

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Industries Pétrochimiques
Option : Génie Pétrochimique

Thème

**Etude du problème de défaillance et fissure des tubes catalytiques dans
le four primaire du complexe de SORFERT.**

Présenté par :

- 1- Bouahadj Houari**
- 2- Haddouche Youcef**

Soutenu le 30/06/ 2025 devant le jury composé de :

Présidente :	DRIOUCH Aouatef	Pr	Université de Mostaganem
Examinatrice :	BELARBI Ilhem	MCB	Université de Mostaganem
Encadrante :	MEZOUAGH Amina	MCA	Université de Mostaganem



Faculty of Sciences and Technology
Department of Process Engineering
Ref :...../U.M/F.S.T/2025

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق
رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت//2025

Année Universitaire 2024/20

Remerciements.

*Avant tout, nous remercions **Dieu, le Clément, le Miséricordieux**, pour nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail. C'est par Sa volonté que nous avons pu franchir chaque étape de ce projet avec espoir, détermination et confiance en l'avenir.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrante, **Dr MEZOUAGH Amina, Maître de conférences A à l'Université de Mostaganem**, pour la confiance qu'elle nous a accordée en acceptant d'encadrer ce travail. Son accompagnement bienveillant, sa disponibilité constante, la richesse de ses conseils et la liberté d'initiative qu'elle nous a laissée ont été des piliers essentiels dans la réussite de ce projet. Nous avons énormément appris à ses côtés, tant sur le plan scientifique que personnel, et nous lui en sommes profondément reconnaissants.*

*Nos remerciements les plus respectueux s'adressent à **Pr DRIOUCH Aouatef, Maître de conférences à l'Université de Mostaganem**, présidente du jury de soutenance, pour son attention portée à notre mémoire, ses remarques constructives et son regard critique qui ont grandement contribué à enrichir notre travail.*

*Nous remercions également **Dr BELARBI Ilhem**, examinatrice de ce mémoire, pour sa lecture attentive, ses observations pertinentes et les précieuses suggestions qu'elle a bien voulu nous apporter.*

*Nous remercions aussi **Mr BENBERGHOUT Mokhtar, Ingénieur et manager de production chez SORFERT** ; pour leurs disponibilités et leurs conseils très précieux tout au long de ce travail.*

*Nos remerciements sincères vont également à **l'ensemble du staff administratif, pédagogique et technique de l'Université de Mostaganem**, qui a su créer un environnement d'apprentissage stimulant et bienveillant, et qui a toujours fait preuve de professionnalisme et de disponibilité tout au long de notre parcours.*

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes, de près ou de loin, qui nous ont soutenus tout au long de notre formation universitaire qu'il s'agisse d'un conseil, d'un encouragement,

d'une aide technique ou d'un mot bienveillant. Leur contribution, parfois discrète mais toujours précieuse, a été une source de motivation et de réconfort inestimable.

Dédicace

Bouhadj Houari

Je dédie ce travail, aboutissement de longues années de persévérance et de dévouement :

À mes chers parents,

pour tout l'amour que vous m'avez donné, pour vos prières silencieuses, pour vos sacrifices sans limites, pour votre sagesse et votre foi inébranlable en moi.

Vous êtes les racines solides qui m'ont permis de grandir, et les piliers silencieux de toutes mes réussites.

Que Dieu vous comble de santé, de paix et de sérénité.

À mon épouse bien-aimée,

Plus qu'un soutien moral, tu as été une présence active, impliquée et précieuse tout au long de mon parcours de Master.

Tu as partagé mes efforts, porté avec moi la charge de ce parcours, participé activement à l'organisation, à la relecture, à la réflexion, et même à la préparation de toute aspects de mes travaux.

Ton intelligence, ta patience, ton dévouement et ta confiance en moi ont fait de toi une véritable coéquipière dans cette aventure académique.

Sans toi, ce chemin aurait été bien plus difficile.

Je te dédie ce travail avec amour, respect et gratitude.

À mes enfants,

yahia Islem, Louey, Mohamed Ayoub et ma petite princesse Djihène Inès,
vous êtes ma plus belle source d'inspiration, ma motivation quotidienne et ma fierté.

Que ce travail vous serve un jour d'exemple de persévérance et d'engagement.

Je prie Dieu qu'Il vous protège et vous guide sur le droit chemin.

À ma belle-famille beaux-parents, mes beaux-frères et belles-sœurs,

pour votre bienveillance constante, votre compréhension, et vos encouragements.

Je remercie profondément mon beau-père pour ses dou'ās sincères, dont l'effet apaisant et protecteur m'a accompagné tout au long de cette aventure.

Dédicace

Haddouche Youcef

Je dédie ce travail, avec tout mon amour et ma gratitude :

À la mémoire de ma chère mère, que Dieu ait son âme. Ta douceur, ta force silencieuse et ton amour inconditionnel m'accompagnent chaque jour. Ce travail est aussi le fruit de tes prières silencieuses et de tes sacrifices.

À mon père, pour ton soutien constant, tes conseils sages et ta présence rassurante. Merci d'avoir toujours cru en moi.

À mon épouse bien-aimée, pour ta patience, ton encouragement et ton amour sans faille. Ton soutien m'a été indispensable dans les moments de doute et de fatigue.

À mes filles chéries, raghad et joury. Qui illuminent ma vie de leur sourire et me donnent chaque jour une raison de persévérer.

À nos amis fidèles,

Moi et mon binôme tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à nos amis, pour leur encouragement constant, leur écoute et leur présence bienveillante qui nous ont accompagnés tout au long de ce parcours. Leur soutien moral a été une véritable source de motivation.

À nos collègues de travail,

Nous remercions sincèrement tous ceux avec qui nous avons collaboré durant cette période.

Leur disponibilité, leur esprit d'équipe et la qualité de nos échanges ont grandement contribué à enrichir notre expérience professionnelle et humaine. Merci pour votre soutien et votre confiance.

يتناول هذا البحث دراسة الأعطاب الميكانيكية التي تصيب الأنابيب الحفزية داخل الفرن الأولي لعملية الإصلاح التحفيزي بالبخار في مركب سورفرت لإنتاج الأمونياك واليوريا. ركزت الدراسة على تحليل أسباب ظهور التشققات مثل الارتفاع المفرط في درجة الحرارة، وعدم انتظام التوزيع الحراري، والصدمات الحرارية، والاختلال في نسبة البخار إلى الغاز، بالإضافة إلى التآكل الداخلي بسبب الشوائب الغازية. كما تم التطرق إلى ظاهرة النقاط الساخنة وتأثيرها على الأداء والسلامة. وقد تم اقتراح عدة حلول تقنية وقائية لتحسين استقرار وعمر الأنابيب مثل التحكم الدقيق في درجات الحرارة والمراقبة المستمرة وتحسين الصيانة الدورية.

الإصلاح التحفيزي، الشقوق، الأنابيب الحفزية، النقاط الساخنة، التآكل، الغاز الاصطناعي : الكلمات المفتاحية

Résumé :

Ce mémoire traite des défaillances observées au niveau des tubes catalytiques du four primaire de reformage catalytique dans le complexe SORFERT. L'étude s'est focalisée sur l'identification des causes des fissures, notamment les contraintes thermiques, les chocs de température, les déséquilibres chimiques et la corrosion. Une attention particulière a été portée sur le phénomène des "hot spots" et ses conséquences sur la performance et la sécurité du reformeur. Plusieurs solutions techniques ont été proposées afin de prévenir ces anomalies : amélioration du contrôle de température, surveillance continue, ajustement du rapport vapeur/gaz, et optimisation de la maintenance.

Mots-clés : reformage catalytique, fissures, tubes catalytiques, , hot spot, corrosion, , gaz de synthèse.

Abstract :

This thesis investigates the mechanical failures observed in the catalytic tubes of the primary reformer furnace at SORFERT's ammonia and urea production plant. The study focuses on identifying the root causes of cracking, including excessive thermal stress, temperature fluctuations, improper catalyst packing, and internal corrosion due to gas impurities. Special emphasis is placed on the phenomenon of hot spots and its operational and safety implications. A range of preventive and technical solutions is proposed, such as temperature monitoring, steam-to-gas ratio optimization, regular inspection, and predictive maintenance to enhance the reliability and efficiency of the reformer.

Keywords : catalytic reforming, cracking, catalyst tubes, , hot spot, corrosion, synthesis gas.

SOMMAIRE

Sommaire :

Liste des figures.

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale 1

chapitre I présentation du complexe industrielle SORFERT.

I.1 Présentation du complexe..... 2

I.2 Historique 3

I.3 Les principales étapes du projet sont 3

I.4 Situation géographique du complexe et avantage logistique..... 3

I.5 Caractéristiques techniques du complexe 5

I.6 Organisation fonctionnelle et structure hiérarchique..... 6

I.7 Matières premières et produits finis 6

I.7.1 Matières premières..... 6

I.8.2 Les produits finis 7

I.7.2.1 L'Ammoniac (NH_3) 7

I.7.2.2 L'Urée ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) 8

I.8 Les principales zones du complexe 8

I.8.1 Zone utilités..... 8

I.8.2 Zone process..... 9

I.8.2.1 Train de production d'ammoniac 9

I.8.2.1.1 Flux détaillés de production 10

I.8.2.1.2 Réforme primaire (Primary Reformer) 10

I.8.2.1.3 Réforme secondaire et conversion 10

I.8.2.1.4 Synthèse de l'ammoniac (NH_3) 11

I.8.2.2. Unité de production d'Urée 12

I.8.2.2.1 Synthèse de l'urée..... 13

I.8.2.2.1.1 Granulation et conditionnement 13

I.8.2.2.1.2. Recyclage interne..... 13

I.8.3 Zone de stockage..... 13

I.8.3.1 Stockage sur site.....	14
I.8.3.2 Stockage au port	14
I.9 Le laboratoire du complexe (équipements et contrôles qualité)	14
I.9.1. Équipements disponibles.....	15
I.9.2. Paramètres analysés	15
I.9.3. Fréquence des analyses	15
I.9.4. Normes appliquées	15
I.10. Système de sécurité industrielle au sein du complexe.....	16
I.10.1. Identification des risques	16
I.10.2. Moyens de prévention technique et de protection	16
I.10.3. Gestion des situations d'urgence	16
I.10.4. Formation du personnel.....	17
I.10.5. Audits et certifications	17
I.11 Politique environnementale et stratégie de développement	17

Chapitre II L'exploitation du reformage catalytique.

II.1 Introduction	20
II.2 Reformage catalytique	20
II.3 Principe du procédé.....	20
II.3.1 Reformeur primaire 203B001.....	21
II.3.1.1 Principe de fonctionnement du reformeur primaire	21
II.3.1.2 Étapes principales	22
II.3.1.3 Réactions chimiques impliquées	22
II.3.1.4 Schéma du reformeur et description technique détaillée	23
II.3.1.4.1. Structure générale	23
II.3.1.4.2 Flux de matière	24
II.3.1.4.3 Matériaux et conception.....	24
II.3.1.4.4 Systèmes de régulation	24
II.3.2 Reformage Secondaire.....	25
II.4 Équipement du reformage	25
II.5 Conceptions du four de reformage.....	26
II .5.1 Les tubes de reformage.....	26
II.5.2 Support du tube	28
II.5.3 Les bruleurs.....	29

II.5.4 Zone de convection.....	30
II.5 Catalyseur	31
II.5.1 Catalyseur à base de nickel	31
II.5.2 Propriétés du catalyseur supporté.....	32
II.5.3 Les type du support	32
II.5.4 Mécanismes de dégradation	33
II.6 La réaction de reformage.....	33
II.7 Bilan énergétique simplifié	34
II.8 Efficacité thermique du four	34
II.9 Récupération d'énergie	34

Chapitre III Etude de la problématique.

III.1 Introduction.....	35
III.2 Les Causes du problème.....	36
III.2.1 Augmentation excessive de la température.....	36
III.2.2 Surchauffe localisée due à une mauvaise répartition du rayonnement thermique.....	36
III.2.3 Dégradation progressive par cycles thermiques.....	36
III.2.4 Remplissage défectueux du catalyseur et formation de zones vides dans les tubes catalytiques.....	36
III.2.5 Déséquilibre du rapport vapeur/gaz : risque de dépôt de carbone et d'empoisonnement du catalyseur	38
III.2.6 Corrosion interne due aux impuretés du gaz.....	39
III.3 Propriétés de l'hydrogène et risques associés	39
III.3.1 Calcul de l'hydrogène dans le four primaire	40
III.4 Conséquence du problème	40
III.4.1 phénomène points chauds (hot spot).....	45
III.4.1.1 Définition du phénomène	45
III.4.1.2 Méthode de détection du phénomène (hot spot)	45
III.5 Les impacts de la fissure dans les tubes catalytique.....	48
III.5.1 Impact opérationnel	48
III.5.2 Impact sécuritaire.....	48

Chapitre IV Solutions et discussions.

