



Faculty of Sciences and Technology
Department of Process Engineering
Ref :...../U.M/F.S.T/2026

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق
رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت//2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés
Option: Génie chimique

THÈME

**Traitement et valorisation des tamis moléculaires
contaminé par le mercure au niveau de section de
démercurisation du complexe GP1/Z**

Présenté par

- 1- M^{elle} BERREZOUG Ilhem
- 2- M^{elle} BOUZIDI Zohra

Soutenu le 23/06/ 2026 devant le jury composé de :

Président :	KHELLADI Malika	MCA	Université de Mostaganem
Examineur :	BENDENIA Chahrazed	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	DIB MERAD Hanaa	MCA	Université de Mostaganem
Co-rapporteur :	BENDENIA Souhila	Professeur	Université de Mostaganem

Remerciement

Avant tout nous remercions « Allah » tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la force pour accomplir ce modeste travail.

Nous adressons nos sincères remerciements et notre gratitude à notre encadreur **M^{me} Hanaa DIB Merad**, maître de conférence « A » à l'université de Mostaganem, pour son aide précieuse et ses conseils judicieux et pour son suivi régulier pour mener à bien ce travail.

Nous adressons également nos vifs remerciements à **M^{me} Malika KHELLADI**, maître de conférence « A » à l'université de Mostaganem, d'avoir bien voulu présider le jury.

Nous voulons également exprimer nos sincères remerciements à **M^{me} Chahrazed BENDENIA**, maître de conférence « A » à l'université de Mostaganem, d'avoir accepté de juger et examiner ce travail.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à **M^{me} Souhila BENDENIA**, professeur à l'université de Mostaganem, pour avoir consacré son temps à nous co-superviser et à nous guider tout au long de la réalisation de ce projet.

Finalement, nos remerciements s'adressent à tous ceux ou celles qui ont contribué, de près ou de loin à l'accomplissement de ce mémoire.

Sommaire

Remerciement	
Résumé	
Introduction générale	01
Chapitre I : Généralités	
I. 1 Introduction	02
I. 2 La composition et impurtes du GPL	02
I. 2. 1 Nature et origine du GPL	02
I. 2. 2 Les impuretés du GPL et leurs impacts	03
I. 3 Le mercure	04
I. 3.1 Origine et formes dans le gaz	04
I. 3.1.1 Les formes du mercure dans le GPL	05
I. 3. 2 Propriétés physico-chimiques	06
I. 3. 3 Effets du mercure sur les installations industrielles	07
I. 3. 4 Effets du mercure sur l'environnement	07
I. 3. 5 Effets du mercure sur la santé humaine	08
I. 4 Le principe de la démercurisation	08
I. 4. 1 Traitement des déchets et stabilisation industrielle	09
I. 4. 1. a Stabilisation et solidification	09
I. 4. 1. b Distillation (Rétortation)	09
I. 4. 2 Épuration des effluents aqueux et gazeux	09
I. 4. 2. a Adsorption sur charbon actif	09
I. 4. 2. b Précipitation chimique	09
I. 4. 2. c Bioremédiation (ou bio-traitement)	09
I. 5 Les tamis moléculaires	09
I. 6 Principe de l'adsorption	10
I. 6.1 La physisorption (ou adsorption physique)	10
I. 6. 2 La chimisorption (ou adsorption chimique)	10
I. 7 CONCLUSION	11
Chapitre II : SECTION DEMERCURISATION	
II. 1 Introduction	12
II. 2 Description des installations principales du complexe GP1/Z	12
II. 2. 1 Unités de procédé et de fractionnement	12
II. 2. 2 Capacités de stockage	13
II. 2. 3 Infrastructures d'expédition et de logistique	13
II. 2. 4 Utilités, Systèmes de sécurité et de traitement environnemental	13
II. 3 La section de démercurisation	14
II. 3. 1 Description de l'unité de démercurisation	14
II. 3. 2 Base de calcul des équipements de la section démercurisation	14
II. 3. 2. a Élimination des particules solides par les filtres GPL (37-M-0010 A/B)	14
II. 3. 2. b Élimination de l'eau libre par les Coalesceurs GPL (37-M-0015 A/B)	15
II. 3. 2. c Élimination le mercure par les demercuriseurs (37-V-0021)	15
II. 3. 3 Description de circulation de procédé dans la section démercurisation	15
II. 3. 4 Description des demercuriseurs	16
II. 3. 5 Composition de la colonne de démercurisation	17
II. 3. 5. a MESH supérieure	17
II. 3. 5. b Couche supérieure de billes céramiques	17

II. 3. 5. c Lit catalytique (catalyseur d'élimination du mercure)	17
II. 3. 5. d Couche inférieure de billes céramiques	17
II. 3. 5. e MESH inférieure	17
II. 3. 6 Démercurisation par les adsorbants AxTrap 271 et AxTrap 273	18
II. 4 La norme internationale du mercure à la sortie du démercurisation	18
II. 5 Conclusion	19

Chapitre III : PARTIE PRATIQUE

III. 1 Introduction	19
III. 2 PROBLEMATIQUE	20
III. 3 Résultats expérimentaux et analyses	20
III. 3. 1 Appareillage de laboratoire	20
III. 3. 2 Suivides concentrations de mercure dans le GPL	20
III. 3. 3 Différentiel de pression (ΔP) et saturation de l'adsorbant	21
III. 4 Gestion des tamis contaminés par le mercure	23
III. 4. 1 Procédure de décontamination, d'inertage et de déchargement de l'adsorbant	24
III. 4. 2 Phase terminale du déchargement et inspection du réacteur	24
III. 5 Stockage et transport temporaire des déchets contaminés au mercure	25
III. 5. 1 Le stockage temporaire	26
III. 5. 2 Le transport	26
III. 5. 2. 1 Objectifs du transport	27
III. 5. 2. 2 Nature du déchet transporté	26
III. 6 Méthode de valorisation	27
III. 6. 1 Le procédé de distillation thermique	28
III. 6. 2 Méthode de rinçage	28
III. 6. 3 Description du Procédé de valorisation utilisé	30
III. 7 Le Procédé de Stabilisation/Solidification (S/S)	31
III. 7. 1 La réaction de stabilisation et solidification	33
III. 7. 2 Les paramètres du procédé de stabilisation/solidification	34
III. 7. 3 Les avantages de stabilisation et Solidification (S/S)	34
III. 8 Conclusion	35
Conclusion générale	36
Les références	37

Résumé

Ce travail de mémoire examine la gestion environnementale de la section de démercurisation des Gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL) au sein du complexe industriel GP1/Z. Face aux risques majeurs de fragilisation par les métaux liquides (FML) des échangeurs cryogéniques en aluminium et aux exigences sanitaires strictes liées à la toxicité du mercure, un diagnostic du procédé a été mené, révélant une saturation et colmatation de l'ancien lit d'adsorbant en fin d'année 2025, caractérisée par une hausse de la perte de charge ($\Delta P = 0,008 \text{ MPa}$) et un faible rendement ($\sim 27 \%$). L'implémentation subséquente d'un adsorbant de nouvelle génération (CMG 273) a permis de restaurer une efficacité épuratoire optimale supérieure à 93% , garantissant la conformité du GPL aux spécifications commerciales.

Au-delà de ce redressement technique, la contribution centrale de cette recherche réside dans le développement d'un procédé éco-efficace sur site pour le traitement et valorisation des tamis moléculaires usagés, classés comme déchets dangereux. Conçue comme une alternative à la distillation thermique classique, cette approche combine une lixiviation sélective douce en conditions modérées (pH 8–10, 20–40 °C) avec une technique de stabilisation et solidification (S/S), permettant d'extraire le mercure, de le valoriser, et de confiner durablement les résidus sous forme de métacinabre (HgS) dans une matrice ciment/chaux conforme aux normes environnementales de Classe I.

Mots-clés : Démercurisation ; Gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL) ; Gestion environnementale ; Tamis moléculaires usagés ; Stabilisation et Solidification (S/S).

Abstract

This project examines the environmental management of the Liquefied Petroleum Gas (LPG) demercuration section within the GP1/Z industrial complex. Given the major risks of liquid metal embrittlement (LME) in aluminum cryogenic heat exchangers and the strict health requirements related to mercury toxicity, a process assessment was conducted, revealing saturation and clogging of the old adsorbent bed by the end of 2025, characterized by an increase in pressure drop ($\Delta P = 0.008 \text{ MPa}$) and low efficiency ($\sim 27\%$). The subsequent implementation of a next-generation adsorbent (CMG 273) restored optimal purification efficiency to over 93% , ensuring that the LPG complies with commercial specifications.

Beyond this technical recovery, the central contribution of this research lies in the development of an eco-efficient on-site process for the treatment and recovery of spent molecular sieves, classified as hazardous waste. Designed as an alternative to conventional thermal distillation,

this approach combines mild selective leaching under moderate conditions (pH 8–10, 20–40 °C) with a stabilization and solidification (S/S) technique, enabling the extraction and recovery of mercury and the long-term confinement of residues in the form of cinnabar (HgS) within a cement/lime matrix that complies with Class I environmental standards.

Keywords: Mercury removal; Liquefied Petroleum Gas (LPG); Environmental management; Spent molecular sieves; Stabilization and solidification (S/S).

ملخص

GP1/Z. داخل المجمع الصناعي (GPL) تتناول هذه الأطروحة الإدارة البيئية لقسم إزالة الزئبق من غاز البترول المسال وفي مواجهة المخاطر الكبيرة المتمثلة في تآكل المبادلات التبريدية المصنوعة من الألومنيوم بفعل المعادن السائلة ، والمتطلبات الصحية الصارمة المرتبطة بسمية الزئبق، تم إجراء تشخيص للعملية، وكشف عن تشبع وانسداد (FML) (Delta P = 0,008 MPa) الطبقة القديمة من مادة الامتصاص في نهاية عام 2025، وهو ما تميز بارتفاع في فقدان الضغط استعادة (CMG 273) وانخفاض في الكفاءة (~ 27%). وقد أتاح الاستخدام اللاحق لمادة ماصة من الجيل الجديد (MPa) مع المواصفات التجارية (LPG) كفاءة تنقية مثالية تزيد عن 93٪، مما يضمن توافق الغاز النفطي المسال

إلى جانب هذا التصحيح التقني، تكمن المساهمة الأساسية لهذا البحث في تطوير عملية فعالة بيئيًا في الموقع لمعالجة وتدوير المناخل الجزيئية المستعملة، المصنفة كنفائات خطرة. صُممت هذه الطريقة كبديل للتقطير الحراري التقليدي، وهي تجمع ، مما (S/S) مع تقنية التثبيت والتصلب (40 °C ، pH 8–1020) بين عملية ترشيح انتقائي لطيف في ظروف معتدلة في مصفوفة من (HgS) يسمح باستخراج الزئبق، واستعادته، وحصر المخلفات بشكل دائم على شكل ميثاسينابر. الأسمت/الجير تتوافق مع المعايير البيئية للفئة الأولى.

للكلمات المفتاحية: إزالة الزئبق؛ غازات البترول المسالة؛ الإدارة البيئية؛ المرشحات الجزيئية المستعملة؛ التثبيت والتصلب.

INTRODUCTION GENERALE

Le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL), composé essentiellement de propane et de butane, occupe une place prépondérante au sein de la matrice énergétique mondiale en raison de sa polyvalence et de sa haute densité énergétique. Néanmoins, sa valorisation commerciale et son intégrité industrielle dépendent de l'élimination stricte des contaminants co-produits lors de son extraction ou de son fractionnement. Si les impuretés courantes (eau, composés soufrés, hydrocarbures lourds) altèrent la qualité du combustible, la présence de traces de mercure (Hg) induit des risques technologiques, environnementaux et sanitaires d'une gravité critique. Unique par son état liquide aux conditions normales, ce métal lourd provoque l'amalgamation et la fragilisation par les métaux liquides (FML), menaçant directement la structure des échangeurs cryogéniques en alliage d'aluminium des unités de traitement.

Le respect des strictes spécifications internationales, limitant souvent la concentration résiduelle en mercure à 5ng/Nm^3 , exige le recours à des technologies de démercuration par adsorption sur lits de garde. Notre travail répond à cet impératif technique à travers une étude appliquée au complexe GP1/Z de Sonatrach à Arzew, infrastructure majeure de fractionnement et de valorisation des GPL.

L'objectif de ce mémoire est de diagnostiquer les performances opérationnelles de la section de démercuration de ce complexe et d'explorer les voies de traitement et de valorisation des adsorbants usés contaminés.

Ce mémoire s'organise en trois chapitres principaux, encadrés par une introduction et une conclusion générale. Le premier chapitre pose les fondements théoriques relatifs à la composition du GPL, aux propriétés physico-chimiques du mercure, à ses impacts multi-échelles, ainsi qu'aux mécanismes d'adsorption sur tamis moléculaires. Le deuxième chapitre est dédié à la caractérisation des infrastructures industrielles du complexe GP1/Z et au fonctionnement spécifique de sa section de démercuration, équipée de démercureurs en parallèle utilisant l'adsorbant actif CMG 273 (AxTrap). Enfin, le troisième chapitre expose le volet expérimental et pratique, centré sur le suivi des concentrations de mercure, l'analyse des rendements d'épuration avant et après le remplacement du lit, ainsi que l'évaluation des techniques de gestion et de valorisation durable de ces déchets hautement toxiques.

CHAPITRE I

GENERALITES

I. 1 INTRODUCTION

Le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL), constitué principalement de propane et de butane, occupe une place stratégique dans la matrice énergétique mondiale en raison de sa polyvalence et de sa densité énergétique à l'état liquide. Cependant, sa valorisation commerciale et industrielle est conditionnée par l'élimination rigoureuse des contaminants co-produits lors de son extraction ou de son raffinage. Si les impuretés conventionnelles (composés soufrés, eau, hydrocarbures lourds) affectent la qualité de la combustion et corrodent les réseaux, la présence de traces de mercure (Hg) représente un risque technologique et environnemental critique.

Ce métal lourd, unique par son état liquide aux conditions normales, engendre de graves verrous opératoires. Au sein des unités de traitement, il induit des phénomènes de fragilisation par les métaux liquides (FML) et d'amalgamation, menaçant directement l'intégrité des échangeurs cryogéniques en alliage d'aluminium. À cette vulnérabilité structurelle s'ajoutent une écotoxicité et une neurotoxicité sévère, qui imposent des restrictions réglementaires strictes pour la protection de la santé humaine et des écosystèmes.

Ce premier chapitre pose les fondements théoriques indispensables à la compréhension de ces problématiques. Après avoir défini la composition et les impuretés globales du GPL, nous détaillerons les propriétés physico-chimiques et les impacts multi-échelles du mercure. Enfin, nous analyserons les principes de la démercuration par adsorption, en explicitant le rôle des tamis moléculaires mis en œuvre au sein du complexe GP1/Z pour garantir la conformité et la sécurité des installations. [1]

I.2 LA COMPOSITION ET IMPURTES DU GPL

I.2.1 Nature et origine du GPL

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) est un mélange d'hydrocarbures légers maintenu à l'état liquide sous pression pour en faciliter le stockage et le transport. À l'échelle mondiale, environ 60 % de sa production est issue du traitement du gaz naturel, tandis que les 40 % restants proviennent du raffinage du pétrole brut. On note également l'émergence progressive de GPL d'origine renouvelable (bio GPL).

Sur le plan chimique, les GPL appartiennent à la famille des alcanes (ou paraffines). Ils sont majoritairement composés de propane (C_3H_8) et de butane (C_4H_{10}), et peuvent contenir de faibles proportions de méthane (CH_4), d'éthane (C_2H_6) et de pentane (C_5H_{12}).

- **Le propane (C_3H_8)** : Hydrocarbure saturé à trois atomes de carbone. Sa tension de vapeur élevée lui confère une forte volatilité, ce qui permet de maintenir une pression de vaporisation suffisante, même à de basses températures.
- **Le butane (C_4H_{10})** : Hydrocarbure saturé à quatre atomes de carbone. Plus lourd que le propane, il présente une température d'ébullition proche de 0 °C à pression atmosphérique et offre un pouvoir calorifique volumique élevé. [2]

I.2.2 Les impuretés du GPL et leurs impacts

Selon l'origine du produit et les procédés de traitement appliqués, le GPL peut contenir diverses impuretés. Celles-ci altèrent la sécurité des installations, la performance de la combustion et l'intégrité des équipements.

Les principales impuretés rencontrées et leurs effets sur le système sont synthétisés ci-dessous:

- **Composés soufrés (Hydrogène sulfuré H_2S)** : Naturellement présents dans le gaz brut ou issus de certains procédés de raffinage, ils provoquent une usure par corrosion des métaux et génèrent des odeurs caractéristiques (parfois renforcées volontairement à des fins de sécurité pour la détection des fuites).
- **Eau et hydrates** : L'humidité résiduelle favorise la corrosion interne des capacités de stockage et des réseaux de distribution. De plus, lors d'une détente rapide du gaz, la baisse de température associée peut entraîner la formation d'hydrates de gaz ou de cristaux de glace susceptibles d'obstruer les conduites.
- **Hydrocarbures lourds et fractions résiduelles (C_5^+)** : Ces molécules à chaîne plus longue peuvent se condenser dans les circuits, entraînant l'encrassement des régulateurs, des injecteurs et des vannes, tout en modifiant le pouvoir calorifique du mélange.
- **Traces de gaz incondensables (Oxygène, azote, air)** : Introduites généralement lors des transferts ou du stockage, ces traces favorisent les phénomènes d'oxydation et peuvent modifier les limites d'inflammabilité du fluide.

- **Particules solides et sédiments** : Issues de la détérioration des conduites ou du transport (oxydes de fer, sulfates), elles provoquent le colmatage des filtres et l'usure abrasive des composants mécaniques. [3]

I.3 LE MERCURE

Le mercure (Hg) est un métal lourd qui présente la particularité physique unique d'être liquide aux conditions normales de température et de pression. Il est naturellement présent à l'état de traces dans les hydrocarbures liquides et gazeux. En dehors de l'industrie pétrolière, ses propriétés spécifiques ont longtemps favorisé son utilisation dans la fabrication d'instruments de mesure (thermomètres, baromètres), de composants électriques (commutateurs), de produits chimiques, de pigments pour peintures, ainsi que dans les amalgames dentaires.

L'exposition à des concentrations excessives de mercure — qu'elle se fasse par voie respiratoire (vapeurs), cutanée ou alimentaire — engendre de graves risques pour la santé humaine en raison de sa haute toxicité et de son caractère bioaccumulable. Cette dangerosité, particulièrement prégnante dans les secteurs industriels manipulant ce métal, a accéléré le développement de méthodes analytiques de pointe. Celles-ci permettent désormais de détecter et de quantifier le mercure à l'état de traces ou d'ultra-traces (de l'ordre du ppb ou du ppt). [4]

I.3.1 Origine et formes dans le gaz

Historiquement, les industries de traitement du pétrole et du gaz n'intégraient pas la recherche du mercure dans leurs protocoles standards. Cependant, l'avènement des procédés de traitement cryogénique et de liquéfaction des gaz a radicalement modifié cette approche.

Dans les unités de production de gaz de pétrole liquéfié (GPL) ou de gaz naturel liquéfié (GNL), l'utilisation d'échangeurs de chaleur à plaques en aluminium est courante en raison de leurs excellentes performances thermiques. Or, la présence de mercure liquide, combinée à des traces d'humidité, s'avère critique pour ces installations :

- **Corrosion de l'aluminium** : Le mercure provoque un phénomène de fragilisation par les métaux liquides (FML) et d'amalgamation de l'aluminium. En détruisant la couche d'alumine protectrice naturellement présente à la surface du métal, il engendre une corrosion perforante extrêmement rapide et catastrophique.

- **Dégradation des aciers** : Dans certaines conditions opératoires, le mercure peut également induire des mécanismes de fissuration ou de corrosion par piqûres sur les équipements en acier inoxydable.

Par conséquent, la quantification et l'élimination du mercure en amont des unités cryogéniques (via des lits de garde dédiés) sont devenues des étapes impératives pour garantir l'intégrité structurelle des usines de traitement. [5]

I.3.2 Les formes du mercure dans le GPL

Le mercure est présent dans le GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) et les hydrocarbures sous différentes formes chimiques, classées en cinq grandes catégories :

- **Mercure métallique / élémentaire (Hg^0)** : Métal liquide, brillant et argenté à température ambiante. Il s'évapore facilement en vapeurs invisibles et inodores. Sous l'action de micro-organismes, il se transforme en mercure organique (méthylation) et s'accumule dans la chaîne alimentaire (poissons et crustacés).
- **Composés inorganiques** : Sels de mercure (souvent sous forme de poudres blanches ou de cristaux) nés de l'association du mercure avec le soufre, le chlore ou l'oxygène. Le chlorure mercurique ($HgCl_2$) est le plus dangereux de cette catégorie car il est volatil, traverse facilement les membranes biologiques et forme des complexes organomercuriels. [6]
- **Mercure organique (Organomercuriels)** : Composés liés au carbone (diméthylmercure, phénylmercure, éthylmercure, etc.), dont le plus répandu dans l'environnement est le **méthylmercure**. Leurs propriétés et leur solubilité dépendent directement de leur radical organique (R). On y distingue notamment : le mercure organométallique (RHg^+) : Exemple du chlorure de méthylmercure (CH_3HgCl), qui a la particularité d'être soluble dans l'eau. [7]
- **Le mercure complexe (HgK)** : Forme sous laquelle le mercure se lie à des molécules présentes dans les hydrocarbures (acides organiques, sulfures organiques, thiophènes, mercaptans ou thiols).
- **Composés de mercure en suspension** : Particules solides de très faibles dimensions en suspension (comme le sélénure de mercure $HgSe$ [généralement confondu avec le cinabre HgS ou l'oxyde de mercure HgO]). Ces composés ont la particularité d'être insolubles dans l'eau et dans le pétrole. [8]

I.3.2 Propriétés physico-chimiques

Le mercure (symbole **Hg**, du grec *hydrargyrum* signifiant "argent liquide") est un métal noble présent naturellement dans l'environnement. C'est le seul métal connu pour être à l'état liquide dans les conditions normales de température et de pression.

À l'état naturel, on le trouve principalement sous forme de **cinabre (HgS)**, illustré sur la figure I.1, un minéral de couleur rouge vif. L'extraction du mercure s'effectue par le grillage de ce minerai à l'air libre, selon la réaction chimique suivante :



Figure I. 1 : Le cinabre (HgS).

Sur le plan structural, le mercure liquide conserve un arrangement atomique ordonné (structure hexagonale compacte mise en évidence par analyse aux rayons X), une organisation qui persiste même lorsqu'on le chauffe jusqu'à 250 °C. De plus, sa tension superficielle exceptionnellement élevée explique sa géométrie en gouttes et le fait qu'il ne mouille pas les surfaces avec lesquelles il entre en contact. Le tableau I. 1 regroupe les différentes propriétés physiques et chimiques.

Tableau I.1 : propriétés physico-chimique de Hg.

Propriété	Valeur caractéristique
Masse atomique	200,59 g/mol
Masse volumique (à 20 °C)	13,6 g/cm ³
Point de fusion	-38,9°C
Point d'ébullition	357,3°C
Pression de vapeur saturante (à 20 °C)	0,26 Pa
Tension superficielle	471,6 dyne/cm (0,471N/m)
Conductivité thermique	8.34 W/ (m .k)
Chaleur massique spécifique	138,8 J/kg.K
Viscosité dynamique (μ)	1,55 .10 ⁻³ Pa
Potentiel standard d'oxydoréduction	$E^0 (\text{Hg}^{2+}/\text{Hg}) = +0,85 \text{ V}$

I.3.3 Effets du mercure sur les installations industrielles

I.3.3.a. Corrosion et fragilisation des structures métalliques

- La fragilisation par les métaux liquides (*Liquid Metal Embrittlement* - LME) constitue un phénomène physico-chimique critique au cours duquel la diffusion rapide du mercure liquide au sein des joints de grains d'un métal solide induit une défaillance structurale majeure. Sur le plan mécanique, l'adsorption du mercure provoque une diminution drastique de l'énergie de cohésion des liaisons interatomiques à la pointe des fissures, annihilant la ductilité locale du matériau et amorçant une fissuration intergranulaire sévère. Ce processus cible préférentiellement les alliages de cuivre ainsi que les alliages d'aluminium, des matériaux pourtant essentiels à la fabrication des échangeurs thermiques cryogéniques. En raison d'une cinétique de propagation extrêmement élevée, ces fissures conduisent à des ruptures catastrophiques soudaines dont les incidences industrielles directes, caractérisées par des pertes de confinement et des fuites majeures, imposent des arrêts techniques non planifiés des installations.
- Amalgamation et processus de corrosion : Au-delà des phénomènes de fragilisation mécanique, le mercure se distingue par sa capacité à se dissoudre ou à réagir directement avec certains éléments métalliques pour former des amalgames. Contrairement aux mécanismes de corrosion acide conventionnels, ce processus se caractérise par l'insertion du mercure dans le réseau cristallin du matériau hôte ou par l'altération irréversible de ses couches de passivation protectrices, une dégradation superficielle qui expose le métal sous-jacent et initie des phénomènes de corrosion galvanique ou généralisée. Les alliages à forte teneur en zinc manifestent une susceptibilité accrue à cette amalgamation, tandis que la présence de mercure s'avère délétère pour les composants en acier inoxydable et provoque l'empoisonnement par contamination des catalyseurs d'hydrogénation. À terme, ces réactions physico-chimiques

entraînent des incidences industrielles majeures, telles qu'une réduction nominale de l'épaisseur des parois, une dégradation de l'intégrité des cordons de soudure et, par conséquent, une perte progressive de la résistance structurelle des conduites et des appareils à pression.

I.3.4 Effets du mercure sur l'environnement

Le mercure induit des répercussions écologiques durables, gouvernées par des mécanismes de bioaccumulation aquatique et de biomagnification le long de la chaîne alimentaire, ce qui surexpose les prédateurs supérieurs. La persistance de ce contaminant dans les sols et les sédiments, crée des réservoirs secondaires qui pérennisent la pollution. Ce phénomène est accentué par la dynamique atmosphérique décrite par le transport du mercure sous formes gazeuse et particulaire permet une dispersion à grande échelle, délocalisant l'impact environnemental loin des sources émettrices.

I.3.5 Effets du mercure sur la santé humaine

Le mercure est un élément hautement toxique dont les répercussions sur l'organisme humain varient selon sa forme chimique et la voie d'exposition :

- **Neurotoxicité** : Le mercure élémentaire ainsi que le méthylmercure (forme organique) présentent une toxicité sévère pour les systèmes nerveux central et périphérique. L'inhalation de vapeurs de mercure ou l'exposition à ses différents composés peuvent ainsi engendrer de graves troubles neurologiques et comportementaux.
- **Toxicité systémique (Inhalation)** : L'inhalation de vapeurs mercurielles altère de manière significative les systèmes nerveux, digestif et immunitaire.
- **Effets des composés inorganiques** : Sous sa forme inorganique, le mercure s'avère particulièrement corrosif pour la peau et les yeux. De plus, son ingestion induit une forte toxicité rénale (néphrotoxicité).

En somme, l'exposition aux différents dérivés du mercure, qu'elle se produise par voie respiratoire, digestive ou cutanée, représente un risque majeur pour la santé humaine

I.4 LE PRINCIPE DE LA DEMERCURISATION

Les stratégies de traitement du mercure et de ses dérivés diffèrent selon le contexte d'application, la gestion des résidus industriels, la décontamination environnementale ou la prise en charge thérapeutique des intoxications humaines.

I.4.1 Traitement des déchets et stabilisation industrielle

Afin rendre le mercure inoffensif avant son stockage définitif en centre d'enfouissement technique, plusieurs procédés physico-chimiques sont mis en œuvre:

I.4.1.a Stabilisation et solidification : Le mercure liquide subit une conversion chimique en sulfure de mercure (HgS), également appelé cinabre. Cette forme solide se distingue par une grande stabilité thermodynamique et une très faible solubilité. Le produit obtenu est ensuite immobilisé au sein d'une matrice solide (généralement cimentaire) afin de prévenir tout risque de lixiviation.

I.4.1.b Distillation (Rétortation) : Ce procédé thermique consiste à chauffer les déchets sous pression réduite (sous vide) afin de vaporiser le mercure. Les vapeurs sont ensuite condensées pour récupérer le métal à un degré de pureté élevé, permettant ainsi son recyclage ou son confinement sécurisé. [10]

I.4.2 Épuration des effluents aqueux et gazeux

I.4.2.a Adsorption sur charbon actif : Cette technique constitue l'une des méthodes les plus efficaces pour l'extraction du mercure présent dans les eaux usées ou les effluents gazeux d'incinération. L'efficacité de ce procédé est fortement tributaire du pH de la solution.

I.4.2.b Précipitation chimique : Ce procédé repose sur l'ajout d'agents précipitants (notamment des sulfures) afin de convertir le mercure dissous en composés solides insolubles, facilement séparables par filtration ou décantation.

I.4.2.c Bioremédiation (ou bio-traitement) : Cette approche biotechnologique utilise des biomasses spécifiques (micro-algues, souches bactériennes sélectionnées) capables de bio-accumuler ou de bio-adsorber les ions mercuriques.

I.5 LES TAMIS MOLECULAIRES

Les tamis moléculaires sont des matériaux adsorbants hautement poreux, principalement d'origine zéolithique ou synthétique, caractérisés par une structure cristalline tridimensionnelle possédant des pores de dimensions uniformes à l'échelle angström. En raison de cette porosité calibrée, ils agissent selon un principe de sélectivité de taille et de polarité, permettant de séparer ou de purifier des mélanges fluides complexes. Dans l'industrie pétrochimique et le traitement du gaz, ces adsorbants jouent un rôle critique. Ils sont massivement mis en œuvre dans des procédés de déshydratation profonde, de purification des coupes d'hydrocarbures et d'élimination sélective de contaminants traces (tels que les composés soufrés, le dioxyde de carbone et le mercure), garantissant ainsi la conformité des produits commerciaux et la protection des infrastructures aval contre la corrosion.

C'est dans ce cadre qu'au sein du complexe GP1/Z de Sonatrach, le gaz de pétrole liquéfié (GPL) en provenance du sud algérien subit plusieurs étapes de purification, parmi lesquelles l'élimination du mercure par adsorption sur des tamis moléculaires de type CMG273. Ce matériau, disposé en lit fixe, est spécifiquement conçu pour le captage et la rétention du mercure présent dans la charge de GPL. Son principe de fonctionnement repose sur une phase active à base de sulfures métalliques qui piège efficacement le contaminant par chimisorption, indépendamment de la nature de la matrice gazeuse, éliminant ainsi les risques opérationnels et environnementaux liés à sa présence [11].

I. 6 PRINCIPE DE L'ADSORPTION

L'adsorption du mercure constitue une technique de purification et de dépollution mature, reposant sur la rétention et la fixation des espèces mercurielles — qu'elles soient sous forme vapeur ou solubilisées en phase liquide — à la surface d'un solide poreux hautement divisé, qualifié d'adsorbant [12]. Ce phénomène interfacial d'accumulation se décline selon deux mécanismes thermodynamiques et cinétiques distincts, souvent complémentaires dans les procédés industriels

I.6.1 La physisorption (ou adsorption physique)

Ce mécanisme primaire implique l'attraction des atomes ou molécules de mercure par le biais d'interactions de faible énergie, principalement des forces de Van der Waals ou des

interactions électrostatiques à longue portée [13]. Caractérisée par une faible chaleur d'adsorption (généralement inférieure à 40kJ/mol) et une cinétique rapide, la physisorption est un processus exothermique et intrinsèquement réversible. Bien qu'elle permette une accumulation initiale dans la microporosité du matériau, sa sélectivité vis-à-vis du mercure reste limitée, et l'augmentation de la température favorise le phénomène inverse de désorption.

I.6.2 La chimisorption (ou adsorption chimique)

Ce mécanisme met en jeu un transfert ou un partage d'électrons, conduisant à la formation de liaisons chimiques fortes (covalentes ou ioniques) entre le mercure et les sites actifs de la surface ou des agents de fonctionnalisation insérés (tels que le soufre ou l'iode) [14]. Ce processus requiert une énergie d'activation plus élevée et dégage une chaleur d'adsorption nettement supérieure (supérieure à 80kJ/mol). Dans le cas des lits de démercurisation industriels (comme les tamis moléculaires dopés au soufre), la chimisorption conduit à la formation d'espèces hautement stables, telles que le sulfure de mercure (HgS), garantissant une rétention irréversible et hautement sélective, indispensable pour atteindre des teneurs résiduelles de l'ordre du nanogramme par mètre cube.

I.7 CONCLUSION

Ce chapitre a permis d'établir les bases théoriques régissant la purification du Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) face aux défis posés par ses contaminants. Si les impuretés conventionnelles dictent les standards de qualité du combustible, la présence de traces de mercure (Hg) constitue un risque industriel, environnemental et sanitaire critique. Ses propriétés physico-chimiques uniques favorisent des mécanismes de dégradation sévères, tels que la fragilisation par les métaux liquides (FML) et l'amalgamation, menaçant directement l'intégrité des échangeurs cryogéniques en aluminium. Pour pallier ces risques multi-échelles, le complexe GP1/Z met en œuvre un procédé de démercurisation par adsorption sur tamis moléculaires ; la compréhension de ces fondements théoriques ouvre ainsi la voie à l'analyse pratique et expérimentale des performances de cette unité d'épuration, qui sera l'objet de notre étude.

CHAPITRE II

SECTION

DEMERCURISATION

II.1 INTRODUCTION

Le complexe GP1/Z de Sonatrach, implanté dans la zone industrielle d'Arzew, est l'une des structures majeures à l'échelle internationale pour la production de gaz de pétrole liquéfié (GPL). Le GPL est un mélange d'hydrocarbures légers obtenu soit comme sous-produit de la distillation atmosphérique du pétrole brut, soit par fractionnement du gaz naturel sur les sites de production. Sa composition varie selon sa provenance ; l'alimentation du complexe GP1/Z se compose essentiellement de propane, de butane, ainsi que de traces d'éthane et, occasionnellement, de pentane. Ce chapitre propose une étude du procédé du complexe GP1/Z, en détaillant spécifiquement le fonctionnement de la section de démercurisation.

II.2. Description des installations principales du complexe GP1/Z

Les infrastructures industrielles du complexe GP1/Z s'articulent autour de quatre grands sous-ensembles : les unités de procédé (trains de fractionnement), les capacités de stockage, les installations logistiques de chargement, ainsi que les unités d'utilités et de traitement environnemental [15].

II.2.1 Unités de procédé et de fractionnement

Le cœur du complexe est constitué de 09 trains de traitement de GPL, dont trois ont été intégrés lors des récentes phases d'extension (Phase 3). Chaque train de traitement intègre séquentiellement les sections suivantes :

- Section de déshydratation : pour l'élimination des traces d'eau.
- Section de séparation (fractionnement) : assurant le fractionnement des coupes d'hydrocarbures.
- Section de réfrigération : pour la mise en température des produits.
- Section de chauffe (huile chaude) : assurant les apports thermiques du procédé.

En complément de ces trains, le complexe intègre :

- Une section de démercurisation dédiée au piégeage du mercure.
- Une section de dépentanisation spécifique aux trois trains de la Phase 3.
- Deux (02) unités de liquéfaction des gaz d'évaporation (*boil-off*).

II.2.2 Capacités de stockage

Pour assurer la flexibilité des opérations et la gestion des flux, le complexe dispose d'un parc de stockage diversifié, adapté aux conditions thermodynamiques des produits :

- Stockage de la charge : Vingt-deux (22) sphères d'une capacité unitaire de 1 000 m³.
- Stockage réfrigéré (basse température) : Quatre (04) bacs de propane et quatre (04) bacs de butane, d'une capacité de 7 000 m³ chacun.
- Stockage à température ambiante : Quatre (04) sphères de 500 m³ pour le propane et le butane commerciaux, ainsi qu'une (01) sphère de 500 m³ dédiée au pentane.

II.2.3 Infrastructures d'expédition et de logistique

L'exportation et le transfert des produits finis sont assurés par :

- Deux (02) quais de chargement maritime (D1 et M6) conçus pour accueillir des navires méthaniers/butaniers d'une capacité allant de 4 000 à 5 000 tonnes de GPL.
- Une rampe de chargement pour les camions-citernes.

II.2.4 Utilités, Systèmes de sécurité et de traitement environnemental

Le support énergétique et environnemental du complexe est garanti par les installations annexes suivantes :

- Alimentation électrique et contrôle : Deux (02) sous-stations électriques alimentées par le réseau SONELGAZ, assistées par six (06) générateurs de secours (groupes électrogènes). La conduite du procédé est centralisée au niveau de cinq (05) salles de contrôle, appuyées par un système global de télésurveillance.
- Gestion de l'eau et utilités : Une station de pompage d'eau de mer et deux (02) unités de dessalement de technologie SIDEM.
- Traitement des effluents et protection de l'environnement : Deux (02) stations de traitement des eaux usées rejetées (WWT Phase I et Phase II), complétées par une unité de déshuilage et une unité de neutralisation des rejets chimiques.

Parmi les installations mentionnées précédemment, une attention particulière est accordée à la section de démercuration, qui fait l'objet d'un développement approfondi dans la suite de ce chapitre.

II.3 LA SECTION DE DÉMERCURISATION

Durant notre stage pratique au sein du complexe gazier