sur l'Environnement

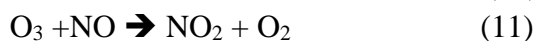
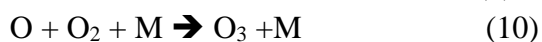
Les NO_x sont éliminés de la troposphère par oxydation en acide nitrique (HNO₃), en particulier par la réaction [33-35] : $\text{NO}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{HNO}_3$ (8)

Le temps de vie chimique des NO_x est typiquement de l'ordre de la journée. L'acide nitrique est ensuite éliminé de la troposphère soit par dépôt sec (directement sous la forme de gaz ou après transformation en aérosols) soit par les précipitations après dissolution dans les gouttelettes nuageuses [35, 36].

Les NO_x contribuent à la formation des pluies acides, ce qui a de lourdes conséquences sur les sols ainsi que sur les nappes phréatiques. Ces pluies acides augmentent la solubilité des métaux lourds ⁴ et sont tenues en partie responsables de la disparition de certaines espèces animales et l'appauvrissement des sols [37, 38].

Dans les cours d'eau les NO_x créent un risque d'eutrophisation en apportant l'azote.

De plus, ces gaz participent à la formation d'ozone troposphérique selon le cycle de Chapman :



M = troisième corps = molécule auxiliaire de collision [39].

➤ Formation des oxydes d'azote :

Afin de former le monoxyde d'azote (NO), l'azote se combine avec l'oxygène à plus ou moins haute température. Ces réactions dépendent de l'énergie de liaison de chacune des molécules qui pourraient constituer une source d'azote.

On a, par exemple, l'énergie de liaison dans la molécule N₂ est de 950 kJ/mol et est plus élevée que l'énergie de liaison de l'azote dans les molécules des huiles lourdes résiduelles (pétrole) ou le charbon qu'on appelle « azote du combustible » (ou « fuel-N »).

En effet, les valeurs approximatives des liaisons C≡N et C=N sont 770 et 615 kJ/mol respectivement, les liaisons C-N et H-N sont encore plus faibles (260 à 460 kJ/mol) [40].

Nous distinguerons donc deux groupes de réactifs azotés :

- Le N₂ de l'atmosphère,
- Les espèces azotées du combustible (fuel-N) [41].

a) Formation de NO_x dans la chambre de combustion

Le milieu réactionnel, qui est la chambre de combustion, est un réacteur constitué d'une zone de formation des NO_x (zone primaire), d'une zone secondaire et d'une zone de dilution. La

formation des NOx se déroule essentiellement à haute température, elle se passe donc dans la zone primaire qui est la zone de combustion.

Dans la flamme, on distingue deux zones : la zone de front de flamme (présence de radicaux hydrocarbonés CX, X atome ou groupe d'atomes différent de N) et la zone des produits de combustion [41].

La figure 3-3 relate les mécanismes courants de formation du NO.

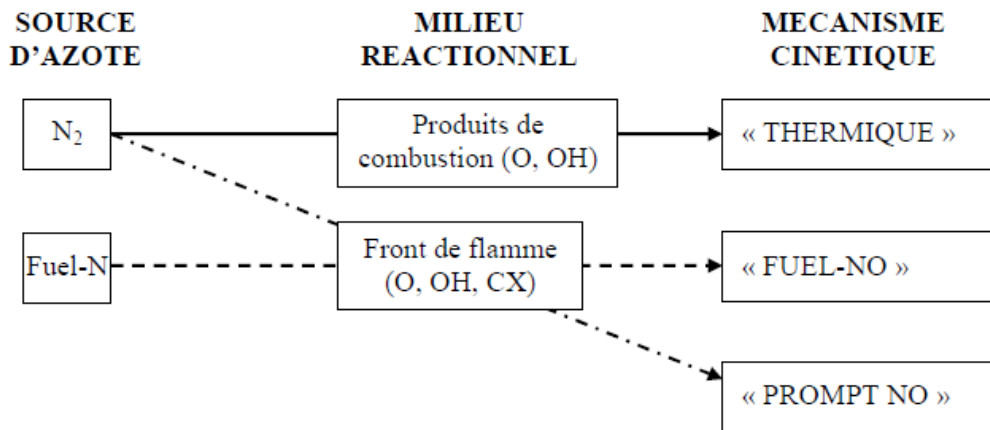


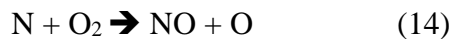
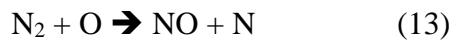
Fig. 3-2 Définition des trois mécanismes de formation de NO [40].

b) Le NO « thermique »

Le mécanisme de formation du NO thermique a été décrit pour la première fois par Zeldovich en 1946. Une température élevée (supérieure à 1000°C) entraîne la dissociation des molécules d'O₂ selon :

$$O_2 \rightarrow 2 O \quad (12)$$

Les radicaux O résultants peuvent réagir avec l'azote de l'air pour former le NO :



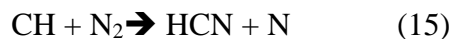
En 1970, Fenimore s'étonne qu'il soit impossible d'extrapoler les profils de concentrations du NO mesurées en fonction de la distance au brûleur jusqu'à une concentration zéro devant pourtant exister au niveau du brûleur. Il suppose alors que ce profil doit présenter une pente beaucoup plus raide près de la zone de combustion, qui doit correspondre à un mécanisme différent. C'est un nouveau type de NO qui est mis à jour. Il s'agit du NO précoce » [41].

En effet, il s'aperçoit que près du brûleur, dans une flamme où le combustible ne contient pas d'azote lié, il existe déjà du NO. En considérant les températures, la teneur en oxygène et le faible temps de séjour, ceci ne peut être ni le NO thermique (la combustion n'est pas assez avancée), ni le NO combustible (le combustible ne contient pas d'azote).

c) Le « NO précoce » (ou NO prompt)

Il résulte de la rupture de la triple liaison de l'azote de l'air, non pas par des radicaux O (voir équation N° 15), mais par des radicaux hydrocarbonés plus ou moins complexes de type C-H libérés par le combustible, notamment dans les zones riches en combustible.

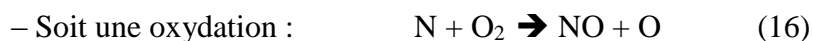
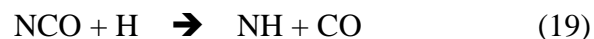
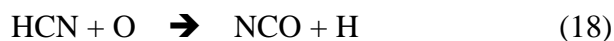
La Figure précédente indique que le NO précoce résulte de l'oxydation de l'azote de l'air par l'oxygène, qui est dissocié par les espèces CX dans la zone d'oxydation de flamme. Ainsi, nous retrouvons dans le front de flamme, formation de NO appelé « NO précoce » [40, 42]. Dans un premier temps, la molécule d'azote de l'air réagit avec certains radicaux C-H selon :



La deuxième étape se divise en deux parties :

✓ **des réactions sur le N :**

Les radicaux N formés subissent :

✓ **Des réactions sur le HCN :**

La cinétique globale de formation du NO prompt est rapide.

L'énergie d'activation de la réaction (15) est seulement de 92kJ/mol, comparée à 319 kJ/mol pour la formation du NO thermique [43]. Il en résulte que le NO précoce est aussi produit à basse température (environ 1000 K).

Le NO prompt ne représente donc qu'une faible proportion des NO émis.

d) Le NO « du combustible »

La source d'azote, ici, est la partie organique du combustible. Les teneurs en azote varient d'un combustible à un autre.

Les liaisons carbone-azote C-N ici sont beaucoup plus faibles que la triple liaison $\text{N}\equiv\text{N}$ responsable de la formation du NO thermique et NO prompt. A cet effet, le NO du combustible peut se former aussi bien à basse température qu'à haute température [44].

L'importance relative du NO du combustible par rapport au NO thermique est fonction du taux d'azote dans le combustible, de la température de combustion, et de la qualité du mélange réactionnel.

3.2.2.2 Monoxyde de carbone

Le CO résulte d'une combustion incomplète. C'est un gaz facilement mélangeable à l'air du fait de leurs proches valeurs de densités.

➤ Effets du monoxyde de carbone sur l'Homme et sur l'Environnement

1) Emissions annuelles

Le secteur de l'énergie est la principale source responsable des émissions du monoxyde de carbone en Algérie. En effet, le ministère chargé de l'environnement déclare que près de 90% de ces rejets proviennent du secteur de l'énergie (Figure 3-4) [27].

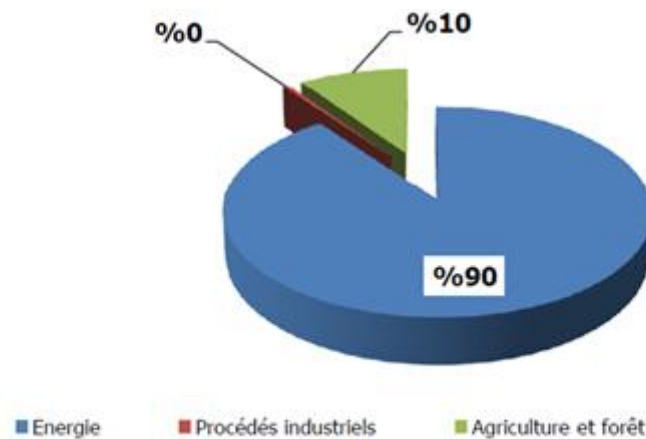


Fig.3-4 Répartition des émissions de CO par secteur d'activité [27].

1) Toxicité sur l'Homme

Chez l'être vivant, l'oxyde de carbone est absorbé par les poumons à travers les membranes alvéolo-capillaires. Il traverse les barrières méningée et placentaire.

Lorsque la concentration en CO est constante durant plusieurs heures, le taux d'absorption de ce dernier commence à diminuer jusqu'à arriver à un état d'équilibre entre la pression partielle de CO dans le sang capillaire pulmonaire et celle de l'alvéole.

Un taux de 80 à 90 % du CO absorbé est fixé sur l'hémoglobine, où l'affinité pour le CO est environ 200 fois supérieure à celle pour l'oxygène. La concentration en carboxyhémoglobine augmente rapidement dès le début de l'exposition, ralentit après 3 heures puis atteint un plateau stable à la fin d'une exposition de 8 heures.

Le CO intervient sur la dissociation oxygène-hémoglobine en diminuant la libération d'oxygène dans les tissus. Ses effets paraissent anodins dans un premier temps et se traduisent par une intoxication alimentaire ou une ébriété, puis ceci évolue vers des troubles neurologiques plus graves tels qu'un état de coma ou une convulsion. Ceci pourrait laisser des séquelles telles que le syndrome parkinsonien ou un infarctus [44].

2) Effets sur l'environnement

Il n'existe pas de rapports indiquant que des concentrations de CO couramment mesurées dans l'air ambiant des zones urbaines et industrielles aient des effets nuisibles sur les plantes

et microorganismes. Le monoxyde de carbone influence toutefois indirectement l'effet de serre car il influe sur le pouvoir d'oxydation de l'atmosphère terrestre. De ce fait, il contribue à augmenter les concentrations de méthane (CH₄) et d'oxydes nitreux (N₂O) [45, 46]

➤ Formation du CO

Le CO est le résultat d'une combustion incomplète et apparaît en même temps que les imbrûlés. Le minimum d'émission de CO est atteint à la stœchiométrie en prémélange parfait et il est maximal près de l'extinction pauvre ou riche. Il est donc très difficile d'obtenir la diminution des NO_x sans augmenter l'émission de CO (Figure 3-5)

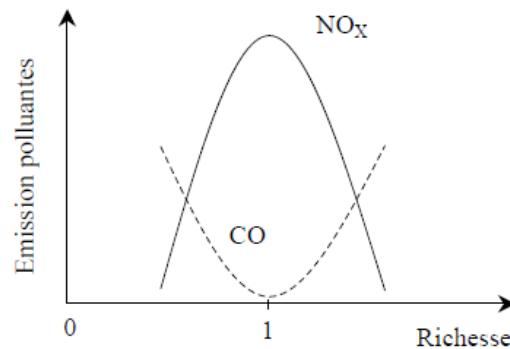
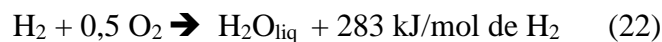


Fig. 3-3 Emissions de CO et de NOX en fonction de la richesse [46].

Afin d'éviter les combustions incomplètes, la quantité d'air doit être suffisamment en excès pour permettre une combustion totale. Une combustion qui se déroule au ralenti est toujours incomplète, il faut donc que l'appareil soit d'une puissance adaptée au volume de carburant.

3.2.2.3 La formation d'imbrûlés

Il est possible de produire une énergie thermique sans créer d'émissions polluantes, juste en faisant brûler de l'hydrogène en présence d'oxygène pur. On aura comme produit une vapeur d'eau qui peut même être condensée afin de récupérer les quelques calories qu'elle contient. Ceci serait une combustion idéale qui produit de l'énergie sans engendrer le moindre rejet, elle est illustrée comme suit [21] :



Cependant, malheureusement, la synthèse de l'hydrogène nécessite une très grande dépense d'énergie [21], ce qui nous mène donc à brûler des combustibles fossiles qui, on l'a vu, sont faits de chaînes hydrocarbonées diversifiées de par leur longueur, leurs molécules (alcane, alcène, aromatiques), et leurs caractéristiques.

Si l'hydrogène offre une chimie relativement simple, les hydrocarbures, eux, sont plus complexes et se caractérisent par la formation d'éléments intermédiaires entre l'hydrocarbure de départ et le dioxyde de carbone et l'eau produits dans le mélange. En effet, une petite perturbation de la combustion suffit pour produire de nombreuses substances intermédiaires

indésirables (aldéhydes, oléfines, monoxyde de carbone, suies,...) que l'on retrouve dans les fumées dégagées.

Pour des températures supérieures à 400°C, et s'il y a un déficit local en oxygène, les hydrocarbures commencent à se dégrader et perdre de l'hydrogène pour former des alcènes ou des alcynes. Ces molécules vont à leur tour donner naissance à des aromatiques qui vont se condenser en Hydrocarbures Aromatiques Polycondensés (HAP) puis donner de suies qui sont relativement stables et difficiles à détruire par oxydation. En termes de taille, la suie est un polluant du groupe des particules très fines PM-1 qui sont cancérigènes [48].

Les suies sont résultat d'une perte progressive d'hydrogène par les hydrocarbures. De ce fait, on peut déduire que les molécules dont le rapport H/C est le plus élevé sont celles qui produisent le moins de suies. C'est le cas du méthane CH₄.

Notons que les oléfines et les aldéhydes entrent dans la formation de la pollution photochimique, que le benzène et quelques HAP sont cancérigènes [21].

3.2.3 Dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone est un gaz incolore, inerte et non toxique. C'est l'un des principaux gaz à effet de serre, de plus le fait qu'il soit d'une durée de vie d'environ 100 ans, fait qu'il soit la principale préoccupation des chercheurs, en ce qui concerne les gaz à effet de serre [49, 50].

Le CO₂ résulte de la combustion de composés carbonés en présence d'oxygène. Naturellement, il peut provenir de plusieurs sources telles que les éruptions volcaniques, la respiration des vivants, décomposition des matières organiques, etc.

L'activité anthropique ces deux derniers siècles a conduit à l'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère de 30%, et 70 à 90% de ces émissions sont résultats de la combustion des énergies fossiles [49].

▪ Effet de serre

Naturellement, l'atmosphère, le sol et les océans absorbent deux tiers de l'énergie solaire. Ce qui reste de cette énergie est réfléchi vers l'atmosphère et la surface de la terre. Ces deux derniers émettent à leur tour des radiations infrarouge qui seront absorbées par les gaz à effet de serre puis réémis en grande partie vers le sol.

En effet, du fait que les gaz à effet de serre soient particulièrement transparents au rayonnement solaire mais opaques pour les rayons infrarouges, l'énergie est piégée, et il se crée un phénomène appelé « effet de serre » en analogie avec les serres de jardin.

C'est grâce à ce phénomène que la surface de la terre maintient une température moyenne relativement élevée qui est d'environ 15°C au lieu de -18°C dans le cas où il n'y aurait pas d'effet de serre [51].

Les activités humaines (utilisation à outrance des énergies fossiles) ont conduit à un excès de gaz à effet de serre, causant ainsi un effet de serre additionnel qui mène au réchauffement du système terre-atmosphère.

▪ Conséquences du réchauffement climatique

L'une des conséquences les plus attendues pour le réchauffement climatique c'est la fonte des glaciers ou du permafrost ⁵ ce qui entrainerait une élévation du niveau d'eau et inonderait les zones de faible altitude. Ceci mène à une modification géographique des zones côtières et pourrait causer des disparitions d'espèces ou d'écosystèmes. En effet, durant les 50 dernières années, il a été noté une élévation de 10cm environs au niveau des océans. Dans les deux siècles à venir, il a été prospecté que le niveau des océans augmentera encore de moins d'un mètre et 10 à 20 mille îles risqueraient de disparaître [52, 53].

D'autre part, les différents phénomènes d'évaporation ou de précipitations sont responsables de l'augmentation de la fréquence et/ou de l'intensité des crises de sécheresse et des phénomènes d'inondation ainsi que de nombreux autres phénomènes extrêmes (pluies, tempêtes...).

3.2.4 Normes et réglementation Algérienne

En Algérie, ⁶ la surveillance de la qualité de l'air se fait sur le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre, l'ozone et les particules fines en suspension. Le CO n'est pas réglementé. Les valeurs limites et les objectifs de la qualité de l'air sont fixés sur une base moyenne annuelle et sont présentés dans le tableau 3-5 pour le NO₂ [54]

Tab. 3-4 Normes algériennes du NO₂ dans l'air ambiant [54]

Valeur limite	200 (µg/Nm ³) (centile 98)
Objectif de qualité	135 (µg/Nm ³)
Seuil d'information	400 (µg/Nm ³)
Seuil d'alerte	600 (µg/Nm ³)

Les seuils d'information et les seuils d'alerte sont fixés sur une base moyenne horaire.

Le tableau 3-7 représente les valeurs limites et les seuils d'alerte des quantités de polluants émis à la source.

Tab. 3-5 les seuils des polluants à l'émission (dans les fumés) [55].

Substance	Valeurs limites (mg/Nm ³)	Seuil d'alerte (mg/Nm ³)
Dioxyde d'azote	200	300
Monoxyde de carbone	150	200

3.3 Paramètres influençant la diffusion des polluants

Un polluant dans l'air passe par les étapes suivantes :

- Son émission dans l'atmosphère
- La dispersion et le transport
- Interaction avec les autres particules présentes dans l'atmosphère ou avec les radiations solaires. Il en résulte une transformation de ce polluant ou production de polluants secondaires.

- Interaction avec d'autres milieux (eau, sol ...)
- Impact sur ces milieux.

Le phénomène de dispersion désigne le déplacement des polluants depuis la source. Il est crucial car il détermine l'accumulation d'un polluant ou sa dilution dans l'atmosphère.

La dispersion dépend de plusieurs paramètres comme la topographie et les conditions météorologiques [56].

3.3.1 Influence des facteurs météorologiques

3.3.1.1 Vent

Le vent est l'un des principaux paramètres météorologiques dans le transport et la dispersion des polluants. Il peut intervenir par sa direction ou par sa vitesse et son influence sur la pollution atmosphérique varie en fonction de la position à partir de la source.

En règle générale, la vitesse du vent est d'autant plus élevée que l'altitude est grande. Ainsi, plus le vent est fort, plus la dispersion est bonne et les niveaux de pollution bas. Au contraire, si le vent est de vitesse faible, l'accumulation locale des polluants est favorisée [56].

3.3.1.2 Influence de la stabilité de l'atmosphère

- **Stabilité de l'atmosphère**

L'atmosphère terrestre se caractérise par une distribution verticale de la température. Dans la troposphère, la température diminue de 6,5°C à chaque fois qu'on monte de 1km en altitude (Gradient thermique) [57, 58].

Une atmosphère est dite stable si une masse d'air, écartée de sa position d'équilibre, a tendance à revenir. Elle est instable dans le cas contraire [56]. Le déplacement de particules d'air est généré par des lois thermodynamiques. En effet, une masse d'air plus froide que le milieu dans lequel elle se trouve est plus dense et donc revient toujours vers le point d'équilibre après s'y être écarté (atmosphère stable) (Figure 3.8). Dans le cas contraire, si l'air est plus chaude, elle sera moins dense que le milieu, et sera élevée (atmosphère instable). Ainsi, la structure thermique verticale de la troposphère tient une part importante dans le mélange vertical des masses d'air, et par conséquent la dilution des polluants, la figure 3-4 illustre la stabilité statique verticale d'une particule [56].

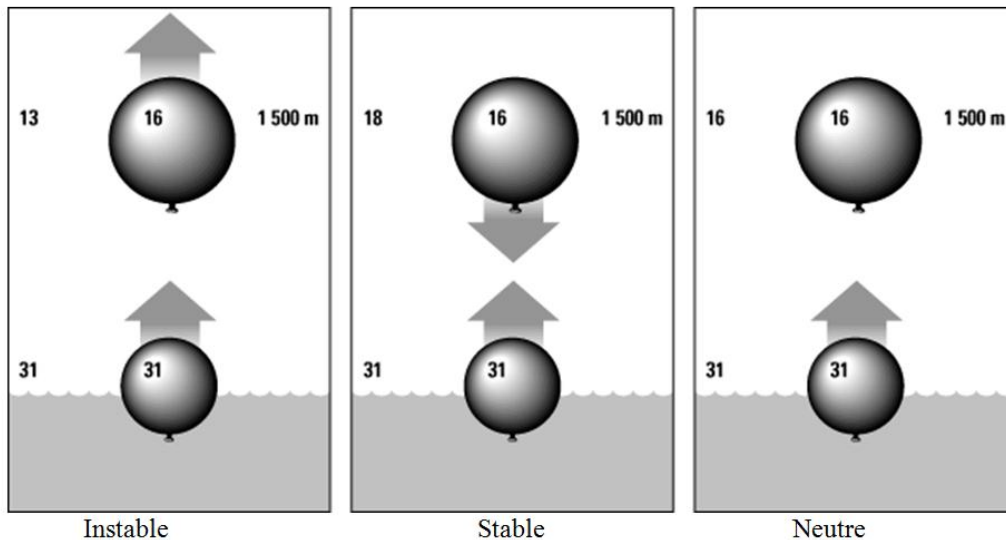


Fig. 3-4 Notion de stabilité statique verticale d'une particule [59]

En cas de fonctionnement naturel, la diminution progressive de la température avec l'augmentation de l'altitude ne freine pas la diffusion verticale des masses d'air, et donc le transfert des polluants se fait naturellement.

Il existe cependant, des inversions de température au-delà d'une certaine altitude (Situation où le gradient thermique devient positif), nous pouvons noter une température en hautes altitudes plus grande que celle en basse altitude, ce qu'on appelle le phénomène d'inversion thermique [56]. Dans ce cas, il se forme une couche d'air chaude, qu'on appelle couche limite, en dessus d'une couche d'air plus froide, qui aura pour fonction de bloquer la diffusion verticale de l'air pollué. Ce phénomène conduit à des scénarios de pollution locale et risque de créer des pics de pollution.

La formation de couche limite arrive dans des conditions météorologiques précises [56] :

- En début de matinée : Si la nuit était dégagée et sans vent, les couches d'air au sol se refroidissent alors que les couches qui sont directement au-dessus seront plus chaudes.
- En hiver : Lors de conditions anticycloniques ⁷ caractérisant des journées ensoleillées avec un vent faible. On assiste à une formation de smog.

Chapitre 4: SYSTEME DRY LOW EMISSION (DLE)

4.1 Introduction

Plusieurs technologies prometteuses permettant de réduire les émissions des turbines à gaz à usage intensif sont apparues ces dernières années. Depuis le début de la mise au point de systèmes secs à faibles émissions en 1973, General Electric a amené sa technologie à un point tel que des émissions de polluants soient aussi faibles que les 25 ppmv (Un seuil défini par GE) à 15% d'O₂ puissent être satisfaites. Cette technique promet d'atteindre des niveaux d'émissions extrêmement faibles sans recourir à la purification des gaz d'échappement. En tenant compte des différentes avancées technologiques dans la conception des turbines et leurs systèmes de combustion, GE a adopté, et travaille aujourd'hui avec deux systèmes de combustion :

- Système DLN (Dry Low NOx)
- Système DLE (Dry Low Emissions)

Ces deux systèmes ont comme point commun la phase de prémélange, ils diffèrent de par la conception de leurs chambres de combustion, notamment le nombre des canaux d'alimentation en carburant.

Durant notre travail, nous nous sommes intéressées aux turbines fonctionnant par le système DLE.

4.2 Système DLE

4.2.1 Principe

Les turbines à gaz avec la technologie DLE ont été développées pour réduire les émissions sans utiliser d'eau ou de vapeur pour réduire la température de combustion (technologie Wet Low Emission). La chambre de combustion DLE utilise le principe de la combustion pré-mélangée pauvre et est similaire à la chambre de combustion standard à quelques exceptions près. Elle prend plus de place qu'une turbine standard et si la turbine est remplacée, elle ne peut pas être connectée directement à l'équipement existant sans changements considérables dans le positionnement de l'équipement. Concernant les anneaux concentriques, la turbine standard comporte un seul, tandis que la turbine DLE comporte deux ou trois anneaux avec des pré-mélangeurs, en fonction du type de turbine à gaz. La technologie DLE exige un système de contrôle avancé avec un grand nombre de brûleurs. Elle entraîne une réduction des émissions de NOx car le processus utilise moins de carburant et d'air, et la combustion a lieu à une température plus basse [60-62].

4.2.2 Historique

L'accent mis sur les questions environnementales a conduit à une recherche accrue sur de nouvelles et meilleures turbines à gaz avec des méthodes de refroidissement à l'eau et à la vapeur au milieu des années 1970 [62,63].

En 1980, la meilleure technologie pouvait réduire les émissions de NOx à 42 ppm, puis à 25 ppm [62].

Au cours des dix années suivantes, la technologie DLE a été installée dans de nombreux endroits, ce qui a permis de réduire les émissions de NOx de moins de 25 ppm [62, 64].

Pour obtenir une réduction de 25 ppm à 9 ppm, plus de 6% d'air doit passer à travers le pré-mélangeur [62].

Les nouvelles générations de brûleurs DLE bénéficient d'une injection supplémentaire permettant un meilleur contrôle. Des systèmes supplémentaires tels que la "réduction catalytique sélective" (SCR) sont nécessaires pour atteindre des émissions inférieures à 2,5 ppm [62, 64].

4.2.3 Combustion

Les turbines à gaz à faible émission sèche (DLE) LM2500 et LM6000 utilisent une chambre de combustion annulaire triple (figure 4-1).

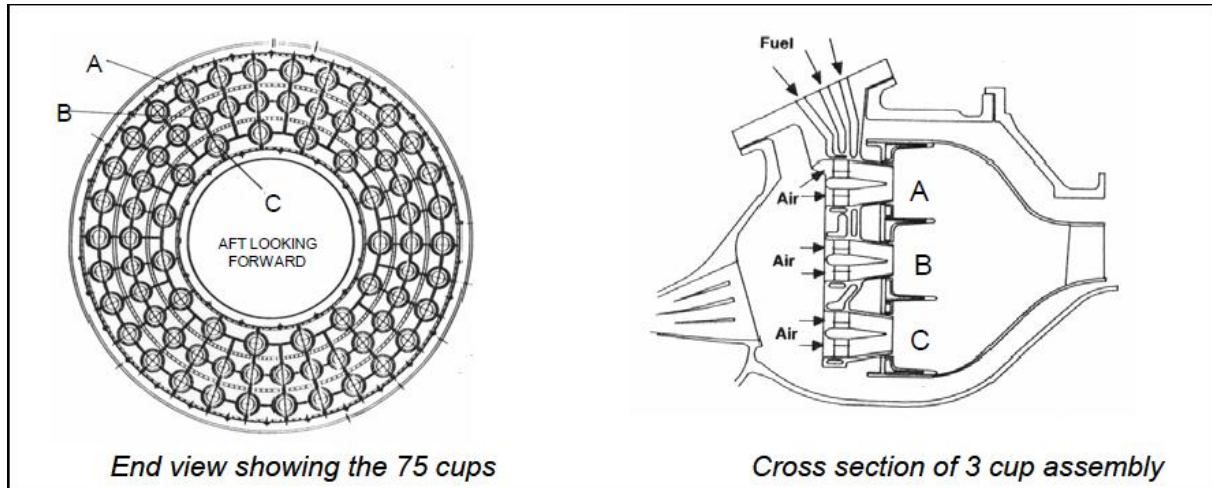


Fig. 4-1 Chambre de combustion DLE [5].

Le gaz combustible est introduit dans la chambre de combustion via 75 prémélangeurs air / gaz conditionnés en 30 modules amovibles et remplaçables de manière externe. Les prémélangeurs produisent un mélange carburant / air maigre très uniformément mélangé. La moitié de ces modules ont deux prémélangeurs et l'autre moitié en ont trois. Les 75 prémélangeurs, ou « cup », comme ils sont souvent désignés pour le DLE, sont disposés en trois anneaux ou dômes. L'anneau du milieu est appelé pilote ou anneau B et comporte 30 cup. L'anneau de pilotage est toujours alimenté. L'anneau intérieur est appelé anneau en C et comporte 15 cup, tandis que l'anneau extérieur, appelé anneau A, à l'instar du pilote, compte 30 cup. Contrairement aux anneaux pilotes, les réservoirs situés dans les anneaux intérieur et extérieur doivent être alimentés en carburant par des vannes d'arrêt. Ceci est dû à la plage de température de flamme limitée sur laquelle le brûleur peut fonctionner.

La plage de température de la flamme est limitée par des contraintes thermiques du côté haut et par l'éruption de mélange pauvre du côté bas. La température minimale de la masse ou moyenne de la flamme pour un LM6000 est comprise entre env. 1815 degrés Celsius sans synchronisation de charge inactif à env. 1593 degrés Celsius à la puissance maximale, alors que la température maximale de la flamme dans la masse ou moyenne varie entre env. 1898 degrés Celsius sans synchronisation à vide, en mode veille à env. 1648 degrés Celsius à la puissance maximale. Avec une plage de fonctionnement de la température de flamme aussi limitée, il est nécessaire de «mettre en marche» la chambre de combustion, c'est-à-dire d'allumer et d'éteindre certaines parties de la chambre de combustion. Dans la conception actuelle, 15 vannes, dites « staging valve », alimentent l'anneau intérieur, une cup par vanne et 10 vannes alimentent l'anneau extérieur, trois cup par vanne.

Une vanne d'arrêt supplémentaire est utilisée pour contrôler le niveau de débit de carburant par rapport à ce que l'on appelait à l'origine un circuit de purge maigre améliorée (ELBO), connecté à 15 des 30 cup pilotes. Cela porte à 26 le nombre total de vannes d'arrêt.

Les vannes d'arrêt permettent différentes configurations d'alimentation en carburant pour la chambre de combustion, allant du type B uniquement pour le démarrage et le fonctionnement à vide, au remplissage des trois anneaux (ABC) pour un fonctionnement à puissance élevée. Comme mentionné précédemment, différentes configurations de chambre de combustion sont nécessaires pour maintenir la température de la flamme de la chambre de combustion dans des limites. Les différentes configurations de la chambre de combustion sont illustrées à la figure 4-1. La figure 4-3 présente une comparaison entre le moteur DLE avec étage de la chambre de combustion et le moteur non DLE



Fig4-2 Configurations de la chambre de combustion [5].

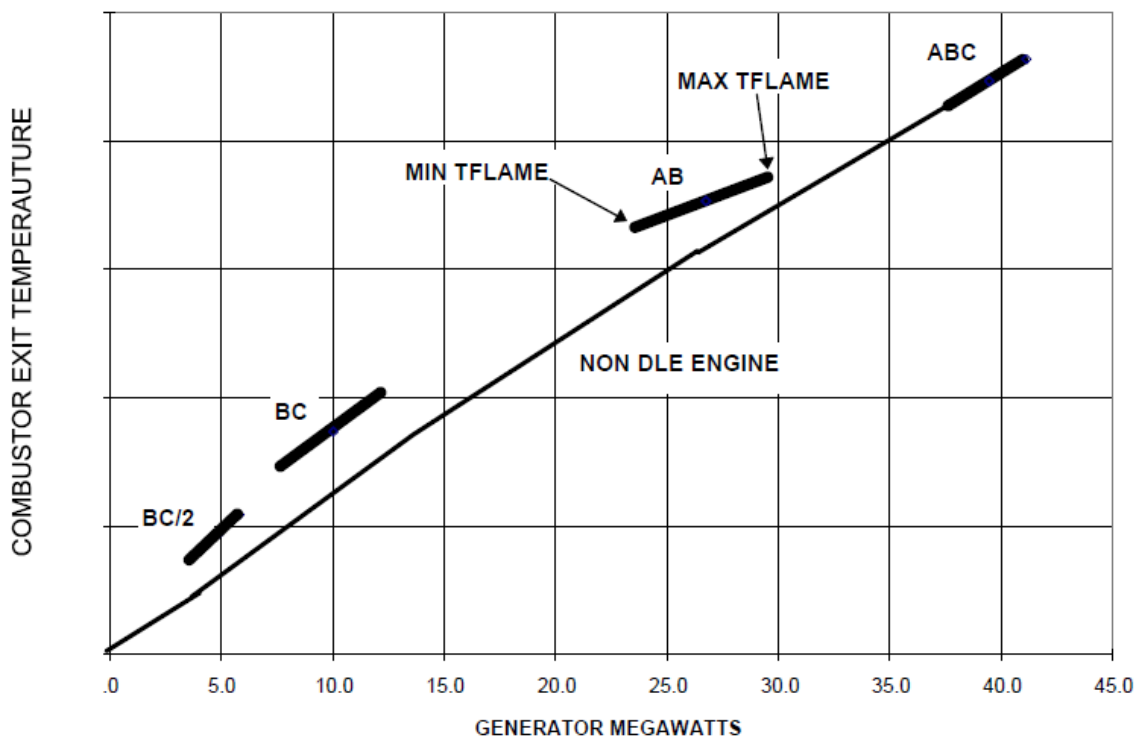


Fig. 4-3 Comparaison entre le moteur DLE avec étage de la chambre de combustion et le moteur non DLE [56].

La figure ci-dessus montre clairement que la plage de puissance de fonctionnement est limitée à chaque configuration de la chambre de combustion. Travailler à une puissance supérieure à celle prévue signifie dépasser la température de flamme moyenne maximale admissible et

peut entraîner des dommages importants à la chambre de combustion. Tenter de fonctionner à une puissance inférieure à celle prévue signifie tenter de fonctionner en dessous de la température de flamme minimale autorisée et peut provoquer des éruptions. On voit sur cette illustration qu'il existe des "espaces" entre chaque configuration, c'est-à-dire des régions de puissance dans lesquelles le moteur DLE ne peut pas fonctionner. Pour résoudre ce problème, il faudra procéder à la purge, comme illustré à la figure 4-4.

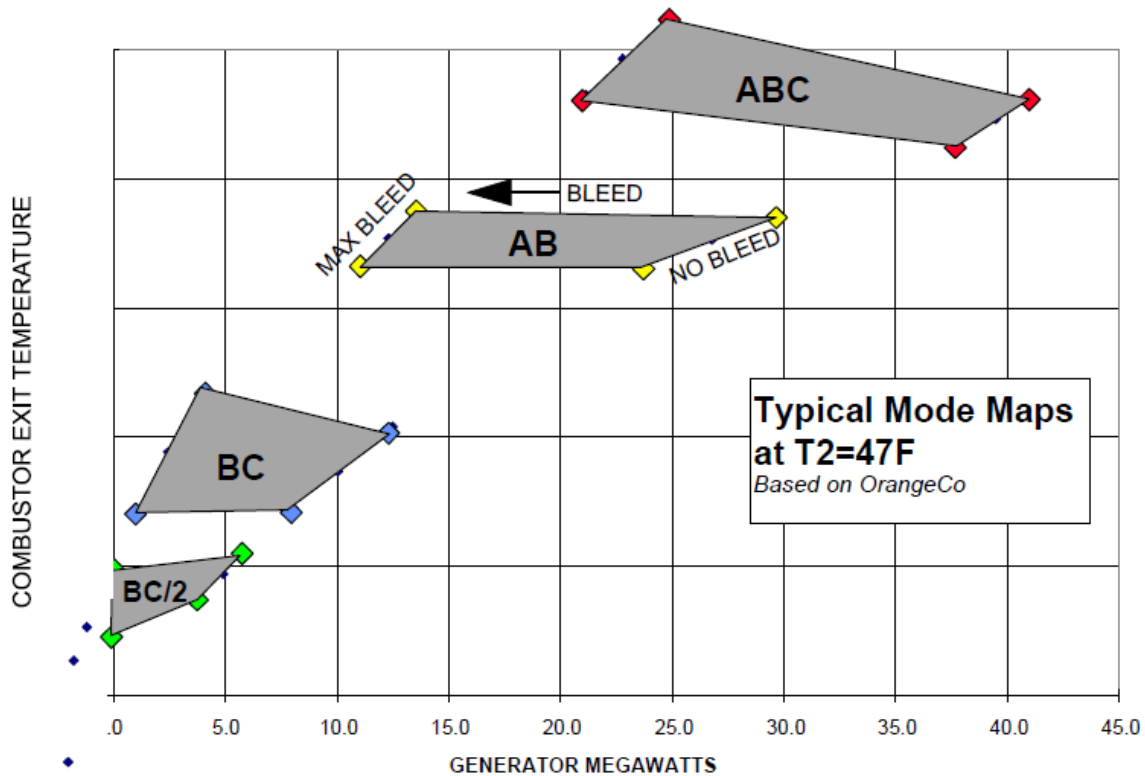


Fig. 4-4 Moteur DLE avec étagement de la chambre de combustion et modulation de la purge [65].

Une autre exigence importante pour la chambre de combustion DLE à trois anneaux, c'est la possibilité de faire varier indépendamment la température de la flamme de la chambre de combustion de chaque anneau. Ceci est réalisé par un contrôle individuel du débit total de carburant dans chaque anneau.

4.3 Le mapping

Le mapping d'une turbine est le processus de mesure des limites opérationnelles telles que les zones acoustiques et les régions d'évacuation de la chambre de combustion et la traduction de ces données en programmes de contrôle. Ceci éloigne le moteur des limites pendant le fonctionnement [66].

Quand le mapping est-il requis ?

- Test d'usine - au besoin
- Démarrage d'une nouvelle installation
- Changement de groupe de combustion ou de prémélangeur
- Eventuellement après le changement partiel du prémélangeur / le changement de vanne de dosage
- Si des symptômes chroniques de déclenchements acoustiques, d'émissions excessives,

d'éruptions se développent [66].

4.3.1 Composants de contrôle du système DLE

L'application DLE pour les modèles LM2500 et LM6000 nécessite des composants de contrôle supplémentaires en plus de ceux requis pour leurs équivalents non DLE. Les composants de contrôle supplémentaires du modèle LM2500 sont répertoriés dans le tableau 4-1.

Tab. 4-1 Composants de commande LM2500 supplémentaires pour l'application DLE

Description	Type	Utilisation
Température d'entrée du moteur (T2)	Un RTD à deux éléments	Contrôle de la température de la flamme
Température de sortie du compresseur (T3)	Un TC à deux éléments	Contrôle de la température de flamme
Détecteur de flamme	Deux détecteurs UV	Détection de la lumière de combustion
Capteur acoustique (PX36)	Deux charges piézoélectriques	Capteurs de température de flamme
Vannes d'arrêt	Vingt-six vannes à solénoïde avec position de commutation f / b	Etagement du bruleur
Soupape de purge du huitième étage (ST8)	Une vanne à commande hydraulique avec LVDT double f / b	Contrôle de la température de la flamme
Décharge du compresseur (CDP)	Une vanne de purge à commande hydraulique avec LVDT double f / b	Contrôle de la température de la flamme

4.3.2 Système de carburant

Pour l'application DLE, un circuit carburant à trois anneaux de haute précision, avec les capteurs associés, est requis. Les premières turbines à gaz DLE utilisaient un système à quatre vannes. Les unités les plus récentes ont un système à trois vannes.

Système à trois vannes

Le système d'alimentation à trois vannes est plus simple puisqu'il utilise trois vannes de dosage positionnées indépendamment en réponse directe aux débits de carburant requis dans chaque anneau. Le système à trois vannes nécessite la connexion de deux orifices, l'un entre le collecteur pilote et le collecteur extérieur, l'autre entre le collecteur pilote et le collecteur intérieur. Ces orifices limitent l'accumulation de pression dans un anneau non fluide. Ceci réduit l'impulsion initiale de débit de carburant, et donc la température de flamme, lorsqu'un anneau est alimenté pour la première fois (c'est-à-dire que la première vanne de commutation

est ouverte). La configuration du système de carburant à trois vannes est illustrée dans la figure 4-5.

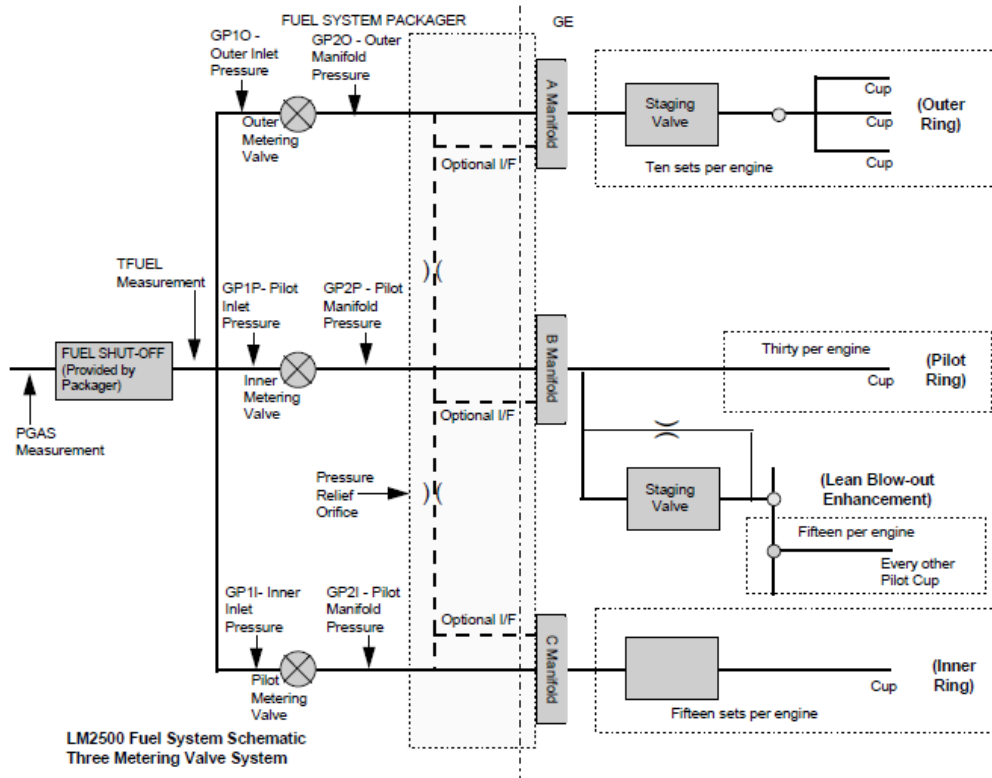


Fig. 4-5 Système d'alimentation à trois vannes [5]

4.4 Système de purge

Comme mentionné précédemment, afin de limiter la variation de la température de la flamme de la chambre de combustion, la configuration de la chambre passe de B (uniquement pour le démarrage et du fonctionnement à vide) à ABC pour le fonctionnement en pleine charge. Cependant, cela ne suffit pas à maintenir la température de la flamme de la chambre de combustion entre les limites d'éruption et de contrainte thermique. Changer la configuration de la chambre de combustion modifie le rapport air / carburant local dans chaque cup en modifiant le débit de carburant. Une autre façon de modifier le rapport air / carburant dans les cup consiste à modifier la purge du compresseur afin de modifier le débit d'air de la chambre de combustion. En modifiant la configuration de la chambre de combustion et en modulant la purge du compresseur, le rapport air / carburant local et, partant, la température de la flamme, peuvent être maintenus dans les limites définies pour toute la plage de puissance, comme illustré à la figure 4-6.

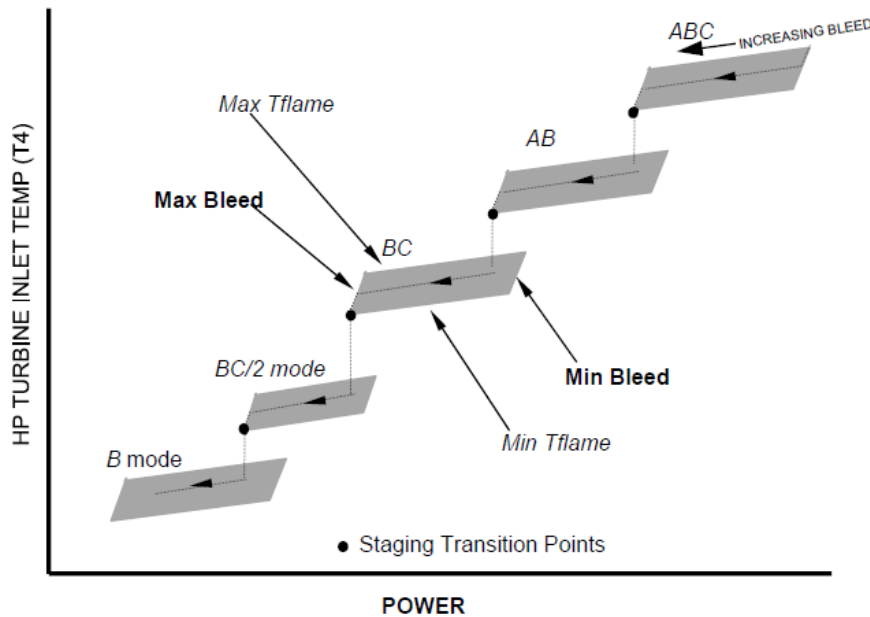


Fig. 4-6 Effet de la configuration de la chambre de combustion et de la purge du compresseur [5]

Pour la turbine à gaz DLE, deux vannes de purge sont ajoutées (purgé du compresseur du huitième étage et purgé de refoulement du compresseur).

i) Contrôle du carburant

Le contrôle du carburant, dans le contexte du système de contrôle DLE, fait référence à la partie du système de contrôle numérique qui détermine la demande totale de débit de carburant de la chambre de combustion. La demande totale de débit de carburant est ensuite divisée en trois demandes de débit de carburant en anneau basées sur les demandes de température de flamme de la chambre de combustion à anneau individuel (A et C). Le contrôle de carburant DLE est très similaire aux précédents systèmes de contrôle de carburant LM2500 et LM6000 non DLE (chambre de combustion annulaire). Le seul véritable changement consiste à ajouter des limites maximales et minimales de débit de carburant correspondant aux limites maximale et minimale de la température de la flamme. Ces limites se rencontrent principalement pendant le démarrage, les décélérations dans la configuration B uniquement, le fonctionnement à pleine charge dans la configuration ABC et brièvement pendant les transitoires rapides.

Le contrôle de carburant comprend un ensemble de régulateurs et de limiteurs de débit de carburant qui, via une série de sélections min / max, souvent appelée logique de sélection des priorités, émettent une seule demande de débit de carburant. Les régulateurs ajustent le débit de carburant pour réguler une variable moteur (puissance de la turbine, vitesse du générateur de gaz, etc.), tandis que les limiteurs de débit de carburant appliquent directement des limites de débit de carburant supérieures ou inférieures à la demande de débit de carburant (débit de carburant minimal, débit de carburant maximal). Un seul régulateur ou limiteur de débit de carburant peut être contrôlé à tout moment. Les régulateurs et les limiteurs de débit de carburant pour le modèle LM2500 sont les suivants :

- Puissance de la turbine
- Vitesse du générateur de gaz

- Vitesse de décélération du générateur de gaz
- vitesse d'accélération du générateur de gaz
- Débit minimum du carburant
- Température maximale de la turbine
- Vitesse maximale du générateur de gaz
- Débit maximum de carburant

ii) Contrôle de la température de la flamme

La stratégie de contrôle DLE d'origine, permettait de contrôler la température de flamme moyenne ou globale. Au cours des tests de développement, il est apparu clairement que des pressions dynamiques élevées dommageables dans la plage de fréquences de 300 Hz à 700 Hz pouvaient se produire avec la chambre de combustion DLE. Pour éviter ces pressions dynamiques élevées, souvent appelées acoustique de la chambre de combustion, et garantir que chaque anneau alimenté reste allumé, il est nécessaire de contrôler la température de la flamme indépendamment dans chacun des anneaux. Le résultat final est une stratégie qui contrôle indépendamment les températures de flamme des anneaux A et C, ainsi que la température de la flamme en vrac.

iii) Température de flamme en vrac

Pour la température de flamme globale pour chaque configuration de chambre de combustion, une fenêtre de température de flamme est définie comme illustré à la figure 4-7.

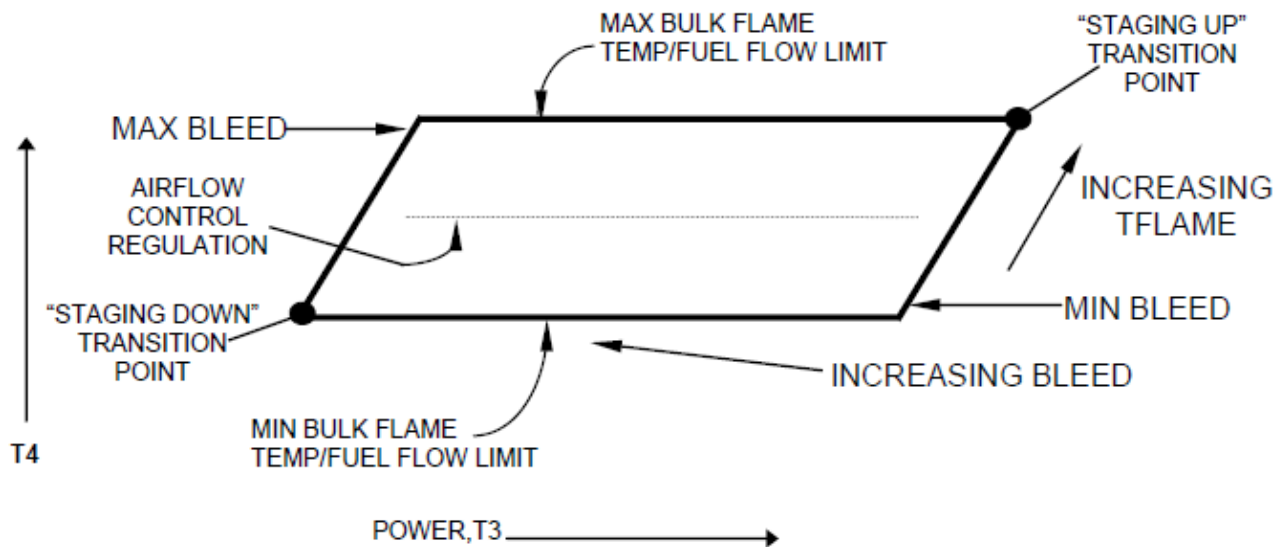


Fig. 4-7 Fenêtre de température de flamme en vrac [5]

La limite supérieure (TFLMAX) détermine en général indirectement la température maximale de la flamme de la veilleuse et, donc, le niveau maximal de NO_x , tandis que la limite inférieure (TFLMIN) définit généralement indirectement la ligne d'opération pilote pauvre. Les températures de flamme maximale et minimale (TFLMAX et TFLMIN) sont planifiées dans la commande en fonction de la configuration de la chambre de combustion et de T_3 . La limite de puissance gauche ou basse est définie par la capacité de purge maximale du compresseur et la limite de puissance droite ou haute correspond à une purge nulle. À mesure que la puissance varie, la commande ajuste la purge de sorte à ce que la température de

flamme globale soit maintenue à un niveau requis entre les limites minimale et maximale, jusqu'à ce que la limite de purge maximale ou nulle soit atteinte. Ce concept de contrôle est utilisé à la fois pour le LM2500 et le LM6000. Pour le LM2500, la température de flamme globale est maintenue au «niveau 50%» (c'est-à-dire à mi-chemin entre les limites minimale et maximale).

Pendant les augmentations de puissance, la purge diminue progressivement jusqu'à atteindre la valeur nulle, après quoi la température de la flamme en vrac augmente vers la limite maximale. Juste avant que la limite maximale soit atteinte, sauf si déjà dans la configuration ABC, le passage à la configuration suivante de la chambre de combustion "up" est initié. Lorsque la puissance diminue, la température de la flamme en vrac est maintenue au niveau requis jusqu'à ce que la purge soit maximale, après quoi la température de la flamme en vrac diminue jusqu'à la limite minimale. Juste avant que la limite minimale ne soit atteinte, à moins que la configuration B ne soit déjà définie, le passage à la configuration suivante est lancé.

Partie 2 :
CONTROLE ET ETUDE DES EMISSIONS

Chapitre 5: OPERATIONS DE CONTROLE

5.1 Introduction

Afin de garantir la meilleure performance pour les turbines PGT25 fonctionnant au système DLE, General Electric assure des opérations de contrôle qui entrent dans le cadre de la maintenance de ses turbines à gaz. Ces opérations de contrôle, dites mapping, adaptées au système de combustion DLE des PGT25, requièrent certaines exigences afin d'atteindre un fonctionnement optimisant la consommation de carburant, le coût de la maintenance, ainsi que le taux d'émissions en NOx, CO et CO₂.

Dans ce chapitre, nous allons nous approfondir la signification de l'opération de mapping et son déroulement à travers une étude que nous avons effectuée sur quatre turbines PGT25 opérant sur les deux sites TEG et REG du projet In-Salah Gas qui est un client de General Electric.

5.2 Description du projet In Salah Gaz

L'appellation du projet In Salah gaz est dérivée du nom d'In Salah qui est située à 1230 Km au sud d'Alger. Elle comporte des ressources minérales parmi les plus riches du pays. Le projet In Salah gaz comporte actuellement trois champs de traitement de gaz Teg, Reg et Krechba et d'autres champs en développement Hassi-Moumene, Garet-El-Benfinat, In Salah et Gour Mahmoud (Figure 5-1). Un débit de neuf milliards de mètres cubes a été réalisé durant les premières années d'exploitation.

Le gaz produit est acheminé vers la station de compression GR3 par un pipeline de 122 centimètre de diamètre pour ensuite être transporté vers les marchés en expansion du sud de l'Europe par le biais des moyens de Sonatrach.

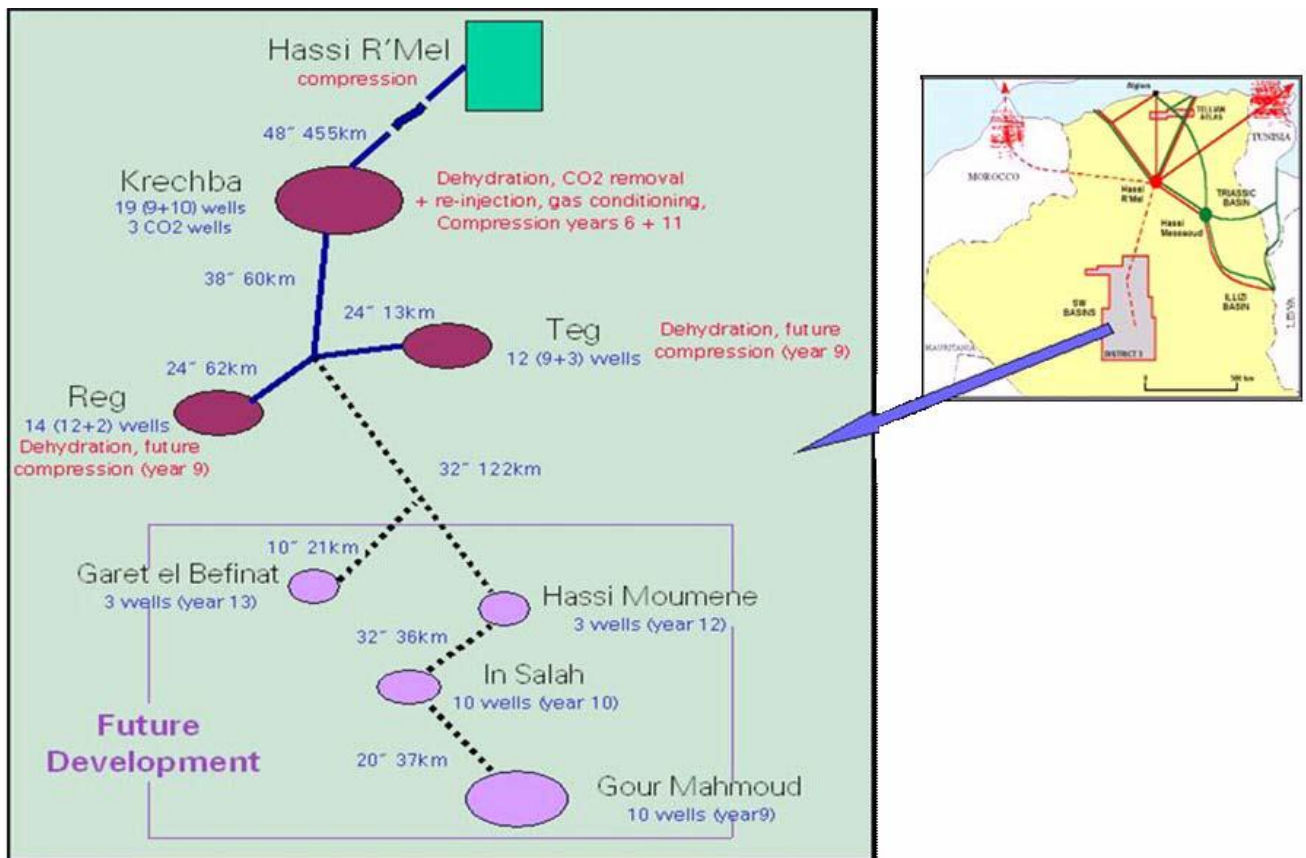


Fig5-1 Projet In Salah Gaz

Le Teg, alimenté par 12 puits au total, et le Reg, alimenté par 14 puits au total, assurent la déshydratation du gaz naturel puisé (la compression étant toujours pas mise en fonction pour ces deux champs). Le gaz est ensuite transporté vers le champ de Krechba qui, lui aussi puise le gaz naturel de 19 puits au total et assure sa déshydratation.

C'est dans ce même site de Krechba, qu'on effectue un captage puis stockage du CO₂ du gaz naturel puisé et déshydraté des trois champs (Teg, Reg et Krechba). L'opération consiste à piéger le CO₂ avant la combustion dans le but de minimiser sa libération dans l'atmosphère (gaz à effet de serre).

Vient ensuite l'étape du traitement et du conditionnement de ce gaz naturel, puis son transport vers la station GR3 qui se trouve dans le site de Hassi R'mel à 455 Km de Krechba, où il subit une opération de compression qui fait passer la pression du gaz naturel de 30 à 80 bars où il sera prêt à être mis sur le marché.

➤ Rôle des turbines PGT25

Le gaz naturel sort souvent combiné à des huiles (pétrole) et de l'eau qu'on doit séparer avant de procéder à toute opération de traitement ou de compression. Le but de cette séparation est d'obtenir un maximum de condensat qui est un mélange liquide d'hydrocarbures légers obtenu par condensation des gaz naturels brut puisés, et de produire un gaz naturel sec pouvant être directement envoyé à l'unité de traitement. Le condensat se vend mieux que le pétrole sur le marché international.

Le gaz traverse les turbo-expandeurs, appelés également turbines à détente, qui sont des turbines (PGT25) produisant un travail qui fera fonctionner le compresseur qui y est relié. Le compresseur assure, à son tour, la détente des gaz en augmentant la pression. Ce gaz détendu est ensuite séparé du condensât dans un séparateur. La figure 5-2 montre la turbine PGT25 dans le site TEG.



Fig. 5-2 Turbine PGT25 dans le site TEG

5.3 Mesure des émissions

L'analyse des gaz combustibles est effectuée non pas pour contrôler les émissions de polluants à des limites environnementales uniquement, mais également pour évaluer les performances du système de combustion. Les niveaux de concentration en oxygène et en monoxyde de carbone sont des indicateurs d'efficacité de combustion et peuvent détecter des problèmes dans la chambre de combustion.

5.3.1 Différentes phases de mesure des émissions

La mesure des émissions se fait selon les étapes suivantes :

- Extraction des polluants hors du flux gazeux qui les contient
- Transfert des polluants du flux gazeux vers un appareil de mesure ou d'analyse
- Mesure ou analyse (incluant la calibration)
- Validation et correction des données
- Communication des données, stockage et conservation des résultats

L'appareil de mesure installé par le client dans les deux sites Teg et Reg est le Testo. Les sondes du testo sont placées à 13m de hauteur des cheminées des turbines.

La mesure se fait donc en In-situ. La capacité de cet appareil ne permet pas d'effectuer une mesure continue, la mesure des émissions est donc séquentielle et se fait lors de chaque opération de mapping.

La validation et correction des mesures se fait dans la salle de contrôle (dans les opérations de mapping) et les résultats sont stockés et imprimés dans des rapports pour le client.

5.3.2 Appareil de mesure

Le Testo (Figure 5-3) est un instrument de mesure portable pour les contrôles ponctuels et les mesures sur site. Il est équipé d'une prise de sonde et d'une sonde de pression différentielle intégrée.

Une gamme complète de sondes est disponible pour la mesure précise de la température, de l'humidité, de la vitesse, de la turbulence, de la pression, du régime, du courant et de la tension. Jusqu'à 6 canaux de mesure peuvent être affichés simultanément sur l'écran

graphique.



Fig. 5-3 Appareil de mesure TESTO

Le testo mesure tous les paramètres nécessaires d'un processus de combustion. O₂, CO, CO₂, NO_x, SO₂ ... Les données de mesure sont visualisées par l'unité de contrôle. Alternativement, tous les canaux de mesure peuvent être affichés en ligne par un PC. Cela permet également d'évaluer, de documenter et d'archiver les séquences de mesure stockées avec des durées de mesure variables et toute combinaison de canaux souhaitée.

Le client a opté pour le Testo pour les raisons suivantes :

- Le rapport qualité / prix est relativement bon. Qualité fiable à un prix juste.
- Les périodes de garantie considérablement étendues jusqu'à 3 ans - selon le modèle.
- Les normes de qualité élevées sont confirmées par le certificat ISO 9001.
- L'appareil porte également le label CE requis par l'UE.

5.4 Méthodologie et déroulement de l'opération de Mapping

Le processus général de mapping consiste à :

- Stabiliser le réglage de la purge dans un mode particulier.
- Ajuster la température de la flamme en vrac pour répondre aux exigences des NO_x.

- Augmenter la température de la flamme des anneaux jusqu'à atteindre une limite maximale.
- Diminuer la température de l'anneau jusqu'à ce qu'une limite minimale soit détectée
- Vérifier que les émissions sont dans les limites de la spécification.
- Sinon, ajuster la température de la flamme en vrac et répéter le processus ci-dessus
- Une fois les critères remplis, augmenter la puissance de la purge et répéter le processus ci-dessus.

Les étapes ci-dessus sont suivies pour chaque mode de flamme [67].

Le mapping ne se fait qu'après avoir :

1. Compris et clarifié le problème :

- Émissions élevées, déclenchements acoustiques, éruptions, etc.
- En quel mode se produit un problème (BRNDMD)
- État stable ou transitoire
- Puissance faible ou élevée
- Quand le problème a-t-il été observé pour la première fois ?
- Changement progressif sur plusieurs semaines / mois

2. Vérifié l'instrumentation :

- Propriétés du gaz combustible
- Capteurs acoustiques
- Capteurs de pression
- Différences entre les capteurs
- Fuites dans les tubes de détection / eau dans les tubes
- Différences entre les canaux A et B

Autres conditions

- Vérification de la pression d'alimentation en gaz de la normale
- Fuite de pression du filtre d'entrée
- Tout autre paramètre susceptible d'avoir modifié le «lavage à l'eau» si le compresseur est sale ou si l'efficacité est réduite

5.4.1 Pré-mapping

5.2.1.1 Instrumentation et vérification du matériel

- Vérifier que toutes les vannes fonctionnent correctement et sont correctement raccordées
- Vérifier et étalonner les vannes de purge, y compris les inspections visuelles indiquant qu'elles sont physiquement ouvertes à 100% du retour de position et les calibrer, vérifier et calibrer les vannes de dosage.
- Inspecter visuellement le système d'alimentation en carburant pour s'assurer que les vannes de dosage sont bien raccordées (c'est-à-dire que la vanne de dosage à anneau en A est connectée à l'anneau en A, etc.)
- Vérifier que tous les instruments et le matériel du système d'alimentation sont correctement branchés.

- Calibrer le système de mesure acoustique
- Enregistrement des heures de fonctionnement du moteur
- Réglages du système de carburant

5.4.2 Le mapping

Étapes pour chaque mode de flamme :

- Définir la puissance cible et le niveau de purge
- Régler les émissions de NOx via la température de flamme.
- Trouver la limite supérieure de l'anneau
- Trouver la limite inférieure de l'anneau
- Régler le réglage «nominal» de l'anneau
- Vérifier NOx & CO; sinon, ajuster la température de la flamme et répéter le processus depuis le début
- Une fois les critères remplis, augmenter la puissance selon différents paramètres de purge et passer à l'étape 1.

Exemple de détermination de la température de flamme :

5.4.3 Mapping en mode ABC

- **Définir le point de purge moyen**
 - Ajuster la température de flamme jusqu'à ce que NOx = 10 -16 ppm
 - Stabiliser 5 minutes ou jusqu'à ce que les émissions soient stables.
- **Réglage initial de la température de la bague extérieure**

Si les vibrations acoustiques sont supérieures à 1 psi en moyenne, réduire la température de la flamme de l'anneau extérieur jusqu'à ce que:

- Une éruption naissante soit détectée,
ou
 - La vibration acoustique devienne inférieure à 1,0 psi en moyenne
- **Point de température de l'anneau C maximum**
 - Augmenter la température de la flamme de l'anneau intérieur par incréments de 10 degrés jusqu'à ce que:
 - La limite acoustique dépasse 2,7 psi en moyenne,
ou
 - L'éruption de départ est détectée
 - Stabiliser pendant 2 minutes ou jusqu'à ce que les émissions soient stables.
 - **Point de température de l'anneau C minimum**

- Diminuer lentement la température de flamme par incréments de 20 degrés, en enregistrant les niveaux d'émission et d'acoustique à chaque pas de 20 degrés jusqu'à :
 - Éruption de départ détectée,
ou
 - Vibration acoustique soit égale à 2,7 psi en moyenne,
ou
 - NOx > 25 ppm
 - Température de flamme supérieure à 3550 ° F
- Stabiliser pendant 2 minutes ou jusqu'à ce que les émissions soient stables.
- **Définir le point de température nominal de l'anneau C**
- Définir La température de flamme de l'anneau sur 50 ° au-dessous de la limite maximale ou sur la moyenne de la plage, selon la valeur ayant la plus faible teneur en NOx.
- Stabiliser 2 minutes ou jusqu'à ce que les émissions soient stables.
- **Point de température de l'anneau A maximum**
- Augmenter la température de la flamme de l'anneau extérieur par incréments de 10 degrés jusqu'à ce que :
 - La vibration acoustique dépasse 2,7 psi en moyenne,
ou
 - L'éruption de départ est détectée
- Stabiliser pendant 2 minutes ou jusqu'à ce que les émissions soient stables.
- **Température minimale de l'anneau A**
- Diminuer lentement la température de flamme par incréments de 20 degrés, en enregistrant les niveaux d'émissions acoustiques à chaque pas de 20 degrés jusqu'à ce que:
 - Éruption de départ détectée,
ou
 - La vibration acoustique = 2,7 psi en moyenne,
ou
 - NOx > 25 ppm
 - Température de flamme > 3550 ° F
- Stabiliser pendant 2 minutes ou jusqu'à ce que les émissions soient stables.
- **Définir le calendrier nominal**
- Déterminer la taille de la fenêtre de la température de l'anneau en calculant la différence entre les températures maximale et minimale de l'anneau A.
- Définir la température de flamme sur 50 degrés au-dessous de la limite maximale ou sur la moyenne de la plage des deux températures (min et max), selon le NOx le plus bas.

- Stabiliser 2 minutes ou jusqu'à ce que les émissions soient stables.
- **Définir le point de purge bas**
 - Ajuster la puissance jusqu'à ce que l'intensité de purge soit entre 2% et 12%
 - Stabiliser 5 minutes ou jusqu'à ce que les émissions soient stables.
 - Ajuster la température de flamme de sorte que $\text{NO}_x = 9-15$ ppm
 - Vérifier le niveau de la purge et régler la puissance jusqu'à ce que l'intensité soit entre 2% et 12%
- **Calibrer le paramètre d'éclatement**
 - Avec le moteur nominal, la chambre de combustion doit être entièrement allumée (non partiellement éteinte). Vérifier cela en s'assurant que CO et UHC sont <100 ppmDans cette condition, le paramètre d'éruption corrigé doit être compris entre 0 et 3%.

Au max puissance s'assurer que $\text{NO}_x < 25$ ppm, Sinon, réduire T flamme max afin de réduire les NO_x à 25.

- **Tracé des planifications en mode ABC et du contrôle de mise à jour (BD40)**
 - Réduire la puissance jusqu'à ce qu'on commence à passer en mode AB
 - Ajuster la puissance pour régler la purge à 10%.
- **Restaurer les ajustements de contrôle**
 - S'assurer que tous les ajustements de température de flamme sont à zéro et que les nouveaux paramètres sont sous contrôle
 - Régler le niveau de puissance à partir de 34
 - Ajouter de la charge jusqu'à ce que la transition vers ABC se produise, puis réduire la charge au niveau indiqué en 34, mais toujours en mode ABC.
 - Assurer que les émissions de NO_x et de CO corrigées sont inférieures à 25 ppm et qu'aucune action ABAL n'est en cours. Si ces conditions ne sont pas remplies, le mode est peut être mal mappé.

**Chapitre 6 : CALCUL DES EMISSIONS - RESULTATS
ET INTERPRETATION**

6.1 Calcul des émissions en CO₂

Dans le cadre de la Convention Cadre sur les Changements Climatiques (CCCC), il est toujours demandé au pays de faire régulièrement un inventaire des émissions des gaz à effet de serre (GES), notamment le CO₂. Nous déterminons donc, dans ce sens, dans cette partie, les quantités annuelles émises en CO₂ par l'ensemble des deux stations Teg et Reg.

➤ **Site du Teg**

Données :

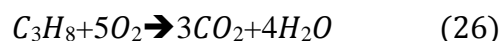
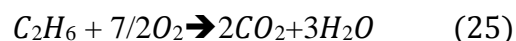
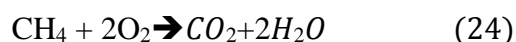
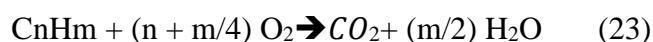
Débit du carburant à l'entrée de la chambre de combustion D : 4,5 tonnes/heure

Composition du gaz combustible utilisé sur le site :

Tab 6-1 les teneurs des différents composants du carburant du site TEG

Composant	Teneur
Méthane	88,46 % vol.
Ethane	0,59 % vol.
Propane	0,04 % vol.
Iso-butane	<0,01 % vol.
n-butane	<0,01 % vol.
Iso-pentane	<0,01 % vol.
n-pentane	<0,01 % vol.
Hexane +	<0,01 % vol.
Carbone dioxyde	10,69 % vol.
Nitrogène	0,22 % vol.

Réactions de la combustion :



Calcul du volume d'air nécessaire à la combustion :

Pour calculer la quantité d'air nécessaire qui assure la combustion du carburant, nous supposons que le volume des gaz rares dans l'atmosphère est négligeable. Nous prenons donc les pourcentages d'O₂ et d'N₂ égales à 21% et 79% respectivement (dans les conditions normales de la température et de pression).

Combustion du méthane CH4 :



Nous avons : 1 mole de combustible consomme 2 moles d'O₂

1 mole de combustible nécessite 2 moles d'O₂

0.8846 mole de CH₄ nécessite **X moles** O₂

Le volume d'oxygène nécessaire à la combustion est donc

$$V_{\text{O}_2(\text{CH}_4)} = 1.7692 \text{ Nm}^3 \text{ d'O}_2 / \text{Nm}^3 \text{ de combustible.}$$

Même méthode pour les autres composants ; les composants dont la teneur est <0.1 % seront négligés.

Le N₂ et le CO₂ qui entrent dans la composition du combustible (gaz naturel) restent inertes pendant la réaction ; les résultats de la consommation en oxygène sont présentés dans le tableau 6-2 :

Tab 6-2 les résultats de la consommation en oxygène pour le TEG

Réaction	V _{O2} (Nm ³ / Nm ³ de combustible)
CH ₄ + 2O ₂ → CO ₂ + 2H ₂ O	1.769
C ₂ H ₆ + 7/2O ₂ → 2CO ₂ + 3H ₂ O	0.020
C ₃ H ₈ + 5O ₂ → 3CO ₂ + 4H ₂ O	2 .10 ⁻³

Le volume d'oxygène nécessaire pour la combustion V_T est :

$$V_T(\text{O}_2) = V_{\text{O}_2(\text{CH}_4)} + V_{\text{O}_2(\text{C}_2\text{H}_6)} + V_{\text{O}_2(\text{C}_3\text{H}_8)}$$

$$V_T(\text{O}_2) = 1.7918 \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3 \text{ de combustible}$$

Puisque l'O₂ représente 21% de la composition d'air, le volume d'air nécessaire à la combustion est :

$$V_{\text{air}} = \frac{1}{0.21} \times V_T(\text{O}_2) = 8.532 \text{ Nm}^3 \text{ d'air} / \text{Nm}^3 \text{ de combustible}$$

Dans une réaction à combustion stœchiométrique, les produits de la combustion sont le dioxyde de carbone (CO₂), l'eau (H₂O) et l'azote (N₂) qui est un gaz inerte.

Le volume des gaz émis par la combustion est donné par la relation suivante :

$$V_g = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} \quad (\text{a})$$

Volume du dioxyde de Carbone émis par la combustion

Supposant que les teneurs en CO₂ dans l'air soient négligeables (de l'ordre de 10⁻⁴ en volume), le volume de CO₂ émis par la combustion (V_{CO2}) est donné par la relation suivante :

$$V_{\text{CO}_2} = (V_{\text{CO}_2})_{\text{comp}} + \sum V_{\text{CO}_2}$$

Avec : V_{CO2} = n.v

- $(V_{CO_2})_{comp}$: Volume de CO_2 qui entre dans la composition du combustible
- V_{CO_2} : Volume de CO_2 émis par chaque réaction
- v : Teneur volumique de CO_2
- n : Nombre de mole du CO_2 produit

Application numérique :

$$V_{CO_2} = 0.1069 + (1 \times 0.8846) + (2 \times 0.0059) + (3 \times 0.0004) = 1.004$$

$$V_{CO_2} = \mathbf{1.004 \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3 \text{ de combustible}}$$

Volume de la vapeur d'eau H_2O produite par la réaction de combustion

En négligeant l'humidité contenue dans l'air, nous considérons que la vapeur qu'on trouve dans les produits de combustion provient de la combustion des hydrocarbures du combustible. De la même manière, nous avons :

$$V_{H_2O} = \sum V_{H_2O}$$

$$\sum V_{H_2O} = \sum n_{H_2O} \cdot v_{H_2O}$$

- v : teneur volumique
- n_{H_2O} : nombre de mole de H_2O produit

Application numérique :

$$V_{H_2O} = (2 \times 0.8846) + (3 \times 0.0059) + (4 \times 0.0004) = 1.788$$

$$V_{H_2O} = \mathbf{1.7885 \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3 \text{ de combustible}}$$

Volume d'azote N_2 produit par la réaction de combustion

L'azote présent dans les produits de combustion provient à la fois de la quantité d'azote présente dans l'air nécessaire à la combustion (comburant) et de celle présente dans le combustible, nous avons donc :

$$V_{N_2} = 0.79 V_{air} + V_{N_2} = (0.79 \times 8.532) + 0.0022 = 6.742$$

$$V_{N_2} = \mathbf{6.7424 \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3 \text{ de combustible}}$$

0.79 : représente le pourcentage volumique de N_2 dans l'air.

V_{N_2} : Volume de N_2 contenu dans le combustible.

Enfin, le volume de gaz émis par la combustion exprimé dans la relation (a) sera égal à la somme des gaz émis :

$$V_g = 1.0045 + 1.7885 + 6.7424 = 9.513$$

$$V_g = \mathbf{9.5135 \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3 \text{ de combustible}}$$

Calcul de la teneur en CO₂ :

Teneur en CO₂ pratique calculée pour le TEG est à :

$$\% \text{CO}_2 = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_g} = \frac{1.0045}{9.5135} = 10.55\%$$

Cette teneur pratique calculée à partir des données de la combustion de l'installation est proche de la teneur théorique du CO₂ émis par le gaz naturel algérien et qui est estimée à 12,1 %.

Le Teg émet 474,75Kg de CO₂/heure par turbine. Il émet donc annuellement 8317,62 tonnes de CO₂.

➤ **Site du REG :**

Nous allons suivre les mêmes étapes pour ce site afin de calculer le taux de CO₂ émis par la combustion, ainsi que les quantités annuelles qu'émet le Reg.

Données :

Débit du carburant à l'entrée de la chambre de combustion : 4,5 tonnes/heure

Composition du gaz combustible qui est légèrement différente de celle du site Teg (tableau 6-3) :

Tab 6-3 les teneurs des différents composants du carburant du site REG

Composant	Teneur
Méthane	87,76 % vol.
Ethane	0,82 % vol.
Propane	<0,01 % vol.
Iso-butane	<0,01 % vol.
n-butane	<0,01 % vol.
Iso-pentane	<0,01 % vol.
n-pentane	<0,01 % vol.
Hexane +	<0,01 % vol.
Carbone dioxyde	10,79 % vol.
Nitrogène	0,63 % vol.

Résultats :

Tab 6-4 les résultats de la consommation en oxygène pour le REG

Réaction	V_{O2} (Nm³ / Nm³ de combustible)
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	1.755
$\text{C}_2\text{H}_6 + 7/2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	0.0287

Nous négligeons la quantité de propane qui se trouve dans le combustible.

$V_{T(O_2)}$ (Nm ³)	V_{air} (Nm ³)	V_{CO_2} (Nm ³)	V_{N_2} (Nm ³)	V_{H_2O} (Nm ³)	V_g (Nm ³)	%CO ₂	Quantité de CO ₂ (Tonne/an)
1,784	8,494	0,993	6,717	1,780	9,491	10,46%	8246,664

Le Reg émet annuellement 8246,664 tonnes de CO₂.

L'ensemble des deux stations émet donc un total de 16564,284 tonne de CO₂ par an.

6.2 Emissions annuelles en polluants

➤ Calcul du débit de sortie de la fumée

$$Q = \rho_g \times v \times S$$

- Q : Débit (g.s⁻¹)
- ρ_g : masse volumique du gaz d'échappement (g.m⁻³)
- v : Vitesse d'échappement des gaz (m.s⁻¹)
- S : Section de la cheminée (m²)

$$\rho_g = \frac{PM}{RT}$$

- P : Pression de sortie des gaz (Pa)
- T : Température de sortie des gaz (K)
- R = 8,314 J.K⁻¹.mol⁻¹.

M : Masse molaire du fluide (g.mol⁻¹). Pour toute notre étude, nous prendrons la masse molaire de l'air: M = 28,965g.mol⁻¹ [68].

➤ Calcul du débit de sortie des polluants :

Notons X un polluant quelconque, X désignera la quantité de polluant émise en Kg.s⁻¹ du polluant X et Te sa teneur en ppm dans le panache des gaz d'échappement :

$$X = Q \times T_e \times 10^{-6}$$

Pour toutes les turbines, nous allons prendre la valeur théorique de la vitesse d'échappement des gaz : v = 423,53m/s

Toutes les turbines étudiée ont un diamètre de la cheminée D = 2612mm

$$\text{La surface de la cheminée : } S = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

On sait que : 1ppm = 10⁻⁶

6.2.1 Site TEG

6.2.1.1 Turbine GT1

Données :

Pression de sortie des gaz d'échappement : $P_{GT1(TEG)} = 0,82 \text{ bar} = 82000 \text{ Pa}$ (1bar= 10^5 Pa)

Température de sortie des gaz d'échappement : $T_{GT1(TEG)} = 543^\circ\text{C} = 816,15 \text{ K}$

Résultats finaux du mapping du 03/03/2019 :

Tab 6-5 Teneurs en polluants en fonction du taux d'O2 pour différents modes de flamme pour la turbine GT1 du TEG.

	Purge	O ₂ (%)	NO _x (ppm)	CO (ppm)
AB	Forte	16,0	22,5	6,7
	Moyenne	16,0	40,8	6,0
	Faible	16,0	32,3	5,8
	Poussée	16,0	17,9	8,4
ABC	Forte	15,3	29,5	3,9
	Moyenne	15,0	22,9	4,0
	Faible	15,0	18,0	3,2
	Pleine charge	15,0	15,3	3,6

Résultats :

$$Q_{GT1(TEG)} = \frac{PM}{RT} \cdot v \cdot \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 794388,325 \text{ g.s}^{-1}$$

$$Q_{GT1(TEG)} = 794,388 \text{ Kg.s}^{-1}$$

➤ **Calcul des émissions annuelles en polluants pour les différents modes de flamme :**

Emissions en NO_x :

Tab. 6-6 Quantités de NO_x émises par la Turbine GT1 du site TEG

NO _x						
	Purge	ppm	Kg.s ⁻¹	Kg.j ⁻¹	Kg.an ⁻¹	Tonne.an ⁻¹
AB	Forte	22,5	0,017873737	1544,290	563666,180	563,666
	Moyenne	40,8	0,032411044	2800,314	1022114,670	1022,114
	Faible	32,3	0,025658743	2216,915	809174,116	809,174
	Poussée	17,9	0,014219551	1228,569	448427,761	448,427
ABC	Forte	29,5	0,023434456	2024,736	739028,991	739,029

	Moyenne	22,9	0,018191493	1571,744	573686,912	573,686
	Faible	18	0,01429899	1235,432	450932,944	450,932
	Pleine charge	15,3	0,012154141	1050,117	383293,002	383,293

Emissions en CO :

Tab 6-7 Quantités de CO émises par la Turbine GT1 du site TEG

CO						
	Purge	ppm	Kg.s ⁻¹	Kg.j ⁻¹	Kg.an ⁻¹	Tonne.an ⁻¹
AB	Forte	6,7	0,005322402	459,855	167847,262	167,847
	Moyenne	6	0,00476633	411,8109	150310,981	150,311
	Faible	5,8	0,004607452	398,0838	145300,615	145,300
	poussée	8,4	0,006672862	576,535	210435,374	210,435
	ABC	Forte	3,9	0,003098114	267,677	97702,137
	Moyenne	4	0,003177553	274,540	100207,321	100,207
	Faible	3,2	0,002542043	219,632	80165,856	80,166
	Pleine charge	3,6	0,002859798	247,086	90186,588	90,186

➤ **Turbine GT2**

Données :

Pression de sortie des gaz d'échappement : $P_{GT2(TEG)} = 0,85 \text{ bar} = 8500\text{Pa}$

Température de sortie des gaz d'échappement : $T_{GT2(TEG)} = 549^\circ\text{C} = 822,15 \text{ k}$

Résultats finaux du mapping du 28/04/2019 :

Tab 6-8 Teneurs en polluants en fonction du taux d'O₂ pour différents modes de flamme pour la turbine GT2 du TEG

	Purge	O ₂ (%)	NO _x (ppm)	CO (ppm)
AB	Forte	15,8	21,9	12,7
	Moyenne	15,8	15	21,9
	Faible	15,7	7,9	6,8
	Poussée	15,7	11,3	18,1
ABC	Forte	15,3	17,9	24,2
	Moyenne	15,3	13,7	26,3
	Faible	15,3	10,5	20,0
	Pleine charge	15,3	15,8	4,2

Résultats :

Application numérique :

$$Q_{GT2(TEG)} = 817441,815 \text{g.s}^{-1} = 817,4418156 \text{Kg.s}^{-1}$$

Emissions en NOx :

Tab 6-9 Quantités de NOx émises par la Turbine GT2 du site TEG

NOx						
	Purge	ppm	Kg.s ⁻¹	Kg.j ⁻¹	Kg.an ⁻¹	Tonne.an ⁻¹
AB	Forte	21,9	0,018392441	1589,106	580024,015	580,024
	Moyenne	15	0,033351626	2881,580	1051776,88	1051,776
	Faible	7,9	0,026403371	2281,251	832656,697	832,656
	Push	11,3	0,014632208	1264,223	461441,327	461,441
ABC	Forte	17,9	0,024114534	2083,495	760475,93	760,476
	Moyenne	13,7	0,018719418	1617,357	590335,553	590,335
	Faible	10,5	0,014713953	1271,285	464019,212	464,0192
	Full load	15,8	0,01250686	1080,592	394416,33	394,416

Emissions en CO :

Tab 6-10 Quantités de CO émises par la Turbine GT2 du site TEG

CO						
	Purge	ppm	Kg.s ⁻¹	Kg.j ⁻¹	Kg.an ⁻¹	Tonne.an ⁻¹
AB	Forte	12,7	0,00547686	473,200	172718,262	172,718
	Moyenne	21,9	0,004904651	423,761	154673,071	154,673
	Faible	6,8	0,004741163	409,636	149517,302	149,517
	poussée	18,1	0,006866511	593,266	216542,299	216,542
ABC	Forte	24,2	0,003188023	275,445	100537,496	100,537
	Moyenne	26,3	0,003269767	282,507	103115,38	103,115
	Faible	20,0	0,002615814	226,006	82492,304	82,492
	Pleine charge	4,2	0,002942791	254,257	92803,842	92,803

6.2.2 Site REG

➤ **Turbine GT1**

Données :

Pression de sortie des gaz d'échappement : $P_{GT1(REG)} = 0,91 \text{ bar} = 9100\text{Pa}$

Température de sortie des gaz d'échappement : $T_{GT1(REG)} = 522^\circ\text{C} = 795,15\text{k}$

Résultats finaux du mapping du 08/02 :

Tab 6-11 Teneurs en polluants en fonction du taux d'O₂ pour différents modes de flamme pour la turbine GT1 du REG

	Purge	O ₂ (%)	NO _x (ppm)	CO (ppm)
AB	Forte	15,3	25,0	29,0
	Moyenne	16,3	23,0	30,0
	Faible	15,3	20,0	32,0
	Poussée	15,5	23,0	7,0
ABC	Forte	15,5	20,0	24,0
	Moyenne	15,5	15,8	17,9
	Faible	15,3	14,2	16,3
	Pleine charge	15,1	20,2	1,2

Résultats :

$$Q_{GT1(REG)} = 904859,8417\text{g.s}^{-1} = 904,8598417\text{Kg.s}^{-1}$$

➤ **Calcul des émissions annuelles en polluants pour les différents modes de flamme :**

Emissions en NO_x :

Tab 6-12 Quantités de NO_x émises par la Turbine GT1 du site REG

NO _x						
	Purge	ppm	Kg.s ⁻¹	Kg.j ⁻¹	Kg.an ⁻¹	Tonne.an ⁻¹
AB	Forte	25,0	0,020359346	1759,047	642052,349	642,052
	Moyenne	23,0	0,036918282	3189,740	1164254,93	1164,255
	Faible	20,0	0,029226973	2525,210	921701,817	921,701
	Poussée	23,0	0,016196991	1399,420	510788,313	510,788
ABC	Forte	20,0	0,026693365	2306,306	841801,969	841,802
	Moyenne	15,8	0,02072129	1790,319	653466,613	653,466
	Faible	14,2	0,016287477	1407,238	513641,879	513,641
	Pleine charge	20,2	0,013844356	1196,152	436595,598	436,595

Emissions en CO :

Tab 6-13 Quantités de CO émises par la Turbine GT1 du site REG

CO						
	Purge	ppm	Kg.s ⁻¹	Kg.j ⁻¹	Kg.an ⁻¹	Tonne.an ⁻¹
AB	Forte	29,0	0,006062561	523,805	191188,922	191,189
	Moyenne	30,0	0,005429159	469,080	171213,96	171,214
	Faible	32,0	0,005248187	453,443	165506,828	165,506
	Poussée	7,0	0,007600823	656,711	239699,544	239,670
ABC	Forte	24,0	0,003528953	304,901	111289,074	111,290
	Moyenne	17,9	0,003619439	312,719	114142,64	114,142
	Faible	16,3	0,002895551	250,175	91314,112	91,314
	Pleine charge	1,2	0,003257495	281,447	102728,376	102,728

6.2.1.2 Turbine GT2

Données :

Pression de sortie des gaz d'échappement : $P_{GT2(REG)} = 0,95 \text{ bar} = 9500\text{Pa}$

Température de sortie des gaz d'échappement : $T_{GT2(REG)} = 538^\circ\text{C} = 811,15 \text{ k}$

Résultats finaux du mapping du 07/01:

Tab 6-14 Teneurs en polluants en fonction du taux d'O₂ pour différents modes de flamme pour la turbine GT2 du REG

	Purge	O ₂ (%)	NO _x (ppm)	CO (ppm)
AB	Forte	15,7	29	9
	Moyenne	15,7	24	7
	Faible	15,6	23	17
	Poussée	15,3	26	8
ABC	Forte	15,3	16	4
	Moyenne	15	14,6	6,2
	Faible	14,9	14	6
	Pleine charge	14,9	22	5

Résultats :

$$Q_{GT2(REG)} = 9260009199\text{g.s}^{-1} = 926,001\text{Kg.s}^{-1}$$

Emissions en NOx :

Ta 6-15 Quantités de NOx émises par la Turbine GT2 du site REG

NOx						
	Purge	ppm	Kg.s ⁻¹	Kg.j ⁻¹	Kg.an ⁻¹	Tonne.an ⁻¹
AB	Forte	29	0,020835021	1800,145	657053,213	657,053
	Moyenne	24	0,037780838	3264,264	1191456,49	1191,456
	Faible	23	0,02990983	2584,209	943236,39	943,236
	Poussée	26	0,016575416	1432,115	522722,334	522,722
ABC	Forte	16	0,027317027	2360,191	861469,768	861,47
	Moyenne	14,6	0,021205421	1832,148	668734,159	668,734
	Faible	14	0,016668017	1440,116	525642,57	525,642
	Pleine charge	22	0,014167814	1224,01	446796,185	446,796

Emissions en CO :

Tab 6-16 Quantités de CO émises par la Turbine GT2 du site REG

CO						
	Purge	ppm	Kg.s ⁻¹	Kg.j ⁻¹	Kg.an ⁻¹	Tonne.an ⁻¹
AB	Forte	9	0,006204206	536,043	195655,846	195,655
	Moyenne	7	0,005556006	480,038	175214,19	175,214
	Faible	17	0,005370805	464,037	169373,717	169,373
	poussée	8	0,007778408	672,054	245299,866	245,300
ABC	Forte	4	0,003611404	312,025	113889,224	113,900
	Moyenne	6,2	0,003704004	320,026	116809,46	116,810
	Faible	6	0,002963203	256,020	93447,568	93,447
	Pleine charge	5	0,003333603	288,023	105128,514	105,128

6.2.3 Calcul des émissions annuelles de tout le site TEG et REG

6.2.1.3 Méthode de calcul

Nous allons maintenant considérer que le site du REG émet des gaz par une seule cheminée, puisque les deux turbines sont séparées par une distances de 20m (assez faible) et les fumées sont mélangées dans le site juste à la sortie de leurs cheminées respectives.

On prendra, pour cela, la moyenne des teneurs en ppm des différents polluants émis à partir des deux turbines. On multiplie ensuite cette moyenne par la somme des deux débits de sortie des gaz d'échappement :

$$Q = (Q_{GT1} + Q_{GT2}) \times T_{e\text{moy}}$$

$$T_{e\text{moy}} = \frac{T_{e1} + T_{e2}}{2}$$

➤ **TEG**

Teneurs moyennes en ppm :

Tab 6-17 Teneurs moyennes en polluants en fonction du taux d'O₂ pour différents modes de flamme pour le site TEG

	Purge	NO _x (ppm)	CO (ppm)
AB	Forte	22,2	9,7
	Moyenne	27,9	13,95
	Faible	20,1	6,3
	Poussée	14,6	13,25
ABC	Forte	23,7	14,05
	Moyenne	18,3	15,15
	Faible	14,25	11,6
	Pleine charge	15,55	3,9

Emissions en NO_x :

Tab 6-18 Quantités de NO_x émises par tout le site TEG

NO _x						
	Purge	Ppm	Kg.s ⁻¹	Kg.j ⁻¹	Kg.an ⁻¹	Tonne.an ⁻¹
AB	Forte	22,2	0,035782626	3091,618	1128440,89	1128,440
	Moyenne	27,9	0,044970057	3885,412	1418175,72	1418,175
	Faible	20,1	0,032397783	2799,168	1021696,48	1021,696
	Poussée	14,6	0,023532718	2033,226	742127,795	742,127
ABC	Forte	23,7	0,038200371	3300,512	1204686,9	1204,686
	Moyenne	18,3	0,029496489	2548,496	930201,277	930,201
	Faible	14,25	0,022968578	1984,485	724337,06	724,337
	Pleine charge	15,55	0,025063957	2165,525	790416,932	790,417

Emissions en CO :

Tab 6-19 Quantités de CO émises par tout le site TEG

CO						
	Purge	ppm	Kg.s ⁻¹	Kg.j ⁻¹	Kg.an ⁻¹	Tonne.an ⁻¹
AB	Forte	9,7	0,015634751	1350,842	493057,508	493,057
	Moyenne	13,95	0,022485029	1942,706	709087,859	709,087
	Faible	6,3	0,010154529	877,351	320233,227	320,233
	Poussée	13,25	0,021356748	1845,223	673506,389	673,506
	ABC	Forte	14,05	0,022646212	1956,632	714170,926
	Moyenne	15,15	0,024419225	2109,821	770084,664	770,084
	Faible	11,6	0,018697228	1615,440	589635,782	589,635
	Pleine charge	3,9	0,006286137	543,122	198239,616	198,240

➤ **REG**

Teneurs moyennes en ppm :

Tab 6-20 Teneurs moyennes en polluants en fonction du taux d'O₂ pour différents modes de flamme pour le site REG

	Purge	NO _x (ppm)	CO (ppm)
AB	Forte	27	19
	Moyenne	23,5	18,5
	Faible	21,5	24,5
	Poussée	24,5	7,5
ABC	Forte	18	14
	Moyenne	15,2	12,05
	Faible	14,1	11,15
	Pleine charge	21,1	3,1

Emissions en NO_x :

Tab 6-21 Quantités de NO_x émises par tout le site REG

NO _x						
	Purge	Ppm	Kg.s ⁻¹	Kg.j ⁻¹	Kg.an ⁻¹	Tonne.an ⁻¹
AB	Forte	27	0,049433247	4271,0325	1558926,88	1558,926
	Moyenne	23,5	0,043025234	3717,380	1356843,76	1356,843

	Faible	21,5	0,039363512	3401,007	1241367,7	1241,367
	Poussée	24,5	0,044856095	3875,566	1414581,8	1414,581
ABC	Forte	18	0,032955498	2847,355	1039284,58	1039,284
	Moyenne	15,2	0,027829087	2404,433	877618,094	877,6180
	Faible	14,1	0,02581514	2230,428	814106,258	814,106
	Pleine charge	21,1	0,038631167	3337,732	1218272,49	1218,272

Emissions en CO :

Tab 6-22 Quantités de CO émises par tout le site REG

CO						
	Purge	ppm	Kg.s ⁻¹	Kg.j ⁻¹	Kg.an ⁻¹	Tonne.an ⁻¹
AB	Forte	19	0,034786359	3005,541	1097022,62	1097,022
	Moyenne	18,5	0,033870929	2926,448	1068153,6	1068,153
	Faible	24,5	0,044856095	3875,566	1414581,8	1414,581
	Poussée	7,5	0,013731458	1186,397	433035,244	433,035
	ABC	Forte	14	0,025632054	2214,609	808332,455
	Moyenne	12,05	0,022061875	1906,146	695743,292	695,743
	Faible	11,15	0,0204141	1763,778	643779,062	643,780
	Pleine charge	3,1	0,005675669	490,377	178987,901	178,987

➤ **Ensemble des deux sites :**

Méthode de calcul :

Nous calculons, enfin, la somme des quantités de NOx et de CO émises par les deux sites TEG et REG de In Salah Gaz.

Emissions en NOx :

Tab 6-23 Quantités de NOx émises par l'ensemble des deux sites TEG et REG

NOx					
AB	Purge	Kg.s ⁻¹	Kg.j ⁻¹	Kg.an ⁻¹	Tonne.an ⁻¹
	Forte	0,085215873	7362,651	2687367,77	2687,367
	Moyenne	0,087995291	7602,793	2775019,48	2775,019
	Faible	0,071761295	6200,175	2263064,18	2263,064

	Poussée	0,068388813	5908,793	2156709,59	2156,709
ABC	Forte	0,071155869	6147,867	2243971,48	2243,971
	Moyenne	0,057325576	4952,929	1807819,37	1807,819
	Faible	0,048783718	4214,913	1538443,32	1538,443
	Pleine charge	0,063695124	5503,258	2008689,42	2008,689

Emissions en CO :

Tab 6-24 Quantités de CO émises par l'ensemble des deux sites TEG et REG

CO					
	Purge	Kg.s ⁻¹	Kg.j ⁻¹	Kg.an ⁻¹	Tonne.an ⁻¹
AB	Forte	0,05042111	4356,384	1590080,12	1590,080
	Moyenne	0,056355957	4869,154	1777241,46	1777,241
	Faible	0,055010624	4752,917	1734815,02	1734,815
	poussée	0,035088205	3031,620	1106541,63	1106,541
	ABC	Forte	0,048278266	4171,242	1522503,38
	Moyenne	0,0464811	4015,967	1465827,96	1465,828
	Faible	0,039111328	3379,218	1233414,84	1233,414
	Pleine charge	0,011961806	1033,500	377227,517	377,227

6.3 Calcul de la dispersion

L'étude de la dispersion permet de déterminer la teneur en polluant NOx et CO dans l'air ambiant à différents distances de la source polluante. Cela permet par exemple de déterminer si en un point donné, la population est exposée à un taux élevé ou non de polluant.

6.3.1 Modèle de Gauss

Lors de notre étude, nous allons utiliser le modèle de Gauss comme méthode de calcul, une méthode qui est de plus en plus utilisée et connue pour ses bons résultats.

En mettant comme hypothèse que la distribution de la concentration des gaz polluants dans le panache est gaussienne dans les deux plans horizontal et vertical (figure 6-1), l'équation qui permet d'exprimer les concentrations des polluants dans l'espace suivant leur dispersion, pour une source ponctuelle émettant en continu est :

$$C(x,y,z,H) = \frac{Q}{2\pi(\sigma_z)(\sigma_y)U} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \text{(A)}$$

- Q : débit d'émission du polluant à la source en g/s

- H : hauteur effective de la cheminée en m
- σ_y et σ_z : dimensions latérale et verticale du panache en m
- U : vitesse du vent en m/s
- C : Concentration du polluant au point (x, y, z) en g/m^3

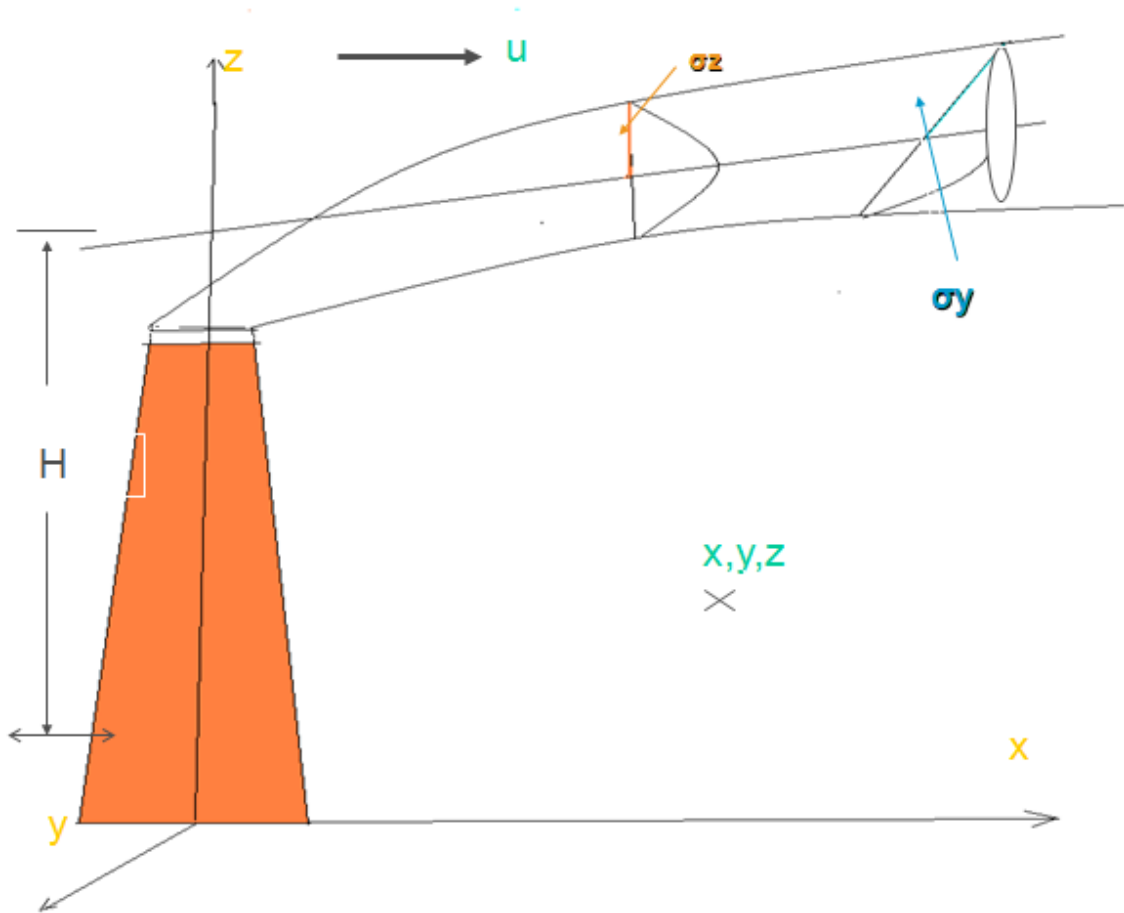


Fig. 6-1 Panache de fumée (distribution gaussienne) [69].

Nous calculerons, dans ce travail, les paramètres σ_y et σ_z selon une méthode donnée par Pasquill.

6.3.2 Classes de stabilité atmosphérique selon Pasquill

La méthode de Pasquill dépend de la stabilité atmosphérique (vent, radiations solaires et nébulosité). Il faudra donc, dans un premier temps, identifier la classe de stabilité sur laquelle on travaille. Ceci est illustré dans le tableau suivant :

Tab 6-25 Classes de stabilité atmosphérique de Pasquill [69]

Vitesse du vent de surface (10m du sol) (m/s)	Ensoleillement			Nuit	
	Fort	Modéré	Faible	Densité de nuage > 4/8 (nuageux)	Densité de nuage < 3/8
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Lorsque le ciel est entièrement couvert (généralement 1 heure avant le lever du jour et 1h après le coucher du soleil), la stabilité atmosphérique est classée D quelque soit la vitesse du vent (classe de stabilité neutre).

La nuit est comptée à partir de 1h après le coucher du soleil jusqu'à 1 heure avant le lever du jour.

Pour ce qui est de l'ensoleillement, il est déterminé en fonction du mois et du moment dans la journée. L'intensité du rayonnement incident pour la région d'In Salah pour une journée totalement dégagée, dans ce travail, est obtenue par des données du CDER.

L'ensoleillement désigne les radiations solaires exprimées en $mW.cm^{-2}$. Généralement on a un ensoleillement :

- **Fort** lorsqu'il est $\geq 60 mW.cm^{-2}$
- **Modéré** lorsqu'il est compris entre : 30 et $60 mW.cm^{-2}$
- **Faible** lorsqu'il est $\leq 30mW.cm^{-2}$

Une fois trouvé l'intensité du rayonnement solaire pour un ciel dégagé, on multiplie par un facteur de correction qu'on détermine à partir du tableau suivant :

Tab 6-26 Réduction du rayonnement solaire entrant par les nuages [69]

Quantité de nuages (octa)	Fraction à multiplier
0	1,07
1	0,39
2	0,31
3	0,76
4	0,72
5	0,67
6	0,59
7	0,45
8	0,23











Symbole	Nombre d'octas	
	0	Ciel dégagé
	1	
	2	
	3	
	4	Ciel à moitié couvert
	5	
	6	
	7	
	8	Ciel couvert
	(9)	Ciel obscurci par une obstruction à la visibilité

Fig. 6-2 Détermination du nombre d'octas en fonction des symboles [70].

6.2.1.4 Paramètres de diffusion de Pasquill

On peut calculer les dimensions σ_y et σ_z comme suit :

$$\sigma_y = a x^{0,903} \sigma_z = b x^c$$

a, b, c sont appelés paramètres de diffusion de Pasquill. Ils dépendent de la distance x et de la stabilité atmosphérique. (Voir tableau)

Tab. 6-27 Paramètres de diffusion de Pasquill. [69].

Classe	a	$x \leq x_1$		x_1 (m)	$x_1 \leq x \leq x_2$		x_2	$x \geq x_2$	
		B	c		b	c		B	c
A	0,40	0,125	1,03	250	0,00833	1,51	5000	$2,26 \cdot 10^{-4}$	2,10
B	0,295	0,119	0,986	1000	0,0579	1,09	10000	0,0579	1,09
C	0,20	0,111	0,911	1000	0,111	0,911	10000	0,111	0,91
D	0,13	0,105	0,827	1000	0,392	0,631	10000	0,948	0,54
E	0,098	0,100	0,778	1000	0,373	0,587	10000	2,85	0,30

6.3.3 Conditions météorologiques choisies

Pour le calcul des concentrations en polluants, nous avons choisi les dates et heures suivantes :

➤ **Judi 26 avril 2019 à 17 heures :**


Heure	Temps	Température	Biométeo	Pluie	Humidité	Pt. de rosée	Vent moyen (raf.)	Pression	Visibilité
17h		36,4 °C	36,4		9%	-15 °C	11 km/h	1010,8 hPa	19 km

Fig. 6-3 Relevé météorologique du 26/04/2019 à 17h [71].

- Vitesse du vent : $U=11\text{ km/h}=3,05556\text{ m/s}$
- Ensoleillement pour un ciel dégagé : $27,9\text{ mW/cm}^2$ [72].
- Quantité de nuages : 3octas Donc on la fraction à multiplier est : $0,76$
- Ensoleillement = $27,9 \times 0,76 = 21,204\text{ mW/cm}^2$. Cette valeur est inférieure à 30, l'ensoleillement est donc faible.

Vitesse du vent de surface (10m du sol) (m/s)	Ensoleillement			Nuit	
	Fort	Modéré	Faible	Densité de nuage > 4/8 (nuageux)	Densité de nuage < 3/8
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

On est donc dans la **classe C**

➤ **Mercredi 25 avril 2019 à 13 heures :**

Heure	Temps	Température	Pluie	Humidité	Pt. de rosée	Vent moyen (raf.)	Pression	Visibilité
13h		33 °C			4 °C	26 km/h	1015hPa	10 km

Fig. 6-4 Relevé météorologique du 25/04/2019 à 13h [71].

- Vitesse du vent : $U=26\text{ km/h}=7,22222\text{ m/s}$
- Ensoleillement pour un ciel dégagé : $100,4\text{ mW/cm}^2$ [72]
- Quantité de nuages : 2octas Donc on la fraction à multiplier est : $0,31$
- Ensoleillement = $100,4 \times 0,31 = 31,124\text{ mW/cm}^2$. Cette valeur est entre 30 et 60 mW/cm^2 , l'ensoleillement est donc modéré.

Vitesse du vent de surface (10m du sol) (m/s)	Ensoleillement			Nuit	
	Fort	Modéré	Faible	Densité de nuage > 4/8 (nuageux)	Densité de nuage < 3/8
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

On est donc dans la **classe D**

➤ **Mercredi 22 mai 2019 à 16 heures:**

Heure	Temps	Température	Biométéo	Pluie	Humidité	Pt. de rosée	Vent moyen (raf.)	Pression	Visibilité
16h		34 °C				13 °C	9 km/h	1009hPa	8 km

Fig. 6-5 Relevé météorologique du 22/05/2019 à 16h [71].

- Vitesse du vent : $U=9 \text{ km/h}=2,5 \text{ m/s}$
- Ensoleillement pour un ciel dégagé: $54,2 \text{ mW/cm}^2$ [72].
- Quantité de nuages : 5 octas Donc on la fraction à multiplier est : 0,67
- Ensoleillement = $54,2 \times 0,67 = 36,314 \text{ mW/cm}^2$. Cette valeur est entre 30 et 60 mW/cm^2 , l'ensoleillement est donc modéré.

Vitesse du vent de surface (10m du sol) (m/s)	Ensoleillement			Nuit	
	Fort	Modéré	Faible	Densité de nuage > 4/8 (nuageux)	Densité de nuage < 3/8
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

On est donc dans la **classe B**

➤ **Dimanche 9 juin 2019 A 15 heures :**

Heure	Temps	Température	Pluie	Vent moyen (raf.)	Pression	Visibilité
15h		45 °C		4 km/h	1012hPa	8 km

Fig. 6-6 Relevé météorologique du 09/06/2019 à 15h [71].

- Vitesse du vent : $U=4 \text{ km/h}=1,111 \text{ m/s}$
- Ensoleillement pour un ciel dégagé : 743 mW/cm^2 [72]
- Quantité de nuages : 0 octas Donc on la fraction à multiplier est : 1,07
- Ensoleillement = $743 \times 1,07 = 795,01 \text{ mW/cm}^2$. Cette valeur est supérieure à 60 mW/cm^2 , l'ensoleillement est donc fort.

Vitesse du vent de surface (10m du sol) (m/s)	Ensoleillement			Nuit	
	Fort	Modéré	Faible	Densité de nuage > 4/8 (nuageux)	Densité de nuage < 3/8
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

On est donc dans la classe A

6.3.4 Calcul des concentrations en polluants à des distances éloignées de la source

Comme vu précédemment, nous allons utiliser l'équation (A) afin de calculer les concentrations en polluants pour plusieurs distances x données.

Dans notre étude, nous allons suivre la variation des concentrations maximales dans le cas particulier où :

- Au niveau du sol : c'est-à-dire z=0
- Juste en dessous de l'axe de panache : y=0

L'équation de Gauss devient donc de la forme suivante :

$$C(x,0,0,H) = \frac{Q}{\pi(\sigma_z)(\sigma_y)U} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (A1)$$

Pour toutes les turbines sur lesquelles nous allons travailler, la hauteur du cheminée H=2m500.

Calcul de σ_z et σ_y :

Tab 6-28 Valeurs de σ_y pour toutes les classes atmosphériques étudiées et pour des distances différentes à partir de la source

X (m)		25	50	75	100	1000	1500	2000	5000
σ_y	Classe A	7,318	13,684	19,735	25,589	204,67 2	295,16 8	382,72 7	875,44 7
	Classe B	5,3971 17	10,092 34	14,554 67	18,872 18	150,94 61	217,68 7	282,26 18	645,64 22
	Classe C	3,6590 62	6,8422 65	9,8675 72	12,794 7	102,33 64	147,58 44	191,36 39	437,72 35
	Classe D	2,3783 91	4,4474 72	6,4139 22	8,3165 53	66,518 64	95,929 85	124,38 66	284,52 03
	Classe E	1,7929 41	3,3527 1	4,8351 1	6,2694 01	50,144 82	72,316 35	93,768 33	214,48 45

X (m)		7500	10000	15000	20000	25000	30000	40000	60000
σ_y	Classe A	1262,5 26	1637,0 43	2360,8 61	3061,1 89	3744,5 52	4414,6 93	5724,2 71	8255,2 56
	Classe B	931,11 29	1207,3 19	1741,1 35	2257,6 27	2761,6 07	3255,8 36	4221,6 5	6088,2 52
	Classe C	631,26 3	818,52 13	1180,4 3	1530,5 94	1872,2 76	2207,3 46	2862,1 35	4127,6 28
	Classe D	410,32 09	532,03 89	767,27 98	994,88 63	1216,9 79	1434,7 75	1860,3 88	2682,9 58
	Classe E	309,31 89	401,07 54	578,41 09	749,99 12	917,41 51	1081,6	1402,4 46	2022,5 38

Tab 6-29 Valeurs de σ_z pour toutes les classes atmosphériques étudiées et pour des distances différentes à partir de la source

X (m)		25	50	75	100	1000	1500	2000	5000
σ_z	Classe A	3,4418 21	7,0282 81	10,671 44	14,351 92	282,25 72	520,64 63	803,89 68	3206,9 32
	Classe B	2,8439 1	5,6328 91	8,4015 1	11,156 99	221,58 84	167,73 28	229,50 98	623,09 73
	Classe C	2,0837 53	3,9181 82	5,6689 65	7,3675 48	60,023 73	86,844 46	112,86 55	260,06 66
	Classe D	1,5041 31	2,6683 17	3,7313 41	4,7335 75	8,2070 92	39,573 06	47,449 98	84,593 33
	Classe E	1,2234 81	2,0979 67	2,8760 58	3,5974 93	5,7676 65	27,294 45	32,315 69	55,335 55

X (m)		7500	10000	15000	20000	25000	30000	40000	60000
σ_z	Classe A	31026, 81	56768, 63	13301 4,8	24337 2,5	38885 0,3	57024 7,1	10433 61	24447 03
	Classe B	969,38 29	1326,4 12	2063,5 64	2823,5 88	3601,0 83	4392,7 93	6010,6 85	9351,1 16
	Classe C	376,27 36	489,01 59	700,75 47	910,45 88	1115,4 46	1316,7 5	1710,7 93	2474,2 33
	Classe D	109,25 71	131,00 45	170,56 8	199,23 45	224,74 81	248,00 12	289,68 15	360,58 7
	Classe E	70,205 28	83,120 63	51,011 99	55,610 12	59,460 27	62,803 12	68,464 09	77,319 71

6.2.1.5 Site du TEG

➤ **Données :**

Débit de NOx (en mode pleine charge) = 0,0250647Kg.s-1= 25,064g.s-1

Débit de CO (en mode pleine charge) = 0,006286Kg.s-1 = 6,286g.s-1

➤ **Résultats des concentrations :**

✚ Application numérique :

✚ **Pour les NOx :**

Tab 6-30 Concentrations des NOx à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques pour le site TEG

x(m)		25	50	75	100	1000	1500	2000	5000
C(x, 0,0, H) (g/m ³)	Class e A	1,497 .10 ⁻¹⁰	4,444 .10 ⁻⁴	3,694 .10 ⁻³	5,724 .10 ⁻³	1,24 .10 ⁻⁴	4,67 .10 ⁻⁵	2,33 .10 ⁻⁵	2,56 .10 ⁻⁶
	Class e B	5,320 .10 ⁻¹⁵	1,926 .10 ⁻⁵	7,234 .10 ⁻⁴	1,985 .10 ⁻³	9,5 .10 ⁻⁵	8,67 .10 ⁻⁵	4,91 .10 ⁻⁵	7,93 .10 ⁻⁶
	Class e C	1,648 .10 ⁻²⁶	6,731 .10 ⁻⁹	1,772 .10 ⁻⁵	2,61 .10 ⁻⁴	3,96 .10 ⁻⁴	1,97 .10 ⁻⁴	1,19 .10 ⁻⁴	2,29 .10 ⁻⁵
	Class e D	7,938 .10 ⁻⁵	3,382 .10 ⁻¹⁷	5,871 .10 ⁻¹⁰	3,48 .10 ⁻⁷	4,72 .10 ⁻⁵	2,48 .10 ⁻⁴	1,67 .10 ⁻⁴	4,43 .10 ⁻⁵

x(m)		7500	10³	15. 10³	20. 10³	25. 10³	30. 10³	40. 10³	60. 10³	80. 10³
C(x, 0,0, H) (g/m ³)	Class e A	1,8 .10 ⁻⁷	7,73 .10 ⁻⁸	2,29 .10 ⁻⁸	9,64 .10 ⁻⁹	4,93 .10 ⁻⁹	2,85 .10 ⁻⁹	1,2 .10 ⁻⁹	3,56 .10 ⁻¹⁰	1,5 .10 ⁻¹⁰
	Class e B	3,54 .10 ⁻⁶	1,99 * .10 ⁻⁷	8,89 .10 ⁻⁷	5,01 .10 ⁻⁷	3,21 .10 ⁻⁷	2,23 .10 ⁻⁷	1,26 .10 ⁻⁷	5,61 .10 ⁻⁸	3,16 .10 ⁻⁸
	Class e C	1,1 .10 ⁻⁵	6,52 .10 ⁻⁶	3,16 .10 ⁻⁶	1,87 .10 ⁻⁶	1,25 .10 ⁻⁶	8,99 .10 ⁻⁷	5,33 .10 ⁻⁷	2,56 .10 ⁻⁷	1,52 .10 ⁻⁷
	Class e D	2,41 .10 ⁻⁵	1,56 .10 ⁻⁵	8,37 .10 ⁻⁶	5,54 .10 ⁻⁶	4,02 .10 ⁻⁶	3,09 .10 ⁻⁶	2,04 .10 ⁻⁶	1,14 .10 ⁻⁶	7,53 .10 ⁻⁷

Les résultats obtenus sont illustrés graphiquement en figure 6-7

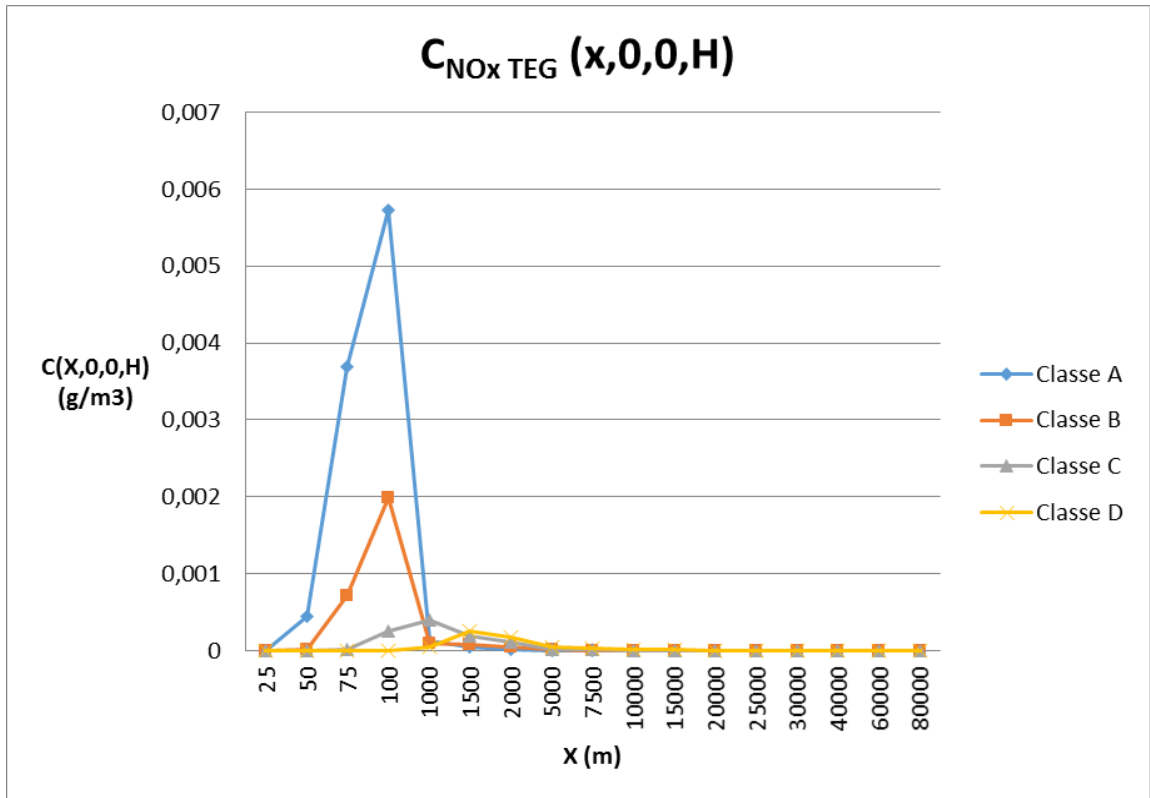


Fig. 6-7 Concentrations des NOx à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques pour le site TEG

➤ Résultats des concentrations :

✚ Pour tout le CO :

Tab 6-31 Concentrations du CO à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques pour le site TEG

X(m)		25	50	75	100	1000	1500	2000	5000
C(x, 0, 0, H) (g/m ³)	Class e A	3,755 .10 ⁻¹¹	1,114 .10 ⁻⁴	9,266 .10 ⁻⁴	1,436 .10 ⁻³	3,11 .10 ⁻⁵	1,17 .10 ⁻⁵	5,85 .10 ⁻⁶	6,42 .10 ⁻⁷
	Class e B	1,334 .10 ⁻¹⁵	4,832 .10 ⁻⁶	1,814 .10 ⁻⁴	4,98 .10 ⁻⁴	2,38 .10 ⁻⁵	2,17 .10 ⁻⁵	1,23 .10 ⁻⁵	1,99 .10 ⁻⁶
	Class e C	4,133 .10 ⁻²⁷	1,688 .10 ⁻⁹	4,446 .10 ⁻⁶	6,56 .10 ⁻⁵	9,94 .10 ⁻⁵	4,94 .10 ⁻⁵	2,97 .10 ⁻⁵	5,73 .10 ⁻⁶
	Class e D	1,991 .10 ⁻⁵⁰	8,482 .10 ⁻¹⁸	1,472 .10 ⁻¹⁰	8,74 .10 ⁻⁸	1,18 .10 ⁻⁵	6,21 .10 ⁻⁵	4,2 .10 ⁻⁵	1,11 .10 ⁻⁵

X (m)		7500	10 ³	15. 10 ³	20. 10 ³	25. 10 ³	30. 10 ³	40. 10 ³	60. 10 ³	80. 10 ³
C(x, 0, 0, H)	Class e A	4,6 .10 ⁻⁸	1,94 .10 ⁻⁸	5,74 .10 ⁻⁹	2,42 .10 ⁻⁹	1,24 .10 ⁻⁹	7,16 .10 ⁻¹⁰	3,02 .10 ⁻¹⁰	8,93 .10 ⁻¹¹	3,76 .10 ⁻¹¹

(g/m ³)	Class e B	8,87 .10 ⁻⁷	5 .10 ⁻⁷	2,23 .10 ⁻⁷	1,26 .10 ⁻⁷	8,05 .10 ⁻⁸	5,6 .10 ⁻⁸	3,16 .10 ⁻⁸	1,41 .10 ⁻⁸	7,93 .10 ⁻⁹
	Class e C	2,75 .10 ⁻⁶	1,64 .10 ⁻⁶	7,92 .10 ⁻⁷	4,7 .10 ⁻⁷	3,14 .10 ⁻⁷	2,25 .10 ⁻⁷	1,34 .10 ⁻⁷	6,42 .10 ⁻⁸	3,81 .10 ⁻⁸
	Class e D	6,05 .10 ⁻⁶	3,92 .10 ⁻⁶	2,1 .10 ⁻⁶	1,39 .10 ⁻⁶	1,01 .10 ⁻⁶	7,76 .10 ⁻⁷	5,13 .10 ⁻⁷	2,86 .10 ⁻⁷	1,89 ^E .10 ⁻⁷

Les résultats obtenus sont illustrés graphiquement en figure 6-8

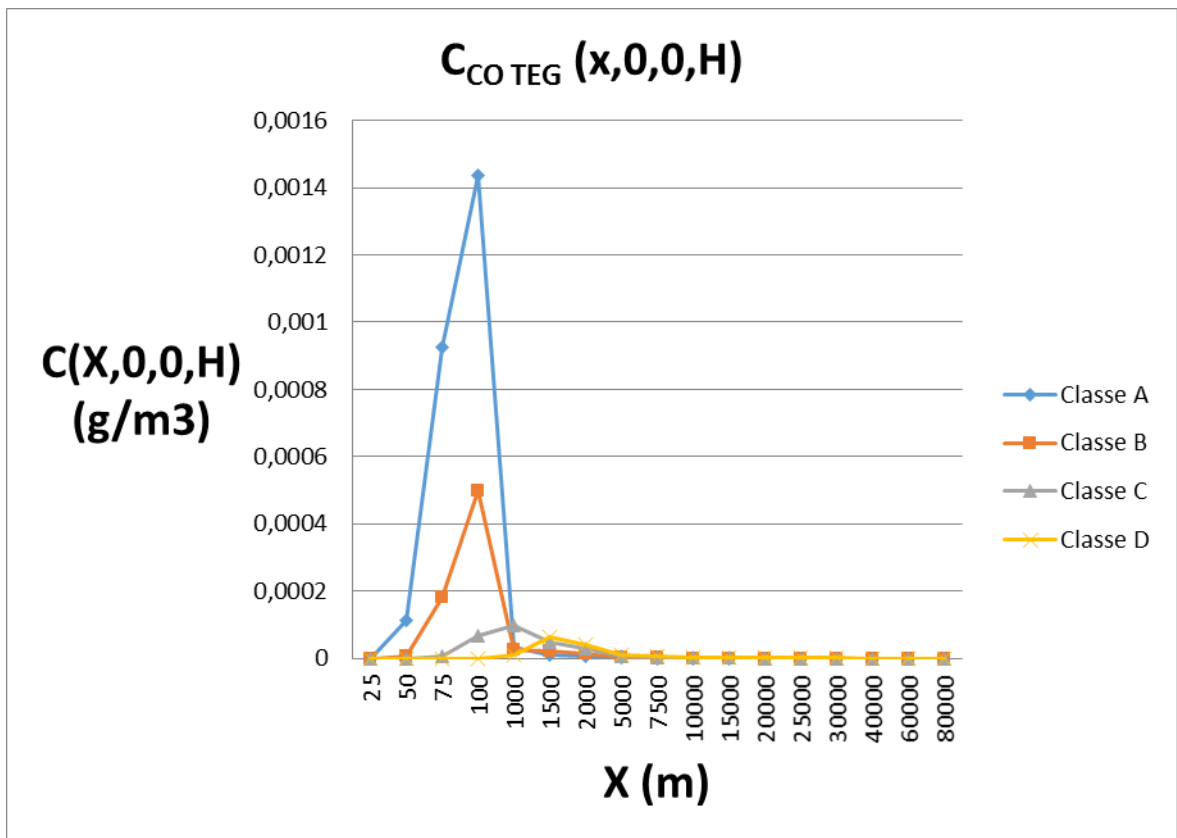


Fig. 6-8 Concentrations du CO à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques pour le site TEG

6.2.1.6 Site du REG

➤ **Données :**

Débit de NO_x (en mode pleine charge) = 0,038631Kg.s⁻¹ = 38,631g.s⁻¹

Débit de CO (en mode pleine charge) = 0,005675Kg.s⁻¹ = 5,675g.s⁻¹

➤ **Résultats des concentrations :**

✚ **Pour les NO_x :**

Tab 6-32 Concentrations des NOx à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques pour le site REG

X (m)		25	50	75	100	1000	1500	2000	5000
C(x, 0,0, H) (g/m ³)	Classe A	2,307 .10 ⁻¹⁰	6,850 .10 ⁻⁴	5,694 .10 ⁻³	8,822 .10 ⁻³	1,91 .10 ⁻⁴	7,2 .10 ⁻⁵	3,6 .10 ⁻⁵	3,94 .10 ⁻⁶
	Classe B	8,200 .10 ⁻¹⁵	2,969 .10 ⁻⁵	1,115 .10 ⁻³	3,059 .10 ⁻³	1,46 .10 ⁻⁴	1,34 .10 ⁻⁴	7,56 .10 ⁻⁵	1,22 .10 ⁻⁵
	Classe C	2,540 .10 ⁻²⁶	1,037 .10 ⁻⁸	2,732 .10 ⁻⁵	4,03 .10 ⁻⁴	6,11 .10 ⁻⁴	3,04 .10 ⁻⁴	1,83 .10 ⁻⁴	3,52 .10 ⁻⁵
	Classe D	1,223 .10 ⁻⁴⁹	5,213 .10 ⁻¹⁷	9,050 .10 ¹⁰	5,37 .10 ⁻⁷	7,28 .10 ⁻⁵	3,82 .10 ⁻⁴	2,58 .10 ⁻⁴	6,83 .10 ⁻⁵

X (m)		7500	10³	15. 10³	20. 10³	25. 10³	30. 10³	40. 10³	60. 10³	80. 10³
C(x, 0,0, H) (g/m ³)	Class e A	2,83 .10 ⁻⁷	1,19 .10 ⁻⁷	3,53 .10 ⁻⁸	1,49 .10 ⁻⁸	7,6 .10 ⁻⁹	4,4 .10 ⁻⁹	1,85 .10 ⁻⁹	5,49 .10 ⁻¹⁰	2,31 .10 ⁻¹⁰
	Class e B	5,45 .10 ⁻⁶	3,07 .10 ⁻⁶	1,37 .10 ⁻⁶	7,72 .10 ⁻⁷	4,95 .10 ⁻⁷	3,44 .10 ⁻⁷	1,94 .10 ⁻⁷	8,64 .10 ⁻⁸	4,87 .10 ⁻⁸
	Class e C	1,69 .10 ⁻⁵	1 .10 ⁻⁵	4,87 .10 ⁻⁶	2,89 .10 ⁻⁶	1,93 .10 ⁻⁶	1,39 .10 ⁻⁶	8,22 .10 ⁻⁷	3,94 .10 ⁻⁷	2,34 .10 ⁻⁷
	Class e D	3,72 .10 ⁻⁵	2,41 .10 ⁻⁵	1,29 .10 ⁻⁵	8,54 .10 ⁻⁶	6,2 .10 ⁻⁶	4,77 .10 ⁻⁶	3,15 .10 ⁻⁶	1,76 .10 ⁻⁶	1,16 .10 ⁻⁶

Les résultats obtenus sont illustrés graphiquement en figure 6-9

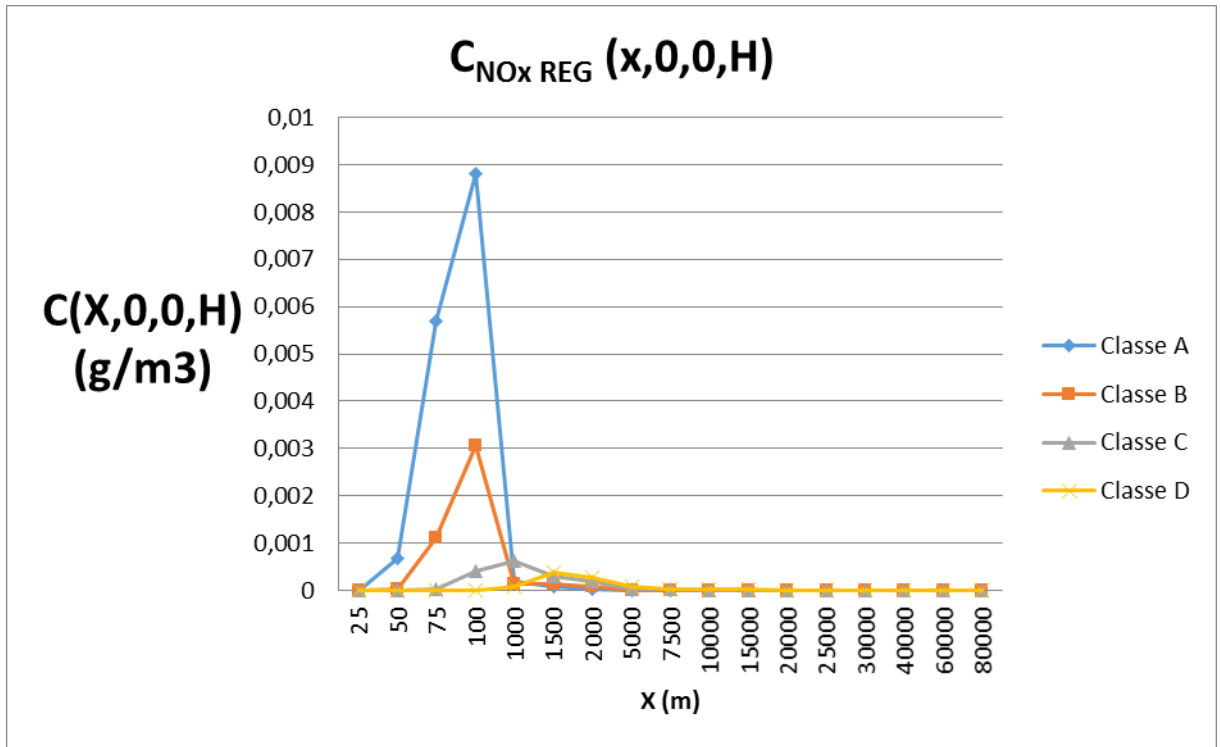


Fig. 6-9 Concentrations des NOx à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques pour le site REG

➤ Résultats des concentrations :

✚ Pour tout le CO

Tab 6-33 Concentrations du CO à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques le site de REG

X (m)		25	50	75	100	1000	1500	2000	5000
$C(x,0,0,H)$ (g/m ³)	Classe A	3,390 .10 ⁻¹¹	1,006 .10 ⁻⁴	8,366 .10 ⁻⁴	1,296 .10 ⁻³	2,81 ^E .10 ⁻⁵	1,06 .10 ⁻⁵	5,29 .10 ⁻⁶	5,79 .10 ⁻⁷
	Classe B	1,204 .10 ⁻¹⁵	4,363 .10 ⁻⁶	1,638 .10 ⁻⁴	4,49 .10 ⁻⁴	2,15 .10 ⁻⁵	1,96 .10 ⁻⁵	1,11 .10 ⁻⁵	1,8 .10 ⁻⁶
	Classe C	3,731 .10 ⁻²⁷	1,524 .10 ⁻⁹	4,014 .10 ⁻⁶	5,92 .10 ⁻⁵	8,98 .10 ⁻⁵	4,46 .10 ⁻⁵	2,69 .10 ⁻⁵	5,18 .10 ⁻⁶
	Classe D	1,797 .10 ⁻⁵⁰	7,658 .10 ⁻¹⁸	1,329 .10 ⁻¹⁰	7,89 .10 ⁻⁸	1,07 .10 ⁻⁵	5,61 .10 ⁻⁵	3,79 .10 ⁻⁵	1 .10 ⁻⁵

X (m)		7500	10 ³	15. 10 ³	20. 10 ³	25. 10 ³	30. 10 ³	40. 10 ³	60. 10 ³	80. 10 ³
$C(x,0,0,H)$ (g/m ³)	Class e A	4,15 .10 ⁻⁸	1,75 .10 ⁻⁸	5,18 .10 ⁻⁹	2,18 .10 ⁻⁹	1,12 .10 ⁻⁹	6,46 .10 ⁻¹⁰	2,72 .10 ⁻¹⁰	8,06 .10 ⁻¹¹	3,4 .10 ⁻¹¹
	Class	8,01	4,51	2,01	1,13	7,27	5,06	2,85	1,27	7,16

	e B	.10 ⁻⁷	.10 ⁻⁷	.10 ⁻⁷	.10 ⁻⁷	.10 ⁻⁸	.10 ⁻⁸	.10 ⁻⁸	.10 ⁻⁸	.10 ⁻⁹
	Class e C	2,49	1,48	7,15	4,24	2,83	2,03	1,21	5,79	3,44
	e D	.10 ⁻⁶	.10 ⁻⁶	.10 ⁻⁷	.10 ⁻⁷	.10 ⁻⁷	.10 ⁻⁷	.10 ⁻⁷	.10 ⁻⁸	.10 ⁻⁸
	Class e D	5,47	3,54	1,9	1,25	9,1	7	4,63	2,58	1,71
		.10 ⁻⁶	.10 ⁻⁶	.10 ⁻⁶	.10 ⁻⁶	.10 ⁻⁷	.10 ⁻⁷	.10 ⁻⁷	.10 ⁻⁷	.10 ⁻⁷

Les résultats obtenus sont illustrés graphiquement en figure 6-10

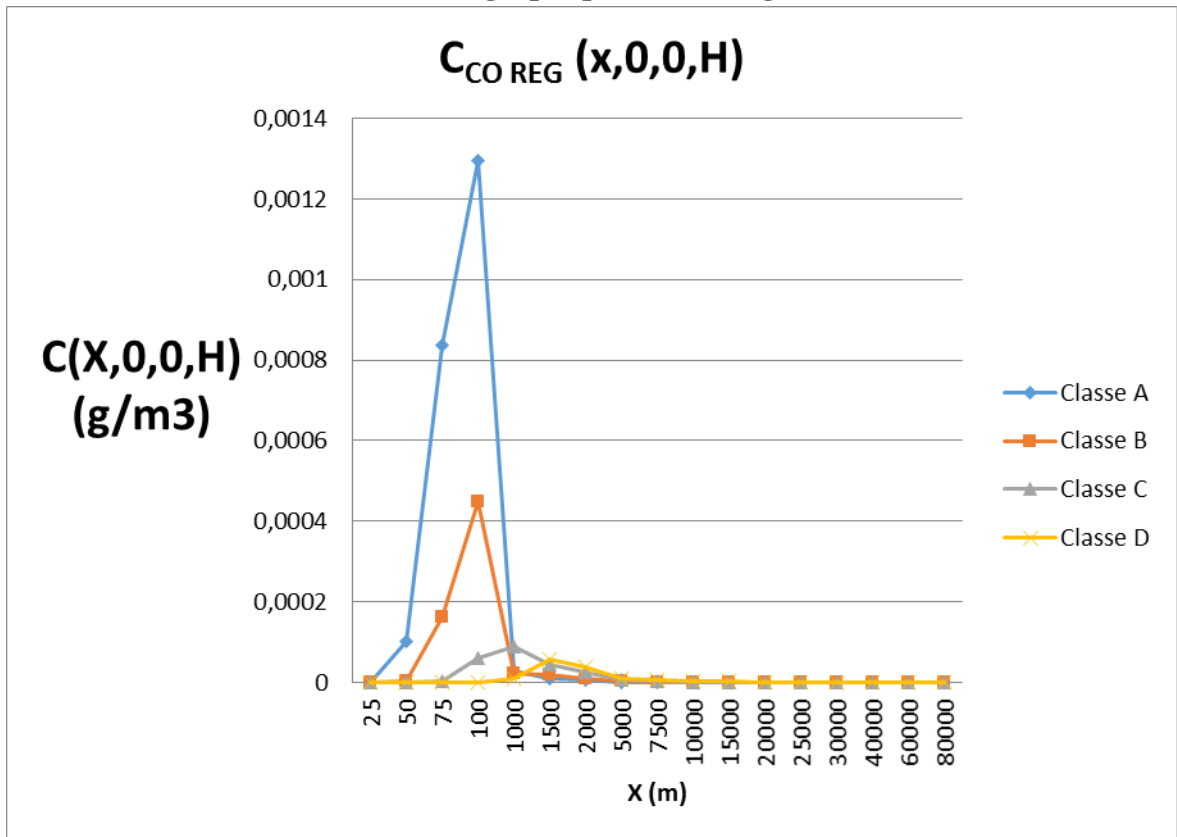


Fig. 6-10 Concentrations du CO à différentes distances x de la source et pour différentes classes atmosphériques pour le site REG

6.4 Discussion et interpretation

6.4.1 Emissions annuelles en polluants

➤ **Par mode de flamme :**

Les tableaux obtenus dans le point 6.2 représentent les émissions minimales pour chaque mode, après avoir effectué l'opération de mapping de la machine, et donc optimisation des paramètres permettant de trouver une plage d'opération où les vibrations acoustiques et les émissions sont moindres.

Le mode de flamme et l'intensité de la purge dépendront de la demande en production, mais souvent, les turbines des deux sites Reg et Teg fonctionnent en pleine charge du mode ABC du fait que la demande soit grande. En effet, lorsque la demande n'est pas élevée, mieux vaudra diminuer la charge (taux de carburant notamment) afin de minimiser la consommation. Il serait alors préférable, comme nous l'avons fait, d'avoir une idée précise sur les paramètres

optimaux de chaque mode.

Les résultats des émissions horaires, journalières, mensuelles et annuelles obtenues permettront donc d'avoir une visibilité sur les quantités émises pour chaque mode, et pourront aider à choisir éventuellement une turbine par rapport à une autre pour l'application d'un mode donné (sur un même site). Cependant, ces valeurs restent approximatives, et nous n'avons pas pu obtenir des données exactes sur une émission annuelle d'une machine, puisque les variations sur les modes de flamme et l'intensité de purge ne sont pas notées en permanence (par le client). Nous supposons donc parfois que la turbine fonctionne en pleine charge, comme c'est souvent le cas.

➤ Turbine GT1 TEG :

Pour la turbine GT1 du Teg, les émissions en NO_x en mode pleine charge sont les plus faibles (environ 390 tonnes annuellement si on suppose que la machine fonctionne sur ce mode toute l'année), ce mode est donc idéal pour la GT1 en matière d'émissions en NO_x. Nous avons, cependant, quelques modes où le seuil de NO_x (25ppm) est dépassé. C'est le cas pour une purge forte en mode ABC (29,5ppm) mais aussi pour une purge moyenne ou faible du mode AB où les teneurs en NO_x atteignent 40,8ppm et 32,3ppm respectivement.

Pour le CO, les valeurs des émissions sont acceptables (un maximum de 8,4ppm) et sont pratiquement les plus faibles en pleine charge du mode ABC.

Nous pouvons donc conclure que si la GT1 fonctionne en pleine charge la quasi-totalité du temps, cela serait le plus bénéfique en terme de minimisation des émissions et de respect de l'environnement.

➤ Turbine GT2 TEG :

Pour cette turbine, les émissions en NO_x sont nettement plus faibles que celles de la GT1, notamment en faible purge du mode AB où les teneurs en NO_x sont à 7,9ppm (la valeur la plus faible que peut atteindre la machine pour tous les modes réunis). Le seuil n'est dépassé pour aucun des modes de fonctionnement, et les émissions en pleine charge sont quasiment identiques avec la première turbine.

Pour ce qui est du CO, les valeurs sont plus élevées que dans la GT1 et dépassent légèrement le seuil (25ppm) lorsqu'il s'agit d'une purge moyenne du mode ABC (26,3ppm). La valeur minimale des émissions se trouve en pleine charge du mode ABC.

Nous pouvons donc dire que la GT2 émet relativement de faibles quantités de NO_x et son fonctionnement permanent en pleine charge est correct en termes d'émissions.

➤ Site TEG :

Les deux turbines du site Teg émettent pratiquement les mêmes quantités en polluants lorsqu'il s'agit de la pleine charge. Toujours en supposant que ce mode soit dominant sur le site, la station émettrait en moyenne 790 tonnes de NO_x et 200 tonnes de CO annuellement.

Concernant les autres modes, si, pour des raisons de productivités, le client venait à opter pour une purge faible en mode AB pour l'une des deux turbines, il serait nettement plus rentable de l'appliquer sur la GT2, du fait des teneurs plus faibles en NOx et en CO pour cette dernière.

➤ **Turbine GT1 REG :**

Les valeurs des NOx de la turbine GT1 du Reg son relativement élevées et atteignent tout juste le seuil pour une purge forte en mode AB. Il n'y a donc pas de dépassement et les valeurs restent plus ou moins correctes. Le fonctionnement à pleine charge n'est pas celui qui émet le moins de NOx.

Pour le CO, nous retrouvons des valeurs très élevées pour cette turbine, qui dépassent largement le seuil (25ppm) en mode AB pour une purge forte, faible ou moyenne (29ppm, 32ppm et 30ppm respectivement). Cependant, pour la pleine charge, l'émission en CO est très faible (1,2ppm) et la combustion s'avère tendre vers une combustion complète, ce qui représente un très bon point pour cette machine.

Pour cette machine également nous pouvons dire que le fonctionnement à pleine charge ne présente pas de problème et est très avantageux par rapport aux émissions en CO. Par contre, il faudra faire attention lorsqu'on veut passer au mode AB pour cette turbine.

➤ **Turbine GT2 REG :**

Pour la GT2, les NOx sont élevés pour le mode AB et dépassent le seuil en purge forte ou poussée. Ils sont inférieurs à ceux de émis par la GT1 en mode ABC. Le fonctionnement à pleine charge émet des teneurs relativement élevées en NOx mais qui ne dépassent quand même pas le seuil.

Le CO émis par la GT2 est faible, la combustion est donc relativement bonne pour cette turbine pour tous les modes de flamme quasiment, bien qu'en pleine charge le taux de CO est plus élevé que dans la GT1.

Sur cette turbine aussi nous pouvons travailler en pleine charge, bien que la réduction des émissions ne soit pas la plus parfaite, mais elles restent correctes et en dessous du seuil.

➤ **Site REG :**

Le Reg produit annuellement 1220 Tonne de NOx et 180 Tonnes de CO, si on suppose que les deux turbines fonctionnent en pleine charge à longueur d'année. Le fonctionnement à pleine charge n'est pas le mode qui émet le moins de pollutions pour cette station, mais ses valeurs restent correctes, notamment pour la GT1 où la combustion est très bonne pour ce mode.

En mode AB, pour une purge faible ou moyenne, il vaudra mieux opter pour la GT2 où les émissions en CO sont nettement plus réduites.

➤ **Comparaison des deux sites :**

En comparant les valeurs des émissions des deux sites Teg et Reg, on s'aperçoit que le Reg émet plus de CO pour le fonctionnement en mode AB et quasiment les mêmes quantités que le Teg en mode ABC.

Les émissions en NOx sont plus ou moins identiques pour les deux stations avec une exception pour la purge poussée. Cependant, nous remarquons que le Teg émet beaucoup moins de NOx que le Reg pour un fonctionnement en pleine charge.

Ces différences dans les valeurs des émissions sont dues à la composition du carburant, puisque les puis d'alimentation des deux sites sont totalement différents de part la composition et d'autre part la quantité.

Enfin, l'ensemble des deux sites émettent annuellement une quantité de plus de 2000 Tonnes de NOx et 370 tonnes de CO. Ce sont des valeurs qui restent en dessous du seuil d'émissions établi par GE et permettent de réaliser l'objectif de base de la technologie des systèmes DLE qui est de réduire le taux d'émissions des polluants tout en maintenant une bonne productivité et un bon fonctionnement de la turbine (réduction des acoustiques).

6.4.2 Emissions annuelles en CO₂

➤ **Site TEG**

Nous avons trouvé une teneur 10.55% qui se rapproche de la valeur théorique, en prenant en compte quelques incertitudes dans le calcul et quelques teneurs que nous avons négligées. Nous pouvons donc dire que la combustion est relativement bonne, il en résulte une diminution dans les quantités de CO émises.

➤ **Site REG**

La teneur en CO₂ dans les gaz émis par les turbines du Reg est de 10,46%, elle est inférieure à celle du Teg, ce qui explique les teneurs plus élevées en CO pour ce site.

6.4.3 Dispersion des polluants

➤ **Dépendances de la classe de stabilité :**

Nous remarquons dans les graphiques obtenus dans la partie (6.3.4) qu'ils ont toujours la même allure dépendamment de la classe de stabilité :

Dans la classe A, dite classe stable, la vitesse du vent est très faible, et le ciel est totalement dégagé. Il en résulte une très faible dispersion traduite par un pic étroit à proximité de la source de pollution, et les polluants sont tous concentrés sur une faible distance (de 50 à 1000m) ce qui explique la concentration élevée dans ce périmètre.

A l'opposé, pour la classe D, le jour où la vitesse du vent est à 7,22m/s (relativement élevée) et le ciel relativement dégagé (2 octas), l'atmosphère est dite instable, et nous remarquons que le pic de concentration est plus faible que dans les conditions de la classe, mais s'étale sur des distances plus éloignées de la source (1000 à 5000m). Ceci est dû au fait la dispersion soit

bonne et les polluants sont très vite transportés par le vent fort et sont dilués dans l'air en atteignant des concentrations plus faibles et des distances plus éloignées de la source.

La classe C présente, elle aussi, une bonne dispersion et donc un large pic de concentration des polluants.

La classe B, elle, est un peu moins stable que la classe A et plus stable que la classe C, Cmax est moins élevé que dans la classe A mais plus élevé que dans la classe C, de même pour la largeur du pic du fait que la dispersion se trouve entre les deux classe A et C.

➤ **TEG**

Classe A:

Dans des conditions météorologiques de classe A, comme dit précédemment, les polluants se concentrent à proximité de la source d'émission, du fait de la mauvaise dispersion. Nous observons donc, dans les résultats obtenus, un pic de concentration (Cmax) à 100m de la source avec une valeur de 5,724mg/ m³d'air de NOx et 1,436mg/ m³d'air de CO, ce qui représente des valeurs assez grandes et qui dépassent largement le seuil des concentrations en polluants dans l'air ambiant qui est de 200 µg/ m³ pour le NO₂.

En sachant que le seuil de NOx dans l'air ambiant établi par la loi algérienne est à 200µm/ m³ et en comparant le CO aux teneurs de 4 à 6 mg/m³ mesurées en milieu urbain (pour le CO, il n'y a pas de norme, mais en ville les teneurs sont dans cet ordre de grandeur), nous remarquons que le seuil de concentration est largement dépassée entre 50 et environ 1000m pour les NOx ; les teneurs en CO sont très élevées et se rapprochent relativement des teneurs mesurées en milieu urbain. Suite à quoi les concentrations en polluants diminuent et tendent à s'annuler à partir de 10km (teneurs de l'ordre de 10⁻⁸g/m³).

Cette classe ne pose donc problème qu'à proximité de la source de pollution, où il faudra éviter de s'exposer compte tenu des grandes teneurs en polluants.

Classe B :

Lorsqu'on est dans la classe atmosphérique B, le seuil en polluants est dépassé seulement entre 75 et un peu plus de 100m de la source d'émissions, les concentrations restent relativement élevées dans ce périmètre, mais plus basses que dans la classe A. Elles diminuent progressivement en en s'éloignant. Les concentrations commencent à s'annuler à une quinzaine de kilomètres et ne présentent plus de risque dans l'air ambiant. Pour cette classe il faudra donc, seulement, éviter la proximité avec la source à savoir autour des 100m de distance.

Classe C :

Pour cette classe la dispersion est assez bonne, ceci se traduit par un seuil éloigné de 1km de la source d'émission. Cmax est à 396µg pour les NOx et les teneurs dépassent le seuil pour des distances allant de 100 à 1500m. A partir de ces distances, les teneurs diminuent et

tendent à s'annuler à partir de 20Km de la source. Pour le CO, le max est à environ 1km de la source d'émission et le seuil n'est jamais dépassé pour cette classe.

Dans des conditions atmosphériques de classe D, la pollution s'étend sur de larges distances et les à partir de 2Km pour le NOx.

Classe D :

Du fait de la très bonne dispersion, nous retrouvons les plus hautes concentrations à des distances très éloignées du site entre 1 et 2Km de la source, où les valeurs dépassent légèrement le seuil d'émissions en NOx seulement. La concentration maximale est de 248 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'air en NOx et 62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'air en CO ce qui est largement en dessous des teneurs présentes en milieu urbain. Nous remarquons que ces valeurs sont inférieures au maximum de concentration des autres classes de stabilité où la dispersion est moins bonne. Les concentrations diminuent au-delà en s'éloignant de ce pic : Elles sont quasiment nul à proximité du site, et commencent à être négligeables à des distances supérieures à 2Km.

Nous concluons que pour le Teg, nous pouvons concevoir des constructions au-delà d'une dizaine de kilomètres, sans avoir de risque de pollution dangereuse et quelques soient les conditions météorologiques. Il faudra tout de même éviter l'exposition à proximité du site et où les concentrations sont maximales, notamment lorsque l'atmosphère est très stable et où on risque des intoxications sévères.

➤ **REG**

Les concentrations des polluants à différentes distances du Reg sont légèrement plus élevées que pour le Teg, mais elles varient exactement de la même manière et dépassent le seuil pour les mêmes intervalles de distance.

➤ **Indépendances entre les deux sites :**

L'étude que nous avons effectuée, et les résultats que nous avons obtenus sont valables au niveau du sol et juste en dessous de l'axe de panache, c'est-à-dire l'axe où la pollution est sensée être à sa valeur maximum.

Sachant que les deux stations sont séparées par une distance allant de 75Km environs, et que Cmax pour chacune des stations apparait entre 100m (pour la classe A) à 2000m (pour la classe D) et que la valeur de concentrations s'annule à 20 km, en dessous de l'axe de panache, et sachant que cet axe est celui où la concentration en polluants est maximale, nous pouvons déduire qu'à un point A(x,y,z) on ne risque pas d'avoir un mélange de polluants émis par les deux sources Teg et Reg au même temps. En d'autres termes :

Si A(x,y,z) est proche du Teg, nous retrouvons dans ce point des polluants émis par le Teg Si A(x,y,z) est proche du Reg, nous retrouvons dans ce point des polluants émis par le Reg

En prenant en compte le fait que si $x, z \neq 0$, la concentration est plus inférieure que si ces deux variables étaient nulles. Nous pouvons donc faire deux déductions :

1. Les deux stations sont indépendantes de par la concentration des polluants à des distances différentes de chacune des deux stations.
2. Nous pouvons concevoir de réaliser des constructions entre les deux sites sans que cela ne présente aucun danger, puisque les concentrations sont très faibles et tendent vers des valeurs nulles.

➤ Critique sur le système :

Tous les résultats obtenus sont basés sur des données obtenues sur site. Cependant, nous ne pouvons pas dire que ce sont des résultats pointus ou précis puisque nous avons remarqué lors de notre étude, que plusieurs facteurs n'étaient pas pris en compte. En effet, nous avons rencontré les points suivants :

- L'opération de mapping est effectuée une fois tous les 6 mois à une année. Durant cette période, l'appareil fonctionne avec les paramètres et les réglages qui ont été effectués lors du contrôle (Il s'agit ici du réglage optimisant les émissions et tout le fonctionnement de la turbine).
- Le Pouvoir Calorifique Inférieur, qui est une valeur clé du mapping puisqu'elle sert à déterminer T_{min} et T_{max} et donc T_{flame} de chaque mode, est introduit manuellement au début de chaque opération de mapping. Ceci se fait en mesurant le PCI sur place en prélevant un échantillon du gaz naturel puisé le jour même du début de l'opération. Cette valeur introduite au début reste inchangée jusqu'au prochain mapping, et tout le fonctionnement de la turbine se fait sur la base d'une valeur de PCI constante.
- Le site du Teg puise le gaz naturel de 12 Puits, et le Reg de 14 Puits. Ces puits ne sont pas tout le temps en fonction et leur exploitation dépend de la demande en production. La quantité de gaz naturel et sa composition varie donc selon les puits qui alimentent la station, ceci conduit donc à une variation du PCI que le système risque de ne pas noter, puisqu'il fonctionne sur la base d'une valeur introduite manuellement supposée fixe.
- Enfin, le Testo est un appareil de mesure très sensible ne permettant pas d'obtenir des valeurs horaires ou journalières réelles des émissions en polluants pour chaque station. GE note d'ailleurs dans ses rapports que cet appareil n'est pas à 100% exact et ne rentre pas dans la norme ISO 11042 adoptée par GE.

En conclusion, les turbines PGT25 fonctionnant au système DLE présentent une technologie remarquable permettant à la fois de minimiser la consommation en carburant, augmenter la productivité, atteindre de bons niveaux de combustion tout en protégeant la machine (diminution des vibrations acoustiques) et l'environnement (réduction des NOx et CO).

Cependant, l'exploitation de cette technologie par le client reste incomplète et demande des améliorations afin d'atteindre de meilleures performances, notamment en termes de protection de l'environnement.

Conclusion générale

Dans un contexte où l'Algérie dépend en grande partie des énergies fossiles, notamment le gaz naturel, les installations de gaz du projet « In Salah Gas » ont été équipées de turbines à gaz de dernière technologie fournies et maintenues par ALGESCO afin d'atteindre les meilleures performances possibles tant sur le plan économique qu'environnemental.

Ce travail s'est donc intéressé à l'impact des actions de maintenance des turbines sur la réduction des teneurs en polluants NOx et CO.

Le suivi et l'analyse des résultats des opérations de maintenance montrent que la technologie des turbines PGT25, fonctionnant au système de combustion à faible émission sèche (Système DLE), a fait ses preuves et permet de réaliser de très bons résultats, notamment pour ce qui est des émissions en polluants.

Les opérations de mapping permettent d'obtenir des résultats pointus dans le contrôle de la combustion et de ses émissions. Elles assurent une fenêtre d'opération optimale offrant une bonne réduction des émissions tout en maximisant le rendement de la productivité.

Les teneurs en polluants calculées dans les gaz d'échappement dépassent rarement le seuil établi par General Electric. Elles respectent les normes algériennes relatives au seuil de polluants toléré pour une émission à la source.

Les quantités annuelles des polluants ont été déterminées et les résultats obtenus peuvent alimenter la base de données de l'Agence Nationale des Changements Climatiques qui est en charge de l'inventaire des gaz à effet de serre.

La dispersion des NOx et du CO est directement liée à la classe atmosphérique et donc aux conditions météorologiques. En fonction de ces paramètres la concentration en polluants varie et risque dans certaines conditions et en particulier dans le voisinage de l'installation de dépasser le seuil de concentration des polluants dans l'air ambiant établi par la réglementation algérienne.

Une surveillance assez régulière de ces concentrations dans les conditions météorologiques défavorables serait utile.

Les installations des deux sites Teg et Reg ont donné des résultats rassurants mais pas pointus. L'installation assure un bon respect de l'environnement globalement, mais l'entreprise algérienne ne s'est toujours pas donnée les moyens d'investir dans une technologie plus développée notamment dans le contrôle de la composition du gaz combustible, ainsi que les appareils de mesure des polluants permettant d'atteindre des résultats en continu qui assurent le contrôle permanent des émissions liées aux turbines PGT25 de ces installations. On étroit relation.

Enfin, ce travail nous a permis de bien comprendre les phénomènes de la combustion au

Conclusion générale

gaz naturel dans les turbines modernes et les progrès que la technologie a réalisés dans l'optimisation de la combustion pour atteindre un meilleur rendement thermique et de là une moindre émission de polluants.

Perspectives

Afin de garantir un meilleur fonctionnement des turbines à gaz PGT25 opérant dans les deux champs Teg et Reg du projet « In Salah Gas », nous proposons trois solutions qui permettraient à la fois d'atteindre une bonne productivité, et d'assurer une bonne réduction des émissions de polluants atmosphérique sur une fréquence journalière. Le but est de mettre l'accent sur l'importance et la nécessité de la surveillance permanente de ces émissions afin de pouvoir se fier à des résultats plus exactes dans l'établissement de l'inventaire des gaz polluants émis par ces machines, et y remédier en cas de dysfonctionnement.

1- Calcul journalier du Pouvoir Calorifique Inferieur du gaz puisé

La première solution que nous pouvons proposer, et qui coûterait le moins cher, c'est la mesure quotidienne du PCI du gaz naturel brut puisé, avant son passage dans la turbine. Pour se faire, il faudra déterminer la composition de ce mélange gazeux, puisque le pouvoir calorifique d'un mélange gazeux se calcule comme suit :

$$PC_m = \sum x_i \cdot PCI_i$$

PC_m: pouvoir calorifique du mélange PCI_i: pouvoir calorifique des constituants

x_i: fraction massique de chaque constituant

Nous aurons donc besoin de déterminer la fraction massique de chaque constituant du mélange. Nous proposons d'opter pour la Chromatographie en Phase Gazeuse (CPG) qui est une méthode de séparation des constituants d'un mélange gazeux qui nous fournit un chromatogramme représentant une série de pics de différentes dimensions. La surface du pic étant proportionnelle à la quantité du composant traduit par ce pic, est rapportée à la surface totale de tous les pics afin d'obtenir le pourcentage de chaque composant.

Cette solution nécessite d'aménager un laboratoire sur les deux sites Teg et Reg, puisque jusqu'à présent il n'y a que le site de Krechba qui est muni d'un laboratoire et qui effectue des analyses (non régulières) du gaz naturel qui s'y trouve (donc en aval pour le Reg et le Teg). Il faudra également investir dans un appareil chromatographe de laboratoire, qui permettrait de déterminer quotidiennement, ou du moins lorsqu'on juge nécessaire, la composition du gaz puisé par les différents puits reliés au site, notamment lorsque le débit de consommation varie suite à une modification dans le nombre des puits en fonction.

Cette solution permettra certainement d'apporter des améliorations, puisqu'on aura la possibilité de modifier, bien que manuellement, la valeur du PCI lorsqu'il est nécessaire. Le PCI étant l'un des paramètres les plus importants dans l'ouverture des vannes, donc dans le contrôle du ratio air/carburant, et touche par conséquent les valeurs des émissions atmosphériques.

Bien que cette proposition résolve une bonne partie du problème, elle reste incomplète, du fait que les mesures soient discontinues, et que les valeurs de PCI se fassent manuellement. Les résultats ne seront donc toujours pas aussi exacts et fiables que souhaité.

2- Analyse continue de la composition du mélange

Cette solution nécessite de placer un appareil de CPG automatique continu qui permettra de déterminer automatiquement la composition du gaz et donc son pouvoir calorifique, et d'envoyer le signal automatiquement et de manière continue et instantanée au système qui permettra l'ouverture ou la fermeture des vannes et la régulation de la purge.

Ce moyen assurera donc un contrôle continu de la chambre de combustion et permettra d'atteindre notre objectif de base qui est d'optimiser au maximum son fonctionnement et sa consommation en carburant, et permettra une réduction quasi-maximale des émissions en polluants tels que les NOx ou le CO et les imbrulés puisque la combustion tendra à être complète du fait que le rapport air/carburant soit bon. Un système similaire existe dans les moteurs des véhicules (Sonde Lamda qui régule le rapport du mélange)

Bien que l'appareil de CPG automatique soit relativement cher, c'est d'ailleurs la raison pour laquelle le client ne s'y est pas investi, il reste très nécessaire voire primordial si on veut atteindre des résultats exactes et fiables autant en matière de coûts (consommation de carburant, productivité...) qu'en matière de fiabilité (sécurité, respect de l'environnement, exactitude des données...)

3- Remplacement de l'analyseur de gaz

Dans le cas où on pourrait placer un CPG automatique, il serait très bon, en matière de contrôle d'émissions, de remplacer le Testo, qui est un analyseur ne pouvant pas fonctionner plus que quelques heures, par l'analyseur d'Horiba. L'Horiba assure une mesure permanente des gaz émis par les turbines, et a fait ses preuves en termes de fiabilité des résultats et de respect des normes (il répond aux exigences spécifiées dans l'ISO 11042). Nous pourrions donc, avec cet appareil, obtenir des résultats réels et en continu.

4- Elaboration d'un tableau de bord pour les émissions

Le control continu du système de combustion nous permettra d'obtenir des résultats exacts en permanence et en temps réels. Notre troisième proposition est donc d'exploiter ces données pour élaborer un tableau de bord qui aura comme objectif de :

- ✓ Présenter des tendances horaires/journalières des émissions en fonction du mode de flamme et du système de purge.
- ✓ Déterminer quotidiennement les teneurs réelles émises en polluants. Ceci nous permettra de réaliser des inventaires fiables.

A long terme, investir dans un programme fournissant les données météorologiques instantanées, ce qui nous permettra de :

- ✓ Déterminer le pic de concentrations en polluants (Cmax) et la distance à laquelle il se trouve.
- ✓ Déterminer les concentrations en polluants à différentes distances de la source d'émission.

5- L'exploitation de l'énergie solaire

Comme nous l'avons vu dans la partie 6.3 les radiations solaires à In Salah sont très fortes. Sur cette base, l'Algérie pourrait, et devrait, penser à exploiter cette richesse du sud algérien. Il s'agira de remplacer l'usage des énergies fossiles, notamment le gaz naturel qui, comme nous l'avons vu tout au long de ce travail, émet de grandes quantités de polluants et de GES, par l'énergie solaire.

De nos jours, la technologie de l'énergie solaire est très répandue et offre d'excellente substitution. Il est temps pour l'Algérie de sauter le pas vers des énergies propres renouvelables, respectueuses de l'environnement, et qui ne risquent pas de s'épuiser. Ceci règlera à la fois des problèmes environnementaux mais également un grand problème économique pour l'Algérie qui risque de vivre une crise après l'épuisement des ressources fossiles.

Références

- [1] : « www.GE.com » consulté le 22/02/2019
- [2] : Forbes Global 2000 de 2014
- [3] : P. Michel and G. Vaugirard. Naissance dans le xve d'une multinationale, la thomson. Société historique et archéologique de Paris XVe, 4, 1993.
- [4] : « www.wikipedia.com. » consulté le 22/02/2019
- [5] : Document propre de l'entreprise
- [6] : « <https://www.ge.com/ag/propos-de-ge/> » consulté le 22/02/2019
- [7]: «The world's biggest public companies. www.forbes.com » consulté le 22/02/2019.
- [8] : « <https://www.bhge.com/our-company> » consulté le 22/02/2019
- [9] : « Nos projets en partenariat, www.sonatrach.dz consulté » le 22/02/2019
- [10] : «www.larousse.fr » consulté le 23/02/2019
- [11] : J. Smith, L.F. Drbal, P. G. Boston and K. L. Westra., Gas Turbines, Power Plant Engineering, Boston, MA, Springer US: 659-688, 1996
- [12]: T. Giampaolo, Gas turbine handbook, Principles and practice / by Tony Giam-paolo, MSME, PE, 1939, 5th edition.
- [13] : Alston Power, « Turbine à gaz Tornado, manuel d'utilisation», 2002.
- [14] : Laallam Fatima Zohra, thèse de doctorat, Modélisation et gestion de la maintenance dans les systèmes de production, université Badji Mokhtar Annaba, novembre 2007.
- [15] : HEDI KAFFEL, thèse de doctorat, la maintenance distribuée : concept, évaluation et mise en œuvre, département de génie mécanique faculté des sciences et de génie université Laval Québec, octobre 2001.
- [16] : James Masso, Christopher Childs, Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations, GE Power & Water Atlanta, GA, 2015.
- [17] : « olivier.fournet.free.fr » consulté le 20/06/2019
- [18]: M. Lal et coll, Potential climatic consequences of increasing anthropogenic constituents in the atmosphere, Atmosph. Environ, 1986, 20pp 639-642
- [19] : Paul Degaubert, Automobile et pollution, Edition technip, 1992.
- [20] : G. Lambert, Le gaz carbonique dans l'atmosphère, 1987 La Recherche – 18 n° 189 pp 778-787
- [21] : Ronneau, Claude, Chapitre 3, Combustion et combustibles In : Énergie, pollution de l'air et développement durable [en ligne], Louvain-la-Neuve : Presses universitaires de Louvain, 2004 (généré le 08 avril 2019).
- [22] : Association Suisse de l'Industrie Gazière (ASIG), « gaz naturel faits et chiffres », Rapport annuel 2005, P 18
- [23] : Association Suisse de l'Industrie Gazière (ASIG), « gaz naturel faits et chiffres », Rapport annuel 2005, P 19
- [24] : Abdelaziz Touahri, Universite Abderrahmane Mira De Bejaia, L'approvisionnement De L'union Europeenne En Gaz Algerien: Etude Des Modes De Transport, 2009
- [25] : EPA technical bulletin-nitrogen oxides (NOX), why and how they are controlled, November 1999, EPA 456/F-99-006R.
- [26] : Bowman, C. T. Control of combustion-generated nitrogen oxide emissions technology driven by regulation. Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, 1992, (pp 859-878). The Combustion Institute.

- [27] : Collection sur les statistiques de l'environnement -ONS – 2012
- [28] : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), 2000.
- [29] : « www.citepa.org » consulté le 25/03/19
- [30] : dioxyde d'azote, fiche(s) de sécurité du Programme International sur la Sécurité des Substances Chimiques , consultée(s) le 9 mai 2009
- [31]: Mac Kenzie L.D, Cornwell D.A, Introduction to Environmental Engineering, McGraw-Hill International Editions, 1991
- [32] : La politique économique environnementale , École des mines de Douai, p. 37.
- [33] : De Félix F , Matériel et technique, médical à propos de la toxicité des fumées de tir d'explosifs en spéléologie, 06 septembre 2009
- [34] : The scientific basis, Contribution of the working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge 2001, IPCC. Climate change.
- [35] : Brasseur G, Orlando JJ, Tyndall GS. Atmospheric chemistry and global change. Oxford University Press, Oxford 1999.
- [36] : Jacob D. Introduction to atmospheric chemistry, Princeton University Press, Princeton, New Jersey 1999.
- [37] : Finlayson-Pitts BJ, Pitts JN, Chemistry of the upper and lower atmosphere, Academic Press, San.Diego, 2000.
- [38] : Olier, J.P., Les oxydes d'azote – Préface, Revue générale de thermique, n°330-331, Juin-Juillet, 1989.
- [39] : Russel, H., Roberts, J., Nitrogen oxides formation and control in resource recovery facilities, Proc. nat. Waste process conf, 1984, pp417-423.
- [40] : Jean-Michel Commandre, Formation des oxydes d'azote lors de la combustion de cokes de pétrole dans des conditions de précalcinateur de cimenterie. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2002.
- [41] : Lefebvre.A.H, Gas Turbine combustion (second edition), Taylor&Francis , 1998.
- [42] : De Soete, G.G., Mécanismes de formation et de destruction des oxydes d'azote dans la combustion, Revue générale de thermique, n°330-331, juin-juillet 1989
- [43] : Jean-Michel Commandre, thèse de doctorat , Formation des oxydes d' azote lors de la combustion de cokes de pétrole dans des conditions de précalcinateur de cimenterie, Institut National Polytechnique de Toulouse. Soutenue le 14 MARS 2002.
- [44] : « www.inrs.fr/fichetox Monoxyde de carbone - Edition : 2009 » consulté le 20/05/2019
- [45] : Monoxyde De Carbone, Bruxelles Environnement - Dep. Plan Air, Climat Et Energie Et Observatoire Des Donnees De L'environnement, Janvier 2011, Page 1 Sur 10.
- [46] : « www.inchem.org » consulté le 20/05/2019
- [47] : Frank, 1969
- [48] : « www.wikipedia.com » consulté le 09/04/2019
- [49] : « www.dictionnaire-environnement.com » consulté le 12/06/2019
- [50] : Protocole de Kyoto
- [51] : Emeric Fortin, « Changement climatique : quels enjeux ? », MOOC, mobilités et véhicules électriques, de l'école des Ponts ParisTech, « www.coursera.com » consulté le 13/06/2019
- [52] : NASA
- [53] : Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

- [54] : convocation du collège électoral des wilayas de Béjaia, Béchar, Tizi-Ouzou, Médéa et Oran pour des élections partielles en vue du remplacement de membres élus du Conseil de la nation. Décret présidentiel n° 06-01 du 7 Dhou El Hidja 1426 correspondant au 7 janvier 2006 portant.
- [55] : Journal Officiel De La République Algérienne N° 24, 17 Rabie El Aouel 1427/16 Avril 2006.
- [56] : N. Diaf, M Bouchaour, L. Merad et B. Benyoucef, Paramètres Influençant la Dispersion des Polluants Gazeux, Laboratoire De Matériaux & Energies Renouvelables, Facultés Des Sciences, Université De Tlemcen, Rev. Energ. Ren.: ICPWE, 2003 , 139-142.
- [57] : « www.la.climatologie.fr » consulté le 23/05/19
- [58] : « www.eduscol.education.fr » consulté le 23/05/19
- [59] : Cours de stabilité verticale, Université du Québec à Montréal
- [60] : Utslipp av NOx fra petroleum svirksomheten på Norwegian sokkel, kap. 6.1.1, Oljedirektoratet, 10 July 2013, Retrieved 2014-07-12.
- [61] : Kristin Sundsbø Alne, Master of Science in Energy and Environment, Reduction of NOx Emissions from the Gas Turbines for Skarv Idun, Norwegian University of Science and Technology, June 2007.
- [62] : Haugan Kari; Hjertaker Vigdis; Gaarder Karine; Kvande Ingvar, NOx reduction with water / steam injection, norway's technical-natural science university institute for petroleum technology and applied geophysics, November 2005.
- [63] : Ronald Whiddon, Academic thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering, Application of Laser-based Diagnostics to a Prototype Gas Turbine Burner at Selected Pressures, Faculty of Engineering at Lund University, 1 April 2014, Retrieved 13-07-2014.
- [64] : Action analysis for NOx Investigation of possible NOx-reducing measures within the energy plants on the shelf, domestic shipping and the mainland industry.
- [65] : GE Proprietary Information - Technical Export License TSU/OTS March 27th, 1997)
- [66] : GE document, 7 décembre 2013
- [67] : GE Industrial Aeroderivative Gas Turbines, Cincinnati, Ohio 45215, 4 March 1999
- [68] : « <http://olivier.fournet.free.fr> » consulté le 10 juin
- [69] : Kerbachi. R, cours pollution atmosphérique, Ecole National Polytechnique, 2019.
- [70] : « www.wikipedia » consulté le 08/06/2019
- [71] : « www.infoclimat.fr » consulté le 09/06/2019
- [72] : « www.data.cder.dz » consulté le 09/06/2019
- [73] : Décret présidentiel n° 06-01 du 7 Dhou El Hidja 1426 correspondant au 7 janvier 2006 portant convocation du collège électoral des wilayas de Béjaia, Béchar, Tizi-Ouzou, Médéa et Oran pour des élections partielles en vue du remplacement de membres élus du Conseil de la nation.

Annexes

¹ : une technique d'extraction par injection de gaz utilisant des bulles d'air comprimé, de vapeur d'eau ou tout autre bulle de gaz pour faire remonter un liquide à travers un tube.

² : canalisation destinée au transport de matières gazeuses sous pression, la plupart du temps des hydrocarbures.

³ : Une source d'énergie primaire est une forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation.

⁴ : Tous des éléments toxiques ou toxiques au-delà d'un certain seuil et certains sont radioactifs

⁵ : c'est une couche de terre, de roche ou de sédiments qui présente la particularité de rester gelée pendant plus de deux années consécutives.

⁶ : Objectifs de qualité : « Un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base de connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances sur la santé humaine ou sur l'environnement, à atteindre dans une période donnée. »

Valeur limite : « Un niveau maximal de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base de connaissances scientifiques. »

Seuil d'information : « Un niveau de concentration des substances polluantes dans l'atmosphère au de là duquel une exposition de courte durée a des effets limités et transitoires sur la santé de catégories de la population particulièrement sensibles. »

Seuil d'alerte : « Un niveau de concentration des substances polluantes dans l'atmosphère au de là duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou pour l'environnement. »

Centile 98 : « Pourcentage de valeurs de dépassement autorisé par année civile, soit 175 heures de dépassement autorisées par année civile de 365 jours. » [73]

⁷ : Zone fermée de hautes pressions atmosphériques relativement à celles de voisinage

*: une unité de puissance ne faisant pas partie du Système International d'unités, ui exprime une équivalence entre la puissance fournie par un cheval tirant une charge et celle fournie par une machine de propulsion à vapeur ou un moteur à combustion.