IV.1	Notions préventive	49
IV1.1	Prévention des tubes catalytiques et du catalyseur	49
IV.1.2	Remplacement de tubes fissurés ou bouchés	49
IV.1.3	Réparation des brûleurs endommagés	50
IV.2	Solutions proposés	50
IV.2.1	Contrôle de la température des tubes catalytiques	50
IV.2.2	Prévention des zones vides lors du chargement du catalyseur	51
IV.2.3	Contrôle du niveau de soufre dans le gaz d'alimentation	51
IV.2.4	Suivi de la pression d'entrée et de sortie	51
IV.2.5	Surveillance de la teneur en méthane	52
IV.2.6	Intégration d'un système de monitoring SCADA/DCS	52
IV.2.7	Paramétrage d'alarmes intelligentes	52
IV.2.8	Tableaux de bord de contrôle	52
IV.2.9	Optimisation du rapport vapeur/gaz	52
IV.2.10	Analyses	53
	Conclusion Générale	54
	Recommandations	55
	Références bibliographiques	56

Liste des figures :

Figure I.1 : Complexe SORFERT.....	2
Figure I.2 : Situation géographique du complexe SORFERT	4
Figure I.3 : Plan général du complexe SORFER	5
Figure I.4 : Molécule de NH_3	8
Figure I.5 : Molécule de l'urée.....	8
Figure I.6 : Unité de production d'ammoniac	10
Figure I.7 : Reformeur primaire et secondaire	11
Figure I.8 : Schéma détaillé de train d'ammoniac.....	12
Figure I.9 : Train de production d'urée	13
Figure I.10 : Laboratoire du complexe SORFERT... ..	14
Figure II.11 : Processus de reformage primaire (Vue DCS).....	22
Figure II.12 : Schéma de Reformeur Primaire	23
Figure II.13 : Four de reformage primaire	24
Figure II.14 : Processus de reformage secondaire et génération de vapeur	25
Figure II.15 : Four de reformage secondaire.....	26
Figure II.16 : Les tubes de reformage	27
Figure II.17 : Les supports des tubes	29
Figure II.18 : Système de récupération de chaleur post reformage (vue DCS)... ..	30
Figure II.19 : Catalyseur nickel	31
Figure III.20 : Fissure sur Tube Reformeur... ..	35
Figure III.20 : Fissure sur tube reformer	35
Figure III.21 : Remplissage du catalyseur dans tube	38
Figure IV.22 : Appareil chromatographique GC de laboratoire de SORFERT... ..	44
Figure III.23 : Hot spot sur tube	45
Figure III.24 : Un pyromètre de détection.	46

Figure III.25 : Fiche technique (skin temperature measurement catalyst tubes reformer.....	47
Figure III.26 : Réaction chlore avec l'hydrogène à la paroi du tube catalytique.....	48
Figure IV.27 : Ajustement de la température	49
Figure IV.28 : Bouchage de tube fissuré.....	49
Figure IV.29 : Changement de bruleur endommagé	50
Figure IV.30 : Contrôle de température (photo personne)... ..	51

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Composition du gaz naturel	7
Tableau II.2 : Comparaison des éléments chimiques dans les alliages SS321 et HK40	28
Tableau III .3 : Répartition du chargement catalytique dans le reformeur primaire	37
Tableau III.4 : Outrages dans le Reformeur Primaire.....	37
Tableau III.5 : Contrôle du rapport Vapeur/Gaz et prévention des dépôts de carbone	39
Tableau IV.6 : Compositions de charge sortante de la section	40
Tableau IV.7 : Conditions opératoire.....	41
Tableau IV.8 : Compositions de mélange gaz naturel-vapeur	41

Liste des abréviations

SORFERT : Engrais Sonatrach Orascom

RTO : région de transport ouest

PFD : diagramme de flux de processus

MDEA : Méthyle di-Ethanol Amine aMDEA : Méthyle di-éthanolamine activé PZ : Pipérazine

BFW : L'eau d'alimentation de chaudière HP : Haute Pression

HT : Haute température

E : Échangeur

B : Quatre

C : Colonnes

F : Séparateur

ppm : Partie par million

MW : Méga Watt

R : Rendu

ρ : Masse volumique (kg/m³)

C_p : Chaleur massique à pression constante (J/kg)

T : Température (°C)

U : Coefficient de transfert de chaleur (W/m². K)

V : Vitesse (m/s)

S : Superficie (m²)

L : Longueur(m)

d_i : Diamètre intérieur des tubes (m)

bar : unité de pression

BASF : Usine d'aniline et de soude de Baden (société de production chimique)

CL⁻ : Ion de chlore.

LIMS : (Système de Gestion des Informations de Laboratoire).

CH₄ : Méthane.

CO : Monoxyde de Carbone.

H₂ : Hydrogène.

NH₃ : Ammoniaque (liquide / vapeur).

CO₂ : Dioxyde de Carbone.

OH⁻ : Ion d'Hydroxyde.

DCS : Système de Contrôle de Distribution.

M(OH)₂ : Hydroxyde métallique.

O₂ : Oxygène.

Nm 3 : mètre cube normal.

GC : Chromatographie en phase gazeuse.

H₂O : vapeur d'eau.

UV : Ultra-Violet.

pH : potentiel Hydrogène.

ISO : Organisation Internationale de Normalisation.

HK40 : Alliage d'acier inoxydable à haute température.

SS321 : Acier inoxydable stabilisé au titane.

N₂ : Azote.

Q : débit molaire.

Introduction générale :

L'Algérie, riche en ressources énergétiques, a su développer une industrie pétrochimique performante, notamment dans la région d'Arzew, qui abrite plusieurs complexes industriels majeurs. Parmi eux, **Sorfert Algérie**, situé dans la zone industrielle d'Arzew, est une unité intégrée de production d'ammoniac et d'urée, destinée à l'exportation et à la consommation locale. Ce complexe utilise le **gaz naturel** comme matière première principale, traité à travers une série de réactions catalytiques dont l'étape clé est le **reformage primaire**. [1]

Le reformage catalytique primaire est une étape cruciale où le gaz naturel (principalement du méthane) réagit avec de la vapeur d'eau à haute température et en présence d'un catalyseur à base de nickel, pour produire un gaz de synthèse riche en hydrogène. Cette réaction se déroule à l'intérieur de tubes métalliques disposés verticalement dans un four, chauffés par des brûleurs installés sur les parois latérales. [2]

Cependant, au fil du temps, l'unité de reformage primaire à Sorfert a rencontré des **problèmes de défaillance des tubes catalytiques**, notamment sous forme de **fissures et de déformations**. Ces anomalies, localisées principalement dans la zone de radiation du four, entraînent une perte de rendement, des arrêts de production imprévus, et présentent un risque potentiel pour la sécurité des installations. Des températures anormalement élevées, des points chauds ("hot spots") ainsi qu'un mauvais contrôle des brûleurs sont parmi les causes suspectées. [3]

Notre projet de fin d'études porte sur l'étude de ce phénomène, avec les objectifs suivants :

1. Présenter l'unité de reformage primaire au sein du complexe Sorfert, ainsi que le rôle et les caractéristiques des tubes catalytiques.
2. Identifier les **causes possibles de fissuration** des tubes à partir de mesures thermiques (notamment par pyromètre optique) et de l'analyse des conditions de fonctionnement.
3. Proposer des **solutions techniques** pour réduire ces défaillances, améliorer la fiabilité des tubes, et garantir la sécurité et la durabilité du reformeur.

Enfin, ce travail s'achèvera par une série de **recommandations** fondées sur les constats et les résultats obtenus durant cette étude.

***Chapitre I : Présentation du complexe
industriel SORFERT.***

I.1 Présentation du complexe :

Sorfert est l'une des plus grandes réalisations industrielles dans le domaine de la pétrochimie en Algérie, plus précisément dans la production d'engrais azotés. Situé dans la zone industrielle d'Arzew, ce complexe constitue un maillon essentiel de la stratégie nationale de valorisation du gaz naturel et de diversification de l'économie nationale dépendante historiquement des hydrocarbures bruts [1].



Figure I.1 : Complexe de SORFERT.

SORFERT est le fruit d'un partenariat stratégique entre SONATRACH, la compagnie nationale algérienne des hydrocarbures (détenant 49 % des parts), et la société égyptienne ORASCOM Construction Industries (OCI), avec 51 % des parts. Ce partenariat s'inscrit dans le cadre juridique de la loi algérienne régissant les investissements étrangers, notamment la règle dite du 51/49 % instaurée pour protéger l'économie nationale tout en encourageant les partenariats technologiques et financiers.

Le complexe a pour vocation la transformation du gaz naturel en produits dérivés à haute valeur ajoutée, principalement l'ammoniac et l'urée granulée. Ces produits sont destinés tant au marché local qu'international, notamment l'Europe, l'Amérique latine et certaines régions d'Asie. SORFERT se distingue par sa capacité de production, la modernité de ses installations.

I.2 Historique :

La mise en œuvre du projet SORFERT Algérie répond à une vision nationale d'industrialisation et de transformation du gaz en produits chimiques à usage agricole. Le projet a été lancé officiellement en 2006 après la signature du partenariat, mais l'idée d'un tel complexe avait émergé dès les années 2000 [4].

I.3 Les principales étapes du projet sont :

- 2006 : Création de SORFERT Algérie en tant que joint-venture entre : OCI N.V. (ORASCOM Construction Industries, Égypte – 51 %), SONATRACH (compagnie nationale algérienne – 49 %) en 2006.
- 2007 - 2010 : Conception, ingénierie, et construction du complexe. Investissement estimé à plus de 2 milliards de dollars en 2007-2010. Cette phase inclut la mobilisation des équipes, les travaux de terrassement, le montage des unités industrielles, et la mise en place des infrastructures logistiques.
- 2013 : Lancement de la phase de tests industriels pour toutes les unités.
- 2014 : Démarrage effectif de la production commerciale (ammoniac et urée). Les produits sont certifiés et commercialisés à l'international.
- 2015 - 2020 : Optimisation des procédés, maintenance stratégique, audits qualité et environnementaux.
- 2017 : Un incident d'incendie maîtrisé dans l'unité d'ammoniac, sans interruption majeure des opérations grâce à l'intervention rapide des équipes HSE [4].

I.4 Situation géographique du complexe et avantage logistique :

Le complexe SORFERT est situé dans la zone industrielle d'Arzew à l'Ouest de BETHIOUA, à 6km de la ville d'Arzew, 40 km à l'Est d'Oran, il couvre une superficie de 37 hectares et se compose notamment de plusieurs zones. [1]

Cette région est dotée d'un réseau industriel dense : raffineries, complexes de gaz naturel liquéfié (GNL), zones portuaires, centrales électriques, etc. L'emplacement du complexe offre plusieurs avantages :

- **Proximité des ressources naturelles** : Le gaz naturel est acheminé depuis les champs de Hassi R'mel via des gazoducs.

- **Accessibilité maritime** : Le port méthanier d'Arzew permet l'exportation rapide vers les marchés internationaux.
- **Infrastructures développées** : Routes industrielles, réseaux électriques, accès aux stations de dessalement, etc.
- Le site de SORFERT couvre une superficie totale de 37 hectares. Il comprend des zones industrielles, des bâtiments administratifs, des laboratoires, des zones de stockage, et un centre de formation interne.



Figure I.2 : Situation géographique du complexe SORFERT.

I.5 Caractéristiques techniques du complexe :

Le complexe est équipé d'installations modernes à haute performance. Il comprend :

1. Deux unités de production d'ammoniac d'une capacité journalière de 2 200 tonnes chacune. La technologie utilisée est celle de ThyssenKrupp Uhde (TKIS), l'un des leaders mondiaux de l'ingénierie chimique.
2. Une unité de production d'urée granulée de capacité 3450 tonnes par jour. Le procédé repose sur la technologie Stamicarbon, qui permet une granulation efficace et une qualité constante du produit fini. Stations de traitement d'eau (osmose inverse, déminéralisation, etc.).
3. Systèmes de refroidissement par tours aéro-réfrigérantes et échangeurs thermiques.
4. Systèmes de torchage pour la combustion contrôlée des gaz excédentaires.
5. Unités de récupération de chaleur pour améliorer l'efficacité énergétique.
6. Trois réservoirs de stockages d'ammoniac : un d'une capacité de 15000T et deux réservoirs de 30 000T.
7. Un corridor technique comprenant.
8. Une conduite d'amenée d'eau de mer.
9. Un pipeline de transfert de l'ammoniac [2].

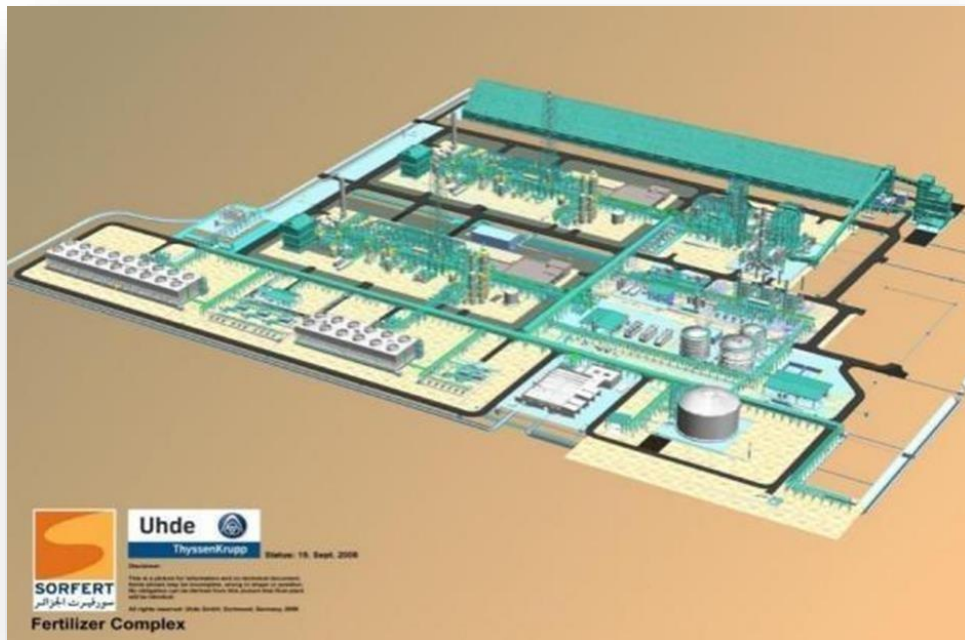


Figure I.3 : Plan général du complexe d'ammoniac SORFERT [1].

I.6 Organisation fonctionnelle et structure hiérarchique :

L'organisation du complexe repose sur une structure matricielle regroupant :

1. Une Direction Générale supervisant toutes les opérations.
2. Une Direction des Opérations comprenant les départements de production d'ammoniac, d'urée et des utilités.
3. Un Département Maintenance assurant la disponibilité des équipements (mécanique, électrique, instrumentation).
4. Un Département HSE-Q (Hygiène, Sécurité, Environnement et Qualité) garantissant la conformité réglementaire.
5. Un Département Laboratoire et contrôle qualité.
6. Un Département Logistique et exportation assurant le transport, les douanes, le stockage, etc

Le personnel est composé d'environ 1200 employés, dont plus de 80 % sont algériens. Une politique de formation continue est en place pour le transfert de compétences [1].

I.7 Matières premières et produits finis :**I.7.1 Matières premières :**

- **Le Gaz Naturel** : Le gaz naturel, un combustible fossile constitué d'un mélange d'hydrocarbures, se trouve naturellement dans des roches poreuses sous forme gazeuse. Celui utilisé provient de la zone R.T.O. [6]

Tableau I.1 : Composition du gaz naturel [6] :

Composants de GN	Unité	quantité
Eau	Eau	0
Hélium	% mol	0.18
Azote	% mol	5.57
Dioxyde de carbone	% mol	0.22
Méthane	% mol	83.38
Ethane	% mol	7.68
Propane	% mol	1.99
I-butane	% mol	0.30
n-butane	% mol	0.45
i-pentane	% mol	0.09
n-pentane	% mol	0.10
n-hexane	% mol	0.04
Mercure	$\mu\text{g}\backslash\text{Nm}^3$	50
Soufre	Ppm	<10

- L'Azote (Nitrogène) : L'azote, élément essentiel au procédé, est extrait de l'air atmosphérique.
- L'Oxygène : L'oxygène, indispensable au fonctionnement de l'usine, est extrait de l'air ambiant.
- Le Dioxyde de Carbone (CO₂) : Le dioxyde de carbone est à la fois un sous-produit du procédé de fabrication de l'ammoniac et une matière première utilisée dans la production d'urée.
- La Vapeur d'Eau : La vapeur d'eau est produite sur site à l'aide des chaudières de production et de récupération [6].

I.7.2 Les produits finis :

I.7.2.1 L'Ammoniac (NH₃) :

L'ammoniac (NH₃) est un gaz, appartenant au groupe des nitrures d'hydrogène. Il est produit industriellement en grandes quantités par le procédé Haber-Bosch, à partir de diazote et de dihydrogène et stocké à l'état liquide sur site et au port. [6]

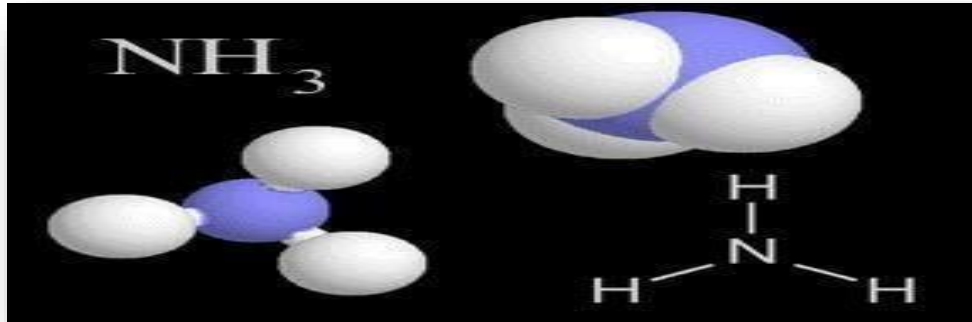


Figure I.4 : Molécule de NH_3 .

I.7.2.2 L'Urée ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) :

L'urée, ou carbamide, est un composé organique de formule chimique $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$. Elle appartient également à une famille de dérivés caractérisés par la formule générale $(\text{R}_1, \text{R}_2)\text{N}-\text{CO}-\text{N}(\text{R}_3, \text{R}_4)$. Son principal usage aujourd'hui est en tant qu'engrais azoté. Une fois dans le sol, l'urée se décompose par hydrolyse en ammoniac et en dioxyde de carbone et la granulée est stockée sur site puis expédiée par camion jusqu'au port.

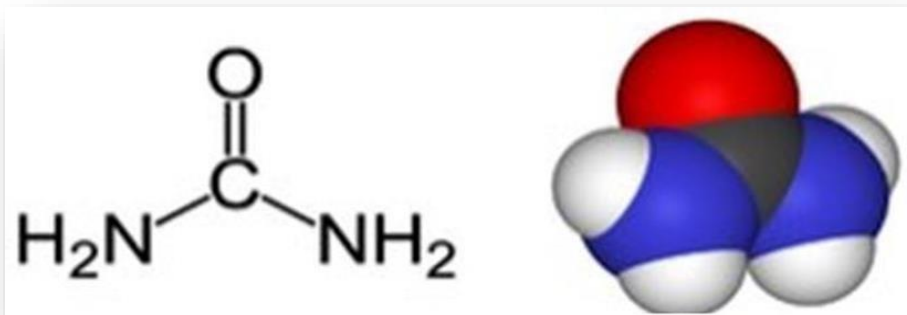


Figure I.5 : Molécule de l'urée.

I.8 Les principales zones du complexe :

Le complexe SORFERT est composée de trois (03) zones :

I.8.1 Zone utilités :

Les utilités constituent des services de soutien indispensables au processus industriel. Elles sont mises en place pour produire, traiter et manipuler les produits finis du complexe, tout en assurant le bon fonctionnement et le maintien de l'outil de production. [7]

- Les utilités se composent des sections suivantes :
1. Section de production de vapeur (083).
 2. Section de production d'air service et d'instrumentation (084).
 3. Section de production d'électricité (085).
 4. Section de production et stockage d'azote (086).
 5. Section de refroidissement à l'eau de mer (087).
 6. Section de refroidissement en boucle fermée (088).
 7. Section de production d'eaux dessalées (089).
 8. Section de production d'eaux déminées (090).
 9. Réseau d'eau anti-incendie (091).
 10. Section de prise d'eau de mer (097).
 11. Réseaux des douches de sécurité (056) [7].

I.8.2 Zone process :

La zone de production est constituée de deux unités :

I.8.2.1 Train de production d'ammoniac :

Deux unités de production d'ammoniac de capacité de 2200 Tonnes/jour chacune.

✚ Les étapes de production d'ammoniac sont :

Unité 000 : Extraction de l'hélium et du mercure du gaz naturel.

Unité 201 : Désulfurisation et compression du gaz naturel.

Unité 202 : Compression de l'air de procédé.

Unité 203 : Reformage à la vapeur (vapo-reformage).

Unité 204 : Conversion du monoxyde de carbone (HTS & LTS).

Unité 205 : Extraction du dioxyde de carbone (CO₂).

Unité 206 : Méthanation.

Unité 207 : Compression du gaz de synthèse.

Unité 208 : Synthèse de l'ammoniac (NH₃).

Unité 209 : Réfrigération de l'ammoniac.

Unité 210 : Récupération de l'ammoniac.

Unité 211 : Récupération de l'hydrogène.

Unité 280 : Récupération des condensats.

Unité 282 : Dégazage et pompes d'alimentation des chaudières.

Unités 051–052 : Stockage [7].



Figure I.6 : Unité de production d’ammoniac.

I.8.2.1.1 Flux détaillés de production :

Le processus de production au sein du complexe SORFERT repose sur des procédés chimiques bien définis visant la transformation du gaz naturel en ammoniac, puis en urée. Le schéma global comprend plusieurs étapes clés, chacune étant rigoureusement contrôlée afin d’assurer la qualité des produits finaux et la sécurité des installations.

I.8.2.1.2 Réforme primaire (Primary Reformer) :

Le gaz naturel (principalement du méthane) est mélangé à de la vapeur d’eau surchauffée puis introduit dans un réacteur à lit catalytique à haute température (environ 800–850 °C) pour produire un mélange de dihydrogène (H_2), de monoxyde de carbone (CO) et de dioxyde de carbone (CO_2) [14].

I.8.2.1.3 Réforme secondaire et conversion :

Le mélange est ensuite enrichi en azote par injection d’air comprimé (source de N_2) puis passe dans un réacteur secondaire. Le CO est ensuite converti en CO_2 par réaction avec la vapeur (shift conversion). Le CO_2 est extrait via une unité d’absorption [14].

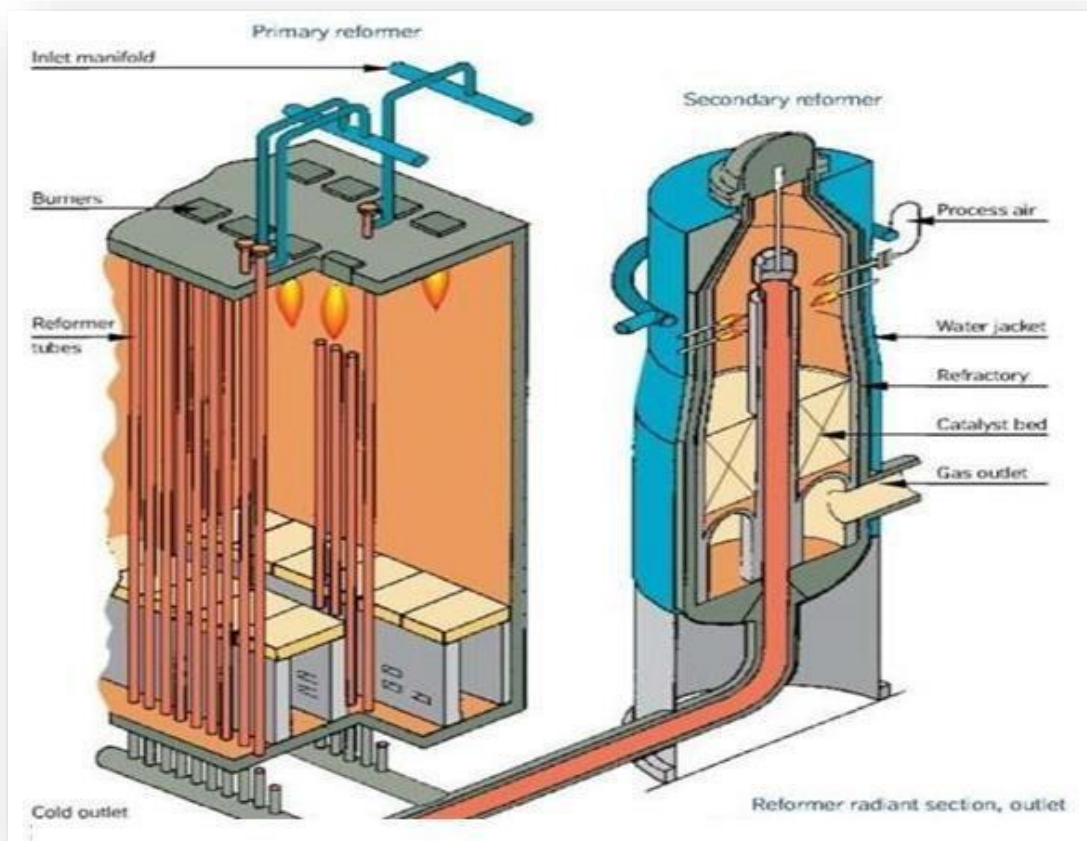
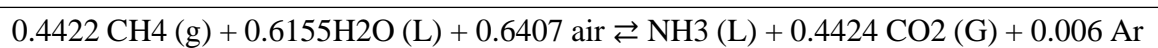


Figure I.7 : Reformeur primaire et secondaire.

I.8.2.1.4 Synthèse de l'ammoniac (NH₃) :

Les gaz riches en H₂ et N₂ sont comprimés à haute pression (150–250 bars) et envoyés dans un réacteur de synthèse avec catalyseur à base de fer. Cette étape se déroule à une température d'environ 400–450 °C. L'ammoniac liquide est récupéré après condensation [14].

➤ L'équation générale :



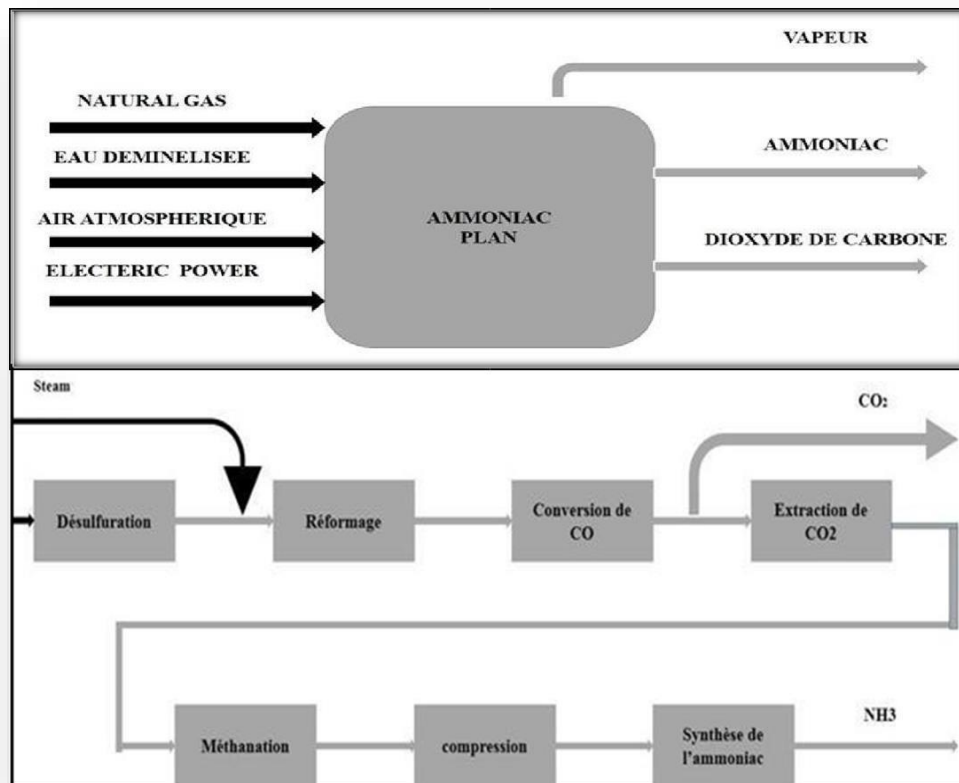


Figure I.8 : schéma détaillé de train d'ammoniac.

I.8.2.2. Unité de production d'Urée :

Une unité de production de 3450 Tonnes/jour d'urée en granulés.

✚ Les étapes de production d'urée :

Unité 020 : Compression du dioxyde de carbone (CO_2).

Unité 021 : Pompage de l'ammoniac.

Unité 022 : Synthèse de l'urée.

Unité 023 : Recirculation.

Unité 024 : Évaporation.

Unité 027 : Granulation.

Section de traitement des condensats [14].



Figure I.9 : Train de production d'Urée.

I.8.2.2.1 Synthèse de l'urée :

L'ammoniac produit est utilisé avec du CO₂ (recyclé) dans un autoclave pour former de la carbamate d'ammonium, lequel est déshydraté pour produire de l'urée. Le produit est ensuite purifié et granulé.

1.8.2.2.1.1 Granulation et conditionnement :

L'urée est refroidie, granulée, tamisée puis enrobée avec des additifs anti-agglomérants avant d'être stockée ou ensachée pour export

1.8.2.2.1.2. Recyclage interne :

Les gaz non convertis sont recyclés pour améliorer le rendement du procédé. L'eau de procédé est également récupérée et réutilisée après traitement.

Un bilan matière typique montre qu'environ 27 m³ de gaz naturel sont nécessaires pour produire 1 tonne d'ammoniac, et que 0,58 tonne d'ammoniac est nécessaire pour produire 1 tonne d'urée [14].

I.8.3 Zone de stockage :

La zone de stockage et de chargement est constituée de deux unités distinctes :

I.8.3.1 Stockage sur site :

Le stockage sur site comprend :

- un réservoir d'ammoniac liquide d'une capacité de 15 000 m³,
- un hangar destiné aux engrais pouvant contenir jusqu'à 100 000 m³.

I.8.3.2 Stockage au port :

Le stockage au port comprend :

- Deux réservoirs d'ammoniac liquide une capacité de 30 000 m³ chacun.
- une station de pompage d'ammoniac liquide capable de traiter 1 000 m³ par heure.
- un quai d'expédition équipé de deux bras de chargement [7].

I.9 Le laboratoire du complexe (équipements et contrôles qualité) :

Le laboratoire central de SORFERT est une composante stratégique garantissant la conformité des produits aux normes nationales et internationales. Il est responsable du contrôle qualité de toutes les matières premières, des produits intermédiaires, et des produits finis [8].



Figure I.10 : Laboratoire du complexe de SORFERT

I.9.1. Équipements disponibles :

- **Chromatographie en phase gazeuse (GC) :** Pour l'analyse des gaz (H_2 , CH_4 , CO , CO_2 , N_2).
- **Spectrophotomètre UV-Visible :** Pour la mesure de l'azote, de l'ammoniac et des impuretés.
- **Potentiomètres et pH-mètres :** Pour la vérification du pH de l'eau et des solutions chimiques.
- **Conductimètres et turbidimètres :** Pour l'analyse de l'eau déminéralisée.
- **Balances analytiques de haute précision.**
- **Étuves, bains thermostatiques, hottes aspirantes [8].**

I.9.2. Paramètres analysés :

- Teneur en NH_3 , CO_2 , biuret, humidité résiduelle dans l'urée.
- Impuretés dans l'eau de procédé.
- Analyse des rejets liquides et gazeux.
- Analyse des résidus de granulés [8].

I.9.3. Fréquence des analyses :

- **Horaires :** Suivi des unités critiques (NH_3 , CO_2).
- **Quotidienne :** Produits finis (urée, ammoniac).
- **Hebdomadaire/mensuelle :** Rejets et suivi environnemental [8].

I.9.4. Normes appliquées :

- SORFERT suit les normes internationales suivantes :
- ISO 9001 (Qualité).
- ISO 14001 (Environnement).
- ISO 17025 (Compétence des laboratoires).

Un système LIMS (Laboratory Information Management System) permet l'enregistrement, le suivi et la traçabilité des résultats.

I.10. Système de sécurité industrielle au sein du complexe :

La sécurité industrielle est une priorité absolue pour SORFERT. Le complexe met en œuvre une politique rigoureuse de prévention des risques, basée sur des technologies avancées, des protocoles stricts et une formation continue du personnel [9].

I.10.1. Identification des risques :

- Risques chimiques : fuites de gaz, réactions incontrôlées.
- Risques thermiques : températures élevées dans les reformeurs.
- Risques mécaniques : défaillances d'équipements sous pression.
- Risques environnementaux : fuites de polluants dans l'eau ou l'air.
- Feu et explosion : Les vapeurs d'hydrocarbures, en présence d'air, peuvent former des mélanges inflammables susceptibles de provoquer des incendies ou des explosions.

I.10.2. Moyens de prévention technique et de protection :

- **Systèmes de détection** : détecteurs de gaz (NH_3 , CH_4), capteurs de température, pression et débit.
- **Soupapes de sécurité et disques de rupture** sur les équipements sous pression.
- **Barrières physiques** et zones d'accès contrôlé autour des installations sensibles.
- **Extincteurs spécialisés**, bouches d'incendie, mousse anti-feu.
- **Vêtements de protection** pour les opérateurs (EPI normalisés).

I.10.3. Gestion des situations d'urgence :

- Mise en place d'un Plan d'Opération Interne (POI).
- Sirènes d'alarme réparties dans tout le site.
- Existence de groupes d'intervention rapide et d'équipes de premiers secours.
- Exercices d'évacuation simulés tous les 6 mois.

I.10.4. Formation du personnel :

- Sessions obligatoires de sensibilisation à la sécurité.
- Formations spécifiques par poste (ex. opérateurs reformeurs, techniciens maintenance).
- Modules pratiques sur l'utilisation des extincteurs, port d'EPI, procédures d'urgence.

I.10.5. Audits et certifications :

- Audits internes trimestriels et audits externes annuels.
- Certification ISO 45001 (santé et sécurité au travail).

I.11 Politique environnementale et stratégie de développement :

SORFERT adopte une politique environnementale ambitieuse fondée sur la prévention, la réduction des émissions et la valorisation des sous-produits. Elle comprend :

- **Traitement des eaux usées** via une station physico-chimique et biologique, avec recyclage pour le refroidissement.
- **Épuration des gaz** par scrubbers, torchage sécurisé et surveillance continue des émissions.
- **Gestion des déchets solides** avec tri, valorisation des catalyseurs et enfouissement sécurisé.
- **Réduction de l'empreinte carbone** par optimisation énergétique et technologies efficaces.
- **Sensibilisation environnementale** à travers des formations et indicateurs internes. Un rapport environnemental est publié chaque année selon les standards internationaux.

Côté développement, SORFERT mise sur :

- **L'augmentation de la capacité de production** d'urée et d'ammoniac.
- **La diversification** vers des produits comme l'UAN, le nitrate d'ammonium et l'ammoniac vert.
- **La digitalisation** (industrie 4.0) et la maintenance intelligente.
- **La neutralité carbone**, grâce à l'hydrogène vert, la technologie CCS et les énergies renouvelables.

- **La formation** via des partenariats universitaires.
- **L'intégration logistique** pour faciliter l'export.
- **L'engagement sociétal** par le soutien aux communautés locales [9].

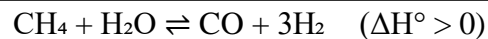
***Chapitre II : L'exploitation du
reformage catalytique.***

II.1 Introduction :

Environ 85 % de la production mondiale d'ammoniac repose sur le reformage à la vapeur du gaz naturel, qui est la principale source d'hydrogène utilisée pour la synthèse de l'ammoniac. Environ 80 % de cette production provient du gaz naturel, en raison de son faible coût en matière première, en investissement et en exploitation [10].

Le reformage catalytique primaire est l'étape clé dans la production d'ammoniac et d'hydrogène à partir du gaz naturel. Il permet de convertir le méthane (CH₄) en un mélange riche en hydrogène (H₂) et en monoxyde de carbone (CO), appelé gaz de synthèse, grâce à une réaction en présence de vapeur d'eau et d'un catalyseur à haute température [10].

- La réaction principale est la suivante :



Cette réaction est endothermique, elle nécessite un apport important de chaleur, d'où l'utilisation d'un four réformeur. Le bon fonctionnement du reformeur conditionne directement le rendement global de la chaîne de production d'ammoniac [10].

II.2 Reformage catalytique :

Le reformage catalytique est un procédé chimique qui consiste à transformer des hydrocarbures légers (comme le méthane du gaz naturel) en gaz de synthèse (mélange d'hydrogène, de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone), en présence d'un catalyseur et de vapeur d'eau, à haute température et sous pression. [11]

Ce procédé est principalement utilisé pour produire :

- ✓ De l'hydrogène (utilisé dans la synthèse de l'ammoniac, le raffinage, etc.),
- ✓ Du gaz de synthèse pour divers procédés industriels.

II.3 Principe du procédé :

Le procédé consiste à faire réagir, en présence d'un catalyseur, le méthane issu des hydrocarbures avec de la vapeur d'eau, en présence d'azote provenant de l'air.

L'hydrogène est principalement produit par reformage à la vapeur, suivi d'une étape de conversion du monoxyde de carbone avec la vapeur d'eau. [11]

Une fois généré, l'hydrogène est purifié des composés oxygénés résiduels avant son introduction dans le réacteur catalytique de synthèse de l'ammoniac.

II.3.1 Reformeur primaire 203B001 :

Le reformeur primaire est conçu sous forme d'une enceinte contenant six rangées de tubes verticaux, comportant 48 tubes par rangée, et sept rangées de brûleurs, chacun équipé de 21 brûleurs à flamme verticale. Ces brûleurs sont disposés en travers du plafond du reformeur, de manière à garantir une répartition homogène de la chaleur sur l'ensemble des tubes [11].

L'alimentation des brûleurs se fait par un mélange de gaz naturel, de gaz combustible issu du système de récupération d'hydrogène, ainsi que de gaz de permutation provenant de l'unité d'extraction de l'hélium [11].

II.3.1.1 Principe de fonctionnement du reformeur primaire :

Le reformeur primaire est constitué d'un four tubulaire dans lequel circulent des tubes remplis de catalyseur à base de nickel. Un mélange de méthane et de vapeur d'eau est injecté dans ces tubes, où il subit la réaction de reformage à haute température (750–850°C) et pression modérée (20–30 bar).

Le méthane (CH₄) reformé quitte les tubes à une température d'environ 805 °C. Quant aux fumées de combustion, elles sortent du reformeur à environ 970 °C et circulent ensuite à travers une série de serpentins situés dans la zone de convection, permettant ainsi une récupération efficace de la chaleur. [11]

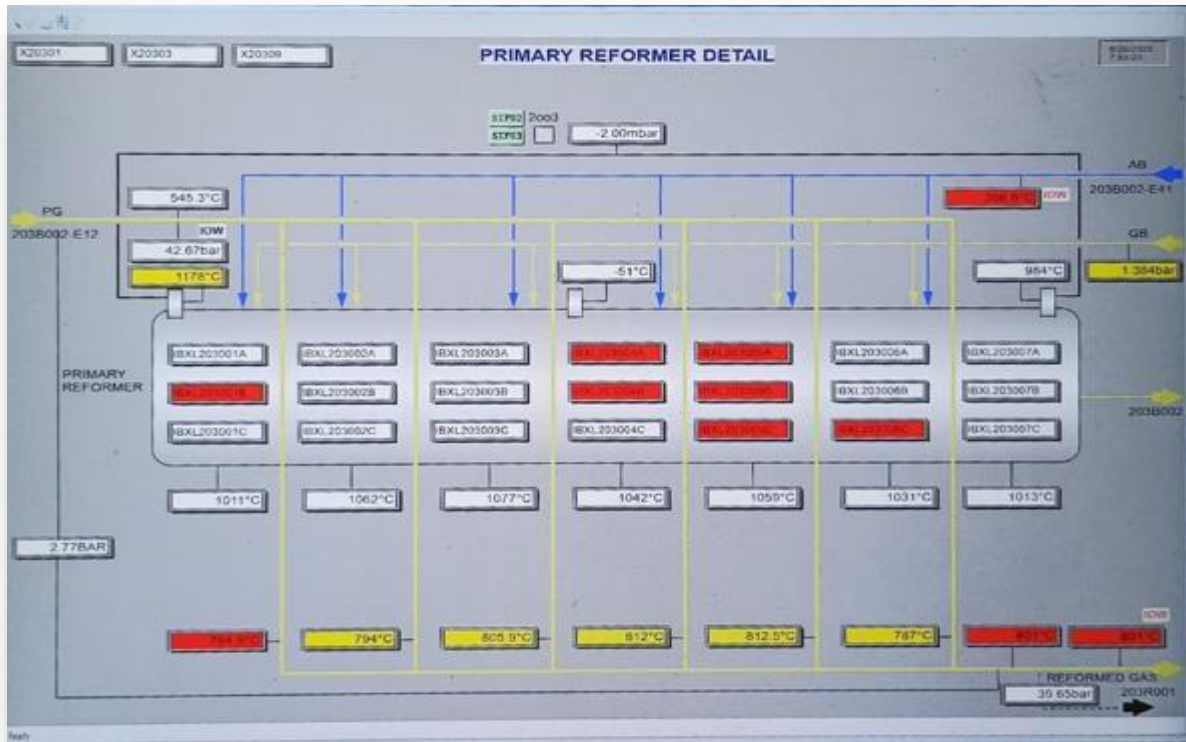


Figure II.11 : Processus de Reformage Primaire (vue DCS).

II.3.1.2 Étapes principales :

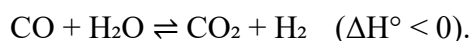
1. Prétraitement du gaz naturel : élimination du soufre (désulfuration).
2. Mélange avec la vapeur d'eau dans un rapport molaire $H_2O/CH_4 \approx 3$.
3. Passage dans les tubes catalytiques chauffés par les brûleurs situés dans la voûte du four.
4. Récupération du gaz de synthèse en sortie de four.

Le réacteur est conçu pour optimiser le contact entre les réactifs et le catalyseur tout en assurant une distribution thermique homogène [14].

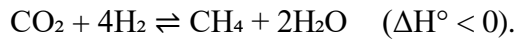
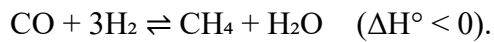
II.3.1.3 Réactions chimiques impliquées :

Outre la réaction principale de reformage à la vapeur, d'autres réactions secondaires peuvent intervenir :

- **Réaction de déplacement du gaz à l'eau (water-gas shift) :**



➤ **Réactions de méthanation (non souhaitées) :**



Le contrôle de la température et des pressions permet de favoriser les réactions désirées tout en limitant les réactions inverses [14].

II.3.1.4 Schéma du reformeur et description technique détaillée :

Le four de reformage est un élément central dans le procédé de production. Il est conçu pour atteindre une efficacité thermique maximale tout en assurant la longévité des tubes et du catalyseur.

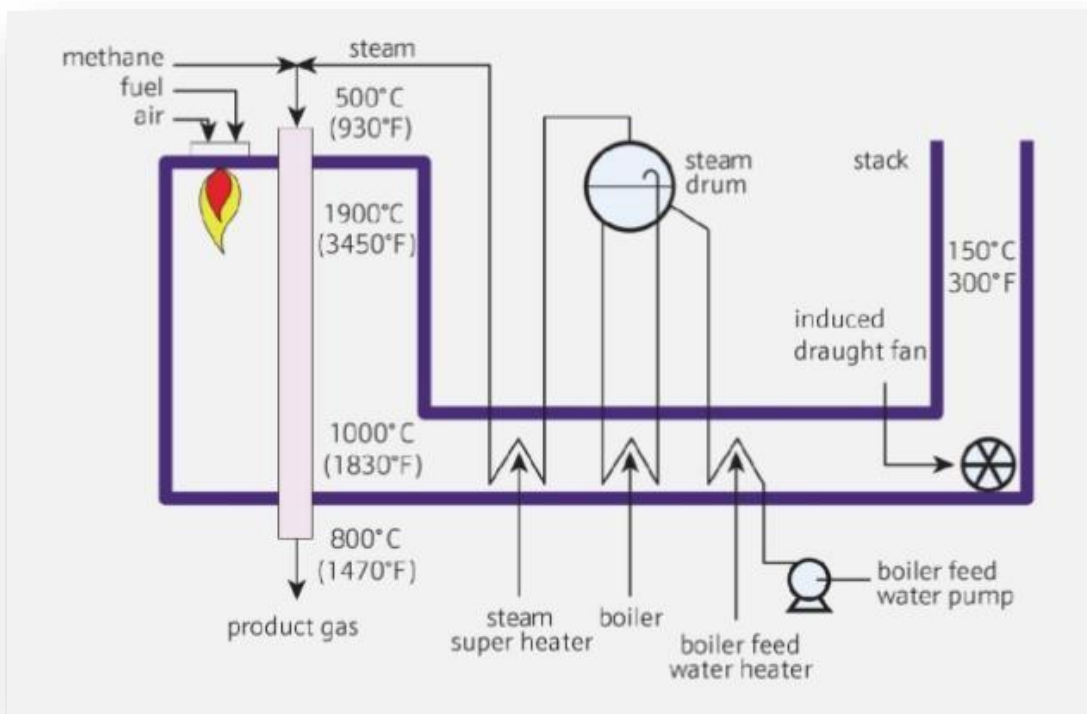


Figure II.12 : Schéma du reformeur primaire .

II.3.1.4.1. Structure générale :

- Chambre de combustion : équipée de plusieurs brûleurs alimentés par gaz combustible (généralement du méthane).
- Tubes catalytiques verticaux : contenant un lit fixe de catalyseur au nickel supporté sur alumine.

- Chambre de convection (au-dessus) : récupération de chaleur à travers des échangeurs pour préchauffer les flux entrants.
- Cheminée : évacuation des gaz brûlés.

II.3.1.4.2 Flux de matière :

- Le mélange méthane-vapeur d'eau entre par le haut et traverse les tubes vers le bas.
- La réaction se produit à l'intérieur des tubes chauffés de l'extérieur.
- En sortie, le gaz de synthèse est dirigé vers l'étape suivante (reformage secondaire ou shift).

II.3.1.4.3 Matériaux et conception :

- Tubes résistants aux hautes températures (alliages à base de Cr, Ni).
- Isolation thermique renforcée (briques réfractaires).
- Contrôle de température à l'aide de thermocouples disposés à différents niveaux.

II.3.1.4.4 Systèmes de régulation :

- Contrôle automatique du débit gaz/air des brûleurs.
- Systèmes de sécurité contre les surchauffes ou fuites.
- Surveillance en continu de la température des gaz de sortie.



Figure II.13 : Four de reformage primaire.

Le four de reformage comprend deux zones principales : une zone de radiation, correspondant à la chambre de combustion où sont logés les tubes catalytiques, et une zone de convection, où la chaleur des fumées issues de la combustion est récupérée.



Figure II.15 : Four de Reformage Secondaire.

II.5 Conceptions du four de reformage :

II .5.1 Les tubes de reformage :

Les tubes employés dans les fours de reformage sont systématiquement fabriqués en acier allié par centrifugation. Leurs dimensions standards varient : diamètres de 70 à 160 mm, épaisseurs de 10 à 20 mm, et longueurs comprises entre 6 et 12 mètres.

Ces tubes doivent résister à des pressions et des températures très élevées. En plus de leur fonction structurelle, ils assurent le transfert de chaleur. Leur intérieur contient un mélange composé de vapeur d'eau, méthane (CH_4), monoxyde de carbone (CO), dioxyde de carbone (CO_2) et dihydrogène (H_2), tandis que leur extérieur est soumis aux gaz de combustion

oxydants. En raison des cycles thermiques et des contraintes mécaniques intenses, les joints traditionnels sont inadaptés. Il est donc essentiel que les matériaux soient soudables afin de garantir une étanchéité fiable sous haute pression et température. Par ailleurs, la présence de catalyseur à l'intérieur impose un diamètre intérieur constant. [12]

Les matériaux utilisés pour ces tubes sont des alliages spécifiques obtenus par centrifugation. L'acier HK40 (25 % Cr / 20 % Ni), longtemps standard dans cette application, a été progressivement remplacé au cours des 15 dernières années par des alliages plus résistants aux températures élevées. Cette amélioration est due à des concentrations plus importantes en nickel et en chrome, ainsi qu'à l'ajout de niobium qui permettent de réduire l'épaisseur des tubes, d'augmenter le flux thermique admissible et ainsi de diminuer la surface totale d'échange.



Figure II.16 : Les tubes de reformage.

Tableau II.2 : Comparaison des éléments chimiques dans les alliages SS321 et HK40 [14] :

Élément	SS321	HK40
C	0,08	0,35-0,45
Mn	2	-
Si	1	1,75 (max)
Cr	17-19	23-27
Ni	9-12	19-22
P	0,045	-
S	0,03	-
Ti	5*%C (min)	-
Fe	Reste (équilibre)	Reste (équilibre)

II.5.2 Support du tube :

Le soutien des tubes représente un élément crucial dans la conception du four. En raison des variations de température, les tubes subissent des dilatations et des contractions pouvant atteindre plusieurs centimètres. Il est donc indispensable de prévoir des liaisons semi-flexibles, positionnées en haut ou en bas, associées à des contrepoids ou des ressorts de suspension pour compenser ces déformations.



Figure II.17 : Les supports des tubes.

II.5.3 Les brûleurs :

Le transfert de chaleur vers les tubes s'effectue principalement par rayonnement, provenant des flammes et des parois réfractaires du four. [12]

On distingue deux principaux types de brûleurs :

- Les brûleurs radiants à flamme plate, installés en grand nombre (jusqu'à 147 ou plus dans un atelier de production d'ammoniac de 2200 tonnes par jour), positionnés sur les parois du four. Leurs flammes chauffent les parois réfractaires, qui à leur tour irradient les tubes.
- Les brûleurs à flamme longue, installés en nombre plus réduit (environ 21 pour un atelier similaire), sont disposés en voûte ou sur le sol du four. Leur flamme irradie directement les tubes.

Dans certains fours, on trouve également des brûleurs à flamme longue montés sur les parois, fonctionnant soit à air induit, soit à air forcé.

II.5 Catalyseur :

Un catalyseur est une substance qui accélère la vitesse d'une réaction chimique sans être consommée au cours de celle-ci. Cependant, il n'influence pas l'état d'équilibre de la réaction. [13]

Autrement dit, le catalyseur ne figure pas dans l'équation chimique globale. Il agit plutôt au niveau du mécanisme réactionnel, en réduisant l'énergie d'activation et d'améliorer le taux de conversion du méthane.

Dans le cadre du reformage, le nickel constitue le principal élément actif des catalyseurs, que ce soit pour le reformage du gaz naturel ou celui des hydrocarbures lourds. Le type de support utilisé diffère selon le procédé de reformage employé.



Figure II.19 : Catalyseur nickel.

II.5.1 Catalyseur à base de nickel :

Le reformage est couramment effectué en utilisant des catalyseurs à base de nickel. Bien que ces catalyseurs présentent une activité élevée, ils sont particulièrement vulnérables au dépôt de carbone. Leur stabilité est fortement influencée par la nature et la composition du support.

Pour des raisons économiques, l'industrie privilégie l'utilisation de nickel déposé sur un support d'alumine comme catalyseur dans la réaction de reformage du méthane avec de la vapeur d'eau, afin de produire des gaz de synthèse [17].

- Le nickel est le métal de choix pour une utilisation industrielle courante :
 - Robuste
 - Bonne activité
 - Tolérant aux poisons
 - Fourni sous forme d'oxyde, il doit donc être réduit pour produire une activité catalytique.
 - Haute surface spécifique (supérieure à 100 m²/g).
 - Bonne résistance aux hautes températures (>800°C).
 - Faible sensibilité à la formation de coke (carbone solide).
 - Haute stabilité chimique dans un environnement réducteur

II.5.2 Propriétés du catalyseur supporté :

- ❖ **Stabilité thermique** : Les matériaux utilisés doivent être réfractaires afin de résister aux températures élevées.
- ❖ **Résistance à la vapeur** : Le support doit supporter des pressions partielles de vapeur élevées à haute température, sans dégradation.
- ❖ **Résistance mécanique** : Il est essentiel que le support tolère les contraintes thermiques et les pressions élevées.
- ❖ **Neutralité de surface** : Une surface non acide est requise pour limiter le craquage acide des hydrocarbures, qui conduit à la formation de carbone.

II.5.3 Les type du support :

- **Alpha-alumine** :
 - Céramique résistante et hautement inerte.
 - Peu d'interaction de surface avec Ni²⁺.
 - Basse température de réduction.
 - Surface de nickel stable sur support.

➤ **Aluminate de calcium :**

- « Ciment » céramique robuste à grande surface.
- Interaction modérée avec Ni²⁺.
- Température de réduction égale ou inférieure à la température d'entrée du reformeur à vapeur.

II.5.4 Mécanismes de dégradation :

- Formation de coke : encrassement du catalyseur par dépôts de carbone (surtout si excès de méthane ou température trop basse).
- Frittage : agglomération des particules de nickel, entraînant une diminution de la surface active.
- Empoisonnement : contamination par des traces de soufre ou de chlore non éliminées.
- Choc thermique : fissuration du support catalytique [17].

II.6 La réaction de reformage :

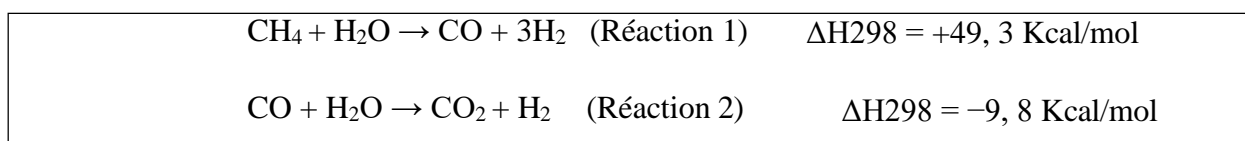
Les catalyseurs de reformage servent à accélérer les réactions entre les hydrocarbures légers (à faible poids moléculaire) et la vapeur d'eau.

Ils peuvent aussi faciliter les réactions entre ces hydrocarbures et le dioxyde de carbone, bien que la vapeur d'eau soit toujours présente dans le procédé. Ces réactions génèrent de l'hydrogène ainsi que du monoxyde de carbone.

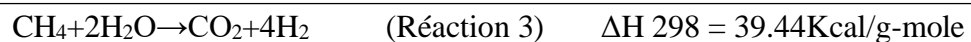
Dans le domaine industriel, elles sont exploitées pour produire de l'hydrogène, des gaz de synthèse et du gaz combustible.

Les gaz de synthèse jouent un rôle essentiel dans la fabrication de produits tels que l'ammoniac, le méthanol et divers alcools supérieurs.

Les réactions principales qui ont lieu simultanément pendant le reformage sont les suivantes :



La première réaction est fortement endothermique, nécessitant l'apport de chaleur externe. La seconde réaction, appelée conversion du CO (ou réaction de décalage du monoxyde de carbone), est légèrement exothermique. Les produits issus de la réaction de reformage sont H₂, CO et CO₂, accompagnés de petites quantités de méthane et de vapeur d'eau non convertis. Après le reformage, le CO présent peut réagir avec de la vapeur d'eau en présence d'un catalyseur à base de fer-chrome pour produire H₂ et CO₂. Par conséquent, la réaction globale de production d'hydrogène peut s'écrire comme suit [14] :



II.7 Bilan énergétique simplifié :

1-Chaleur fournie par la combustion du méthane dans les brûleurs.

2-Chaleur utilisée pour :

- La réaction endothermique de reformage.
- Le préchauffage des flux (méthane, vapeur).
- Les pertes thermiques (par rayonnement et convection).

II.8 Efficacité thermique du four :

- Calculée comme le rapport entre l'énergie absorbée par les tubes et celle fournie par la combustion.
- Valeurs typiques : 80 à 90 %.

II.9 Récupération d'énergie :

La chaleur des fumées est récupérée dans la chambre de convection pour :

- Préchauffer le mélange gaz/vapeur.
- Produire de la vapeur à partir d'eau d'alimentation.

Chapitre III :

Etude de la problématique.

III.1 Introduction :

Depuis plusieurs années, le four primaire de reformage catalytique connaît des problèmes récurrents de défaillances mécaniques, notamment l'apparition de fissures au niveau des tubes catalytiques. Ces dégradations sont généralement dues à des contraintes thermiques excessives, des chocs de température, ou à la corrosion interne provoquée par le gaz réformé. Ces fissures compromettent la sécurité de l'unité, réduisent la durée de vie des équipements et entraînent des arrêts fréquents pour maintenance. [15]

L'objectif de notre étude est : Identifier les causes des défaillances et proposer des solutions pour améliorer la fiabilité et la durabilité des tubes catalytiques dans le four primaire.



Figure III.20 : Fissure sur Tube Reformeur.

III.2 Les Causes du problème :

Ces défaillances des tubes catalytiques sont liées aux causes suivantes :

III.2.1 Augmentation excessive de la température :

Lorsque la température à l'intérieur du four dépasse la limite de tenue du matériau (souvent >1000 °C), cela peut entraîner un fluage du métal, c'est-à-dire une déformation lente sous contrainte, puis la fissuration. Les tubes catalytiques sont conçus pour fonctionner dans une plage de température précise. Au-delà, leur structure se dégrade irréversiblement. [15]

Des températures de fonctionnement trop élevées peuvent provoquer la recristallisation des oxydes métalliques constituant le catalyseur, réduisant sa surface active et son efficacité. Une température excessive peut également entraîner la fusion ou la déformation des tubes catalytiques.

III.2.2 Surchauffe localisée due à une mauvaise répartition du rayonnement thermique :

Le four fonctionne par rayonnement. Si certaines zones sont plus exposées à la flamme ou si le brûleur est mal réglé, la température n'est pas homogène, ce qui crée des points chauds. Ces zones peuvent subir une usure prématurée, générant des fissures thermiques localisées. [15]

III.2.3 Dégradation progressive par cycles thermiques :

Les tubes sont soumis à des cycles fréquents de montée et de descente en température (démarrages/arrêts, variations de charge), ce qui provoque une fatigue thermique. Cela engendre la formation de microfissures qui évoluent en fissures visibles puis en ruptures. [15]

III.2.4 Remplissage défectueux du catalyseur et formation de zones vides dans les tubes catalytiques :

Dans les fours de reformage primaire, le catalyseur est généralement chargé manuellement ou mécaniquement dans des tubes verticaux. Un remplissage incorrect du catalyseur peut entraîner la formation de zones vides ou irrégulièrement remplies à l'intérieur des tubes [17].

Tableau III.3 : Répartition du chargement catalytique dans le reformeur primaire [14] :

Catalyseur	Volume chargé (m³)	Hauteur chargée (mm)	Pourcentage (%)
KATALCO 25-4Q	19,3	4 973	39,9 %
KATALCO 57-6GQ	29,1	7 497	60,1 %
Total	48,4	12 469	100,0 %

Tableau III.4 : Outrages dans le Reformeur Primaire [14]:

Description	Valeur (mm)
Outage total (du collet supérieur à la ligne tangentielle inférieure)	13 231
Outage pour le catalyseur KATALCO 57-6GQ	5 734
Outage pour le catalyseur KATALCO 25-4Q	762

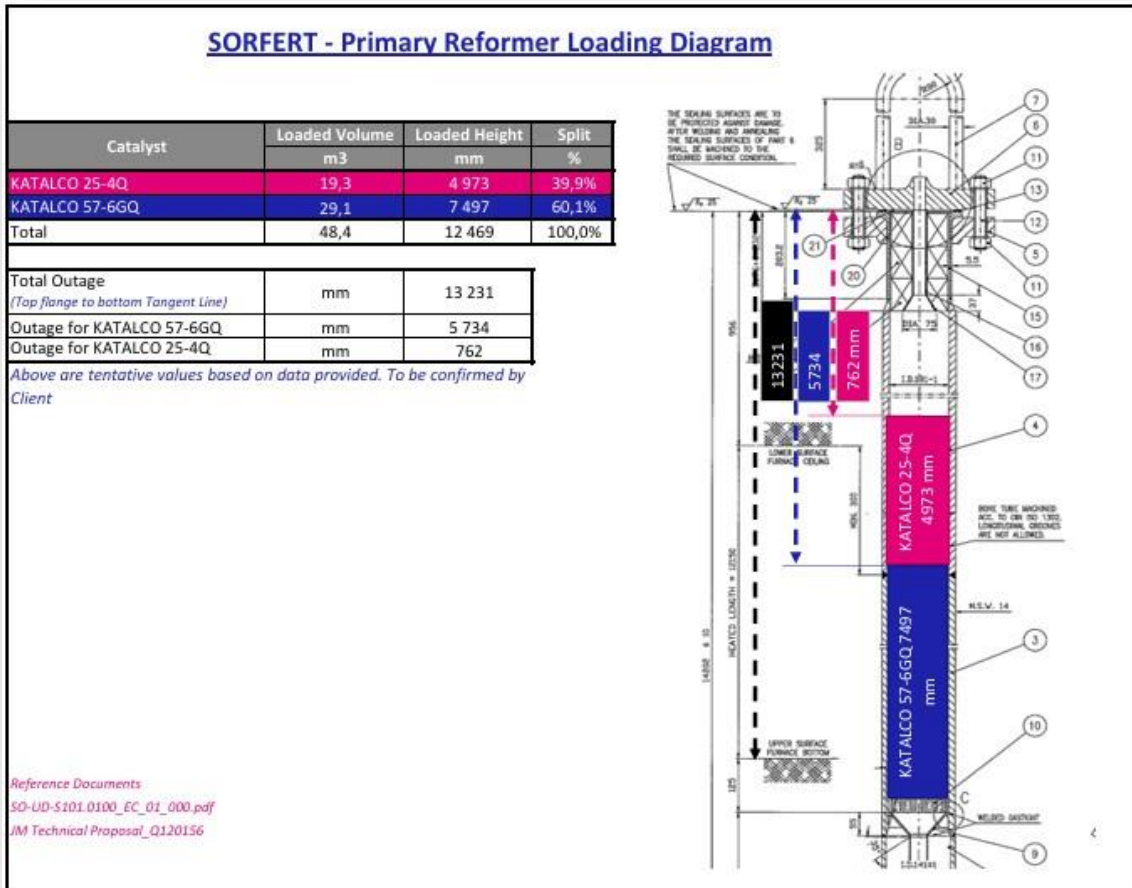


Figure III.21 : Remplissage du catalyseur dans tube.

III.2.5 Déséquilibre du rapport vapeur/gaz : risque de dépôt de carbone et d’empoisonnement du catalyseur :

Dans le procédé de reformage primaire, le rapport molaire vapeur d’eau / gaz (souvent CH₄) est un paramètre critique. Ce rapport est généralement maintenu autour de 3/1 pour assurer une conversion efficace du méthane et protéger le catalyseur. [16]

Lorsqu’il y a un défaut de procédé, notamment une insuffisance de vapeur d’eau par rapport au méthane, cela entraîne une réaction incomplète de reformage et favorise la formation de carbone solide (coke) selon la réaction :

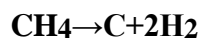


Tableau III.5 : Contrôle du rapport Vapeur/Gaz et prévention des dépôts de carbone [14] :

Vapeur	150 T/h
Gaz	57000 Nm ³ /h
Le rapport (Vapeur/Gaz)	3,05
Norme	2,8 < V/G < 3,2
Risque ou danger	V/G < 2,4 (Dépôt de carbone)

III.2.6 Corrosion interne due aux impuretés du gaz :

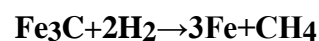
Si le gaz réformé contient des traces de soufre, de chlore ou d'autres contaminants, ces éléments peuvent réagir avec le métal des tubes à haute température, provoquant une corrosion interne. Cela affaiblit l'épaisseur du tube et favorise les fissures. [15]

L'absorption d'hydrogène atomique dans des matériaux à haute résistance entraîne une diminution de leur ductilité ainsi qu'une augmentation des contraintes internes.

Une forme de cloquage induite par l'hydrogène, susceptible de compromettre l'intégrité du matériau, en particulier en présence de contraintes mécaniques.

La décarburation et l'attaque par l'hydrogène constituent des mécanismes de dégradation. Dans les unités de conversion fonctionnant à haute pression et haute température, les structures en acier exposées à la phase gazeuse sont vulnérables à la fragilisation par l'hydrogène à chaud (au-delà de 200 °C).

À haute température, l'effet principal de l'hydrogène est la décarburation de l'alliage suivant :



III.3 Propriétés de l'hydrogène et risques associés :

À haute température, l'attaque par l'hydrogène entraîne une diminution de la résistance et de la ductilité du matériau, en raison de fissurations internes et de la décarburation

provoquées par la réaction de l'hydrogène absorbé avec les carbures présents dans l'alliage. [13]

Il est important de souligner que ces deux modes de dégradation dépendent de nombreux paramètres, notamment des caractéristiques du matériau (état, composition, microstructure), du milieu environnant (gaz, liquide, température), ainsi que des conditions de sollicitation mécanique, qu'elles soient statiques, dynamiques ou cycliques.

Les données d'accidentologie indiquent que ce phénomène survient fréquemment au niveau des coudes de tuyauterie ou dans les zones soumises à des contraintes particulières.

Selon le type d'endommagement rencontré, plusieurs mesures de prévention peuvent être envisagées : sélection de matériaux adaptés (avec un faible taux d'impuretés ou des alliages spécifiques comme ceux à base d'aluminium, peu sensibles à l'attaque de l'hydrogène), application de revêtements protecteurs, réduction des contraintes mécaniques, ainsi qu'une optimisation de la conception et de l'agencement des équipements.

III.3.1 Calcule d'hydrogène dans le four primaire :

Par chromatographie en phase gazeuse, nous avons identifié la formation des produits suivants :

Tableau III.6 : Compositions de charge sortante de la section :

Eléments	Pourcentage (%)
N ₂	1.59%
H ₂	68.03%
CO ₂	10.18%
CO	10.57%
CH ₄	9.58%
He	0.05%
Totale	100%

La composition de sortie des gaz est exprimée en pourcentage molaire. Mais travaillant au voisinage de la pression.

Dans la suite, on utilisera simplement le symbole % pour exprimer la composition en pourcentage d'un gaz.

Tableau III.7 : Conditions opératoire :

Pression à l'entrée	Pression à la sortie
34.86	29.93

Débit de gaz naturel = 25688 Nm³/h

Débit vapeur d'eau = 99243N Nm³/h

Tableau III.8 : Compositions de mélange gaz naturel-vapeur :

Éléments	Valeur (%)
CH ₄	83%
C ₂ H ₆	7.10%
N ₂	5.8%
C ₃ H ₈	2.25%
He	0.19%
CO ₂	0.21%
nC ₄ H ₁₀	0.60%
nC ₅ H ₁₀	0.15%
C ₆ H ₁₄	0.18%
iC ₄ H ₁₀	0.40%
iC ₅ H ₁₀	0.12%

Débit totale 124931 Nm³/h

Poids moléculaire de mélange gaz-vapeur 18,198Kg/mol.

Débit total (Kg/h) = Débit total (K mol /h) Poids moléculaire de mélange

$$= \frac{12493}{22.4} \times 18.198 = 101494.06 \text{ Kg/h}$$

$$\text{Débit molaire de gaz} = \frac{25688}{22.4} = 1146.79 \text{ K mol/h}$$

$$\text{Débit de vapeur} = \frac{99243}{22.4} = 4430.49 \text{ K mol /h.}$$

Le nombre de totale de carbone = 30.33%

On calcule l'indice de carbone :

$$I_C = \frac{83 \times 1 + 2 \times 7.1 + 3 \times 2.25 + 4 \times 1 + 5 \times 0.27 + 6 \times 0.19 + 1 \times 0.21}{100}$$

$$I_C = 1.106.$$

Débit = $I_C \times$ débit de gaz.

$$\text{Débit} = 1.106 \times 1146.78 = 1268.33 \text{ K mol/ h Carbone.}$$

Pour calculer la quantité de matière, on utilise la formule suivante :

$$Q_i = Q_G \times X_i$$

Q_i : Débit d'élément i

Q_G : Débit du gaz

X_i : Fraction molaire

Calcule de : CO, CO₂, CH₄, N₂, He :

$$\text{CO} = \frac{1268.33 \times 10.18}{30.33} = 425.70 \text{ Kmol/h}$$

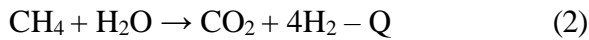
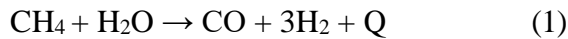
$$\text{CO}_2 = \frac{1268.33 \times 10.57}{30.33} = 442.01 \text{ Kmol/h}$$

$$\text{CH}_4 = \frac{1268.33 \times 9.58}{30.33} = 400.61 \text{ Kmol/h}$$

$$\text{N}_2 = \frac{1146.79 \times 1.59}{100} = 18.23 \text{ Kmol/h}$$

$$\text{He} = \frac{1146.79 \times 0.19}{100} = 2.18 \text{ Kmol/h}$$

Calcule débit d'H₂O :



D'après (1) : 1kmol de CO → 1kmol de H₂O

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{1268.33 \times 10.18}{30.33} = 425.70 \text{ Kmol/h}$$

D'après (2) : 1kmol de CO₂ → 2kmol de H₂O

$$\text{H}_2\text{O} = 2 \times \text{débit CO}_2$$

Mais on a 0.21% de CO₂ dans la composition du gaz

$$\text{CO}_2 = 2.66 \text{ kmol}$$

$$\text{Donc CO}_2 \text{ (produit)} = 442.01 - 2.66 = 439.35 \text{ kmol}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 2 \times 439.35 = 878.7 \text{ kmol}$$

$$\text{H}_2\text{O (réagit)} = 878.7 + 425.7 = 1304.40 \text{ kmol}$$

$$\text{Donc H}_2\text{O (sortie)} = \text{H}_2\text{O (entre)} - \text{H}_2\text{O (réagit)} = 4430.49 - 1304.40 = 3126.09 \text{ kmol}$$

Calcule de l'H₂ : 1 kmol de H₂O → 1 kmol H₂

$$\text{H}_2 = 1304.40 \text{ kmol}$$

H₂ dans le gaz :

$$\text{CH}_4 \rightarrow 83\% \rightarrow = \frac{1146.78 \times 83}{100} \times 2 = 1903.65$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 \rightarrow 7.1\% \rightarrow = \frac{1146.78 \times 7.1}{100} \times 3 = 244.26$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 \rightarrow 2.25 \rightarrow = \frac{1146.78 \times 2.25}{100} \times 4 = 103.21$$

$$\text{C}_4\text{H}_{10} \rightarrow 1 \rightarrow = \frac{1146.78 \times 1}{100} \times 5 = 57.34$$

$$\text{C}_5\text{H}_{12} \rightarrow = \frac{1146.78 \times 0.27}{100} \times 6 = 18.56$$

$$\text{C}_6\text{H}_{14} \rightarrow = \frac{1146.78 \times 0.18}{100} \times 7 = 14.45$$

Total = 2341.47

Donc H_2

$$(\text{sortie}) = 1304.40 + 2341.47 - 2 \times 400.61 = 2844.6 \text{ K mol}$$

D'après les calculs nous avons vu qu'il y a une grande quantité d'hydrogène formé au niveau de reforming primaire.

Surchauffe d'une partie des tubes catalytiques en présence d'un excès d'hydrogène peut effectivement provoquer une fragilisation ou une attaque du métal par l'hydrogène, un phénomène connu sous le nom de "fragilisation par l'hydrogène" (hydrogen embrittlement)* ou "corrosion sous contrainte induite par l'hydrogène".

Haute température et sous pression, l'hydrogène moléculaire (H_2) peut se dissocier en hydrogène atomique (H). Ces atomes d'hydrogène diffusent dans la structure cristalline du métal (souvent l'acier), réduisant sa ductilité.



Figure III.22 : Appareil chromatographique GC de laboratoire de SORFERT.

III.4 Conséquence du problème :

D'après les causes identifiées de fissuration des tubes catalytiques, le phénomène de (hot spot) points chauds en est une conséquence directe.

III.4.1 phénomène points chauds (hot spot) :**III.4.1.1 Définition du phénomène :**

Un hot spot est une zone localisée de surchauffe à l'intérieur des tubes catalytiques d'un four de reformage primaire. Ce phénomène résulte d'un déséquilibre thermique ou chimique qui provoque une élévation excessive de la température locale, dépassant celle du reste du lit catalytique. [18]



Figure III.23 : hot spot sur tube.

III.4.1.2 Méthode de détection du phénomène (hot spot) :

- **Mode visuel-Service technique :** Le service technique effectue des tournées de contrôle thermique sur les tubes du reformeur.
- La méthode utilisée est la mesure de la température de peau (skin temperature) avec un pyromètre infrarouge (Mesure de Température à Distance) [18].

- **Opérateur process :**

L'opérateur réalise une surveillance visuelle des tubes depuis les plateformes d'accès (zone four).



Figure III.24 : Un pyromètre de détection.


	SORFERT INSPECTION DEPARTMENT	Temperature Monitoring	REVISION N°: 00 DATE: 16-02-2025				
Skin temperature measurement catalyst tubes Reformer							
TAG N°:203B001	DATE: 16-02-2025	Inspector: BENDJEBBOUR A/rahim					
Device: Spectral PYROMETER KELLER PT120		Calibration Date 19-05-2021	Serial N°01/00360				
Reformer load 90 % ΔP = 3.23 bar			Hours:22H30				
Temperature Readings in the control room:							
Tunnels	A	B	C	D	E	F	G
Flue gas Temp. (°C)	/	/	/	/	/	/	/
Optical pyrometer temperature measurement:							
Rows	A	B	C	D	E	F	
Tubes	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)
1 - 8	893	916	913	905	909	917	
9 - 16	895	923	930	925	920	930	
17 - 24	905	928	939	939	940	937	
25 - 32	915	945	956	947	948	900	
33 - 40	911	930	955	945	937	896	
41 - 48	889	908	943	940	925	903	
Hot tubes remarked							
Rows	A	B	C	D	E	F	
Tubes	/	(09-40)	(09-48)	(09-48)	(17-48)	(09-24)	
Measured temperatures	NORMAL			ABNORMAL			✗
Remarks:							
-The skin temperature is high in row B- C-D-E-F							
-To be adjusted burner							
-Catalytic Tubes B07 & C24 of reformer 203B001 was cutted and removed on 20-11-2024							
-Operation shift team was witnessed our inspection .							

Figure III.25 : Fiche technique (skin temperature measurement catalyst tubes reformer).

III.5 Les impacts de la fissure dans les tubes catalytique :

III.5.1 Impact opérationnel :

- Le gaz s'échappe du tube à cause de la fissure, Cela perturbe la réaction de reformage (moins de production d'hydrogène).
- Le rendement de l'unité baisse.
- Il peut être nécessaire d'arrêter l'installation pour réparer → perte de production.
- Le catalyseur peut être endommagé à cause du déséquilibre thermique.
- L'élévation du débit du gaz process a provoqué une chute de pression."

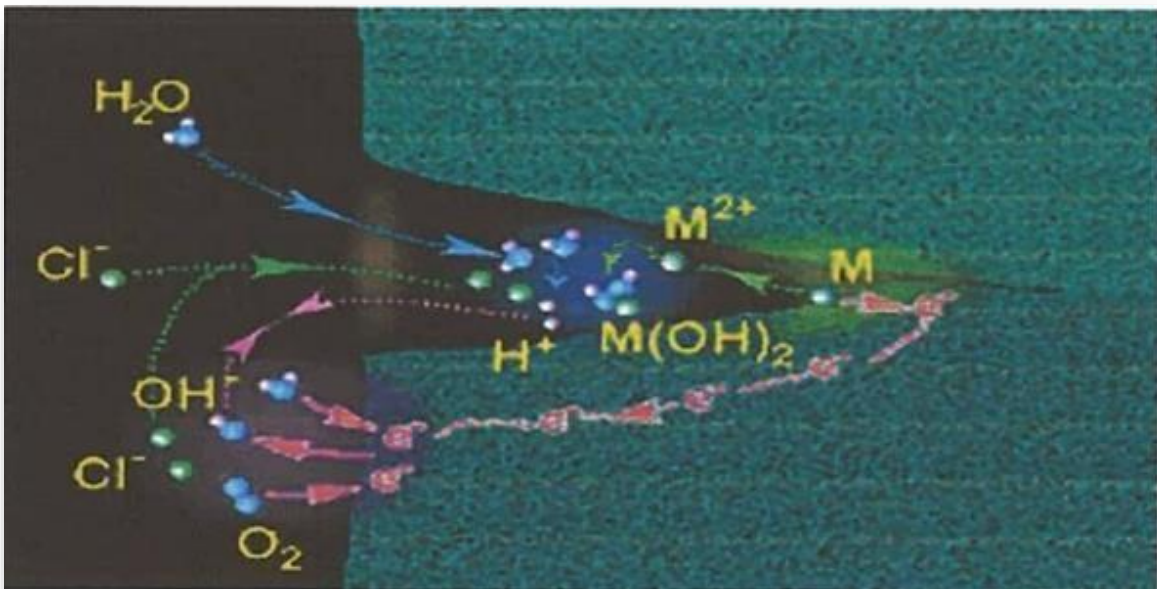


Figure III.26 : Réaction chlore avec l'hydrogène à la paroi du tube catalytique.

III.5.2 Impact sécuritaire :

- Le gaz qui fuit est inflammable et chaud → risque d'incendie ou explosion dans le four.
- Une fissure peut s'aggraver et provoquer une rupture brutale du tube.
- Risque pour la sécurité du personnel (brûlures, risque mortel).
- Situation non conforme aux normes de sécurité industrielle.

Chapitre IV :
Solutions et discussions

IV.1 Notions préventive :

IV.1.1 Prévention des tubes catalytiques et du catalyseur :

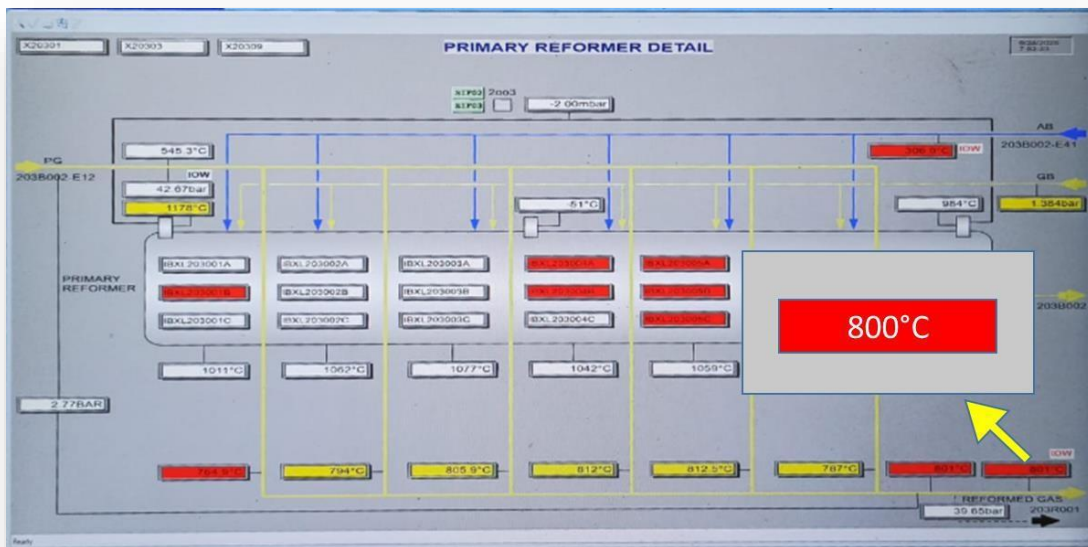


Figure IV.27 : Ajustement de la température.

IV.1.2 Remplacement de tubes fissurés ou bouchés :



Figure IV.28 : Bouchage de tube fissuré.

IV.1.3 Réparation des brûleurs endommagés :



Figure IV.29 : Changement de brûleur endommagé.

IV.2 Solutions proposés :

Dans le cadre de notre étude sur les défaillances et les fissures observées au niveau des tubes catalytiques du four primaire, plusieurs solutions ont été identifiées afin de minimiser les risques, améliorer les performances du reformeur et garantir la sécurité de fonctionnement à long terme. Voici une discussion détaillée des solutions proposées :

IV.2.1 Contrôle de la température des tubes catalytiques :

Le contrôle précis de la température des tubes à l'aide d'un pyromètre permet de détecter toute surchauffe localisée susceptible d'endommager les parois internes. Un ajustement approprié des brûleurs en réponse à ces mesures est crucial pour maintenir une répartition thermique uniforme et prévenir les points chauds, sources majeures de fissures longitudinales et de fatigue thermique.



Figure IV.30 : Contrôle de température (photo personnel).

IV.2.2 Prévention des zones vides lors du chargement du catalyseur :

Il est essentiel d'éviter la formation de zones vides ou de canaux préférentiels, en particulier dans les zones soumises à des températures élevées. Une répartition homogène du catalyseur permet d'assurer un écoulement uniforme des gaz, réduisant ainsi les variations locales de température et les risques de dégradation thermique.

IV.2.3 Contrôle du niveau de soufre dans le gaz d'alimentation :

La présence de soufre même à l'état de trace peut provoquer une désactivation irréversible du catalyseur. Il est donc recommandé de maintenir la teneur en soufre en dessous de 0,1 ppm grâce à une désulfuration efficace, complétée par une prise d'échantillon régulière pour s'assurer du respect de ce seuil critique.

IV.2.4 Suivi de la pression d'entrée et de sortie :

Le maintien d'une pression d'entrée de 42,6 bars et d'une pression de sortie de 39,6 bars, avec un delta de pression de l'ordre de 3 bars, permet de contrôler l'état de fonctionnement du lit catalytique. Une variation anormale de ce delta peut être le signe d'un colmatage ou d'un encrassement progressif nécessitant une intervention.

IV.2.5 Surveillance de la teneur en méthane :

Le suivi de la concentration en méthane (environ 12 %) dans le gaz traité constitue un indicateur de performance du reformeur. Une teneur anormalement élevée peut indiquer une conversion insuffisante ou une désactivation partielle du catalyseur.

IV.2.6 Intégration d'un système de monitoring SCADA/DCS :

L'installation d'un système SCADA ou DCS avec capteurs distribués sur le reformeur permet une surveillance continue et centralisée des paramètres critiques. Cela offre une traçabilité complète, améliore la prise de décision et permet la maintenance préventive.

IV.2.7 Paramétrage d'alarmes intelligentes :

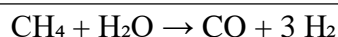
La mise en place d'alarmes liées aux seuils critiques de température, pression, delta P, etc., permet une réaction rapide en cas d'écarts de performance. Ces alarmes sont un outil indispensable pour la prévention des défaillances graves.

IV.2.8 Tableaux de bord de contrôle :

Des tableaux de bord visuels, intégrés dans la salle de contrôle, facilitent l'interprétation des données en temps réel et permettent aux opérateurs de réagir rapidement à toute anomalie. Ils contribuent à une meilleure efficacité opérationnelle.

IV.2.9 Optimisation du rapport vapeur/gaz :

Le maintien d'un rapport vapeur/gaz naturel élevé permet d'éviter la formation de carbone (coke) à l'intérieur des tubes catalytiques. Selon la réaction :



Une augmentation du rapport H₂O/CH₄ déplace l'équilibre vers la droite, favorisant la production d'hydrogène et réduisant la concentration en carbone. Cela contribue directement à la préservation de l'intégrité des tubes.

Une réduction du rapport vapeur/gaz (H_2O/C) favorise la formation et la déposition de carbone sur le catalyseur, pouvant entraîner son empoisonnement et une perte d'activité catalytique."

IV.2.10. Analyses :

Effectuation d'une analyse régulière de l'effluent gazeux afin d'assurer que la teneur en H_2S reste inférieure à 1 ppm, et un contrôle des fuites de méthane à environ 12 % en sortie du reformer primaire et 0,6 % en sortie du reformer secondaire. » :L'analyse de l'effluent permet de suivre la qualité du gaz de synthèse produit et de détecter d'éventuelles anomalies de conversion. Une teneur en H_2S supérieure à 1 ppm indiquerait une défaillance du système de désulfuration ou une contamination du gaz, pouvant endommager le catalyseur. De même, le contrôle des taux de méthane restants en sortie des deux étapes de reforming permet d'évaluer l'efficacité de la réaction catalytique. Des taux anormalement élevés peuvent signaler une dégradation du catalyseur ou des conditions de fonctionnement non optimales.

Analyse de la pureté de l'eau de chaudière ainsi que sa conductivité « Afin de prévenir l'entartrage et la corrosion dans les circuits de production de vapeur. » La vapeur est un agent clé dans le reforming primaire. Si l'eau utilisée pour la générer contient des impuretés ou présente une conductivité élevée, cela peut entraîner l'entartrage des surfaces d'échange ou la corrosion des tubes, réduisant leur efficacité thermique et leur durée de vie. Un contrôle régulier de la qualité de l'eau (notamment sa conductivité, son pH et sa dureté) permet de préserver l'intégrité du système générateur de vapeur, d'éviter les pannes et d'assurer un fonctionnement stable et sécurisé du reformeur.

Conclusion Générale :

À travers cette étude, nous avons mis en lumière les défaillances mécaniques affectant les tubes catalytiques du four de reformage primaire dans l'unité de production d'ammoniac de SORFERT. L'analyse a permis d'identifier les causes principales, notamment la surchauffe localisée, les cycles thermiques, les défauts de remplissage du catalyseur, le déséquilibre vapeur/gaz, ainsi que la corrosion interne liée aux impuretés gazeuses.

Les conséquences de ces fissures sont significatives : baisse de rendement, augmentation des arrêts de production, risques de sécurité accrus et détérioration du catalyseur. Pour remédier à cela, plusieurs mesures techniques et préventives ont été proposées : surveillance thermique accrue, contrôle des paramètres de procédé, amélioration du système de monitoring (SCADA/DCS), maintenance préventive et choix de matériaux adaptés.

Cette démarche vise non seulement à améliorer la fiabilité des équipements, mais aussi à renforcer la sécurité du personnel et la compétitivité du site à long terme. Ce travail ouvre également la voie à des études complémentaires sur l'optimisation énergétique et le vieillissement des matériaux en environnement extrême.

Recommandations :

En conclusion, l'application rigoureuse de ces solutions permet de prévenir les principaux facteurs de dégradation des tubes catalytiques. Leur mise en œuvre systématique contribuera à:

- Améliorer la longévité des tubes catalytiques du four primaire.
- Réduire les arrêts non planifiés et les coûts de maintenance.
- Garantir une conversion optimale dans le procédé de reforming.
- Optimiser la répartition thermique en ajustant finement les brûleurs pour éviter les zones de surchauffe.
- Standardiser les procédures de remplissage du catalyseur pour éviter les zones vides ou mal remplies.
- Évaluer périodiquement l'état des tubes catalytiques par inspection thermique et mesures de pression.
- Former régulièrement le personnel sur les risques thermiques, chimiques et la conduite en cas d'urgence.
- Analyser la qualité de la vapeur produite, en contrôlant la conductivité de l'eau de chaudière.

Il est donc recommandé d'intégrer ces pratiques dans les procédures opérationnelles standards, de renforcer la formation du personnel technique, et de poursuivre les efforts de maintenance préventive basée sur les données collectées en temps réel.

Références bibliographiques :

- [1] SORFERT Algérie, Présentation institutionnelle et données techniques du complexe, Document interne – Service Communication & Technique, 2023.
- [2] ThyssenKrupp Industrial Solutions, Steam Reforming Process Description, Brochure technique, 2010.
- [3] IFP Energies Nouvelles, Dégradation des matériaux à haute température dans les fours de reformage, Note technique, 2019.
- [4] Orascom Construction Industries (OCI), OCI Annual Report 2006–2007, Le Caire, Égypte, 2007.
- [5] ThyssenKrupp Industrial Solutions, Ammonia and Urea Plants – Process Technology Overview, Brochure technique UHDE, 2010.
- [6] Linde Gaz, Propriétés physico-chimiques de l’ammoniac et de l’urée, Données techniques, 2018.
- [7] UHDE ThyssenKrupp, Basic Engineering Design Package – Ammonia & Urea Plant for SORFERT, Document technique, 2010.
- [8] SORFERT Algérie, Manuel de fonctionnement du laboratoire – Contrôle qualité des produits, Document interne – Département Qualité, 2023.
- [9] SORFERT Algérie, Manuel HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement), Document interne – Département HSE, édition 2023.
- [10] Apodaca, L.E. (2020). Nitrogen (Ammonia) Statistics and Information. U.S. Geological Survey.
- [11] IFA – International Fertilizer Association. (2020). Ammonia Technology Roadmap – Hydrogen production from natural gas.
- [12] Ullmann’s – Section Reformer Tubes and Alloys (HK40, HP micro-alloyed).
- [13] Bartholomew, C.H., & Farrauto, R.J. (2011). Fundamentals of Industrial Catalytic Processes, 2nd ed., Wiley.
- [14] SOP système opération procédures Manuel SORFERT document N° : 023/2014/Fr.
- [15] Topsoe Technical Report. (2015). Failure Mechanisms in Steam Reformer Tubes – Causes and Prevention Strategies.

Références bibliographiques

[16] Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. (2012). Articles: Steam Reforming Furnaces, Catalyst Degradation, Carbon Formation, Hydrogen Damage. Wiley-VCH Verlag GmbH.

[17] Johnson Matthey.(2018).KATALCO™ Catalyst Loading Guidelines and Operational Data Sheets.JM Technical Services.

[18] Topsoe.(2017).Steam Reformer Operation – Detection and Management of Hot Spots.Technical Note.

[19] Topsoe. (2020).Best Operating Practices for Steam Reforming Units – Catalyst, Temperature and Process Control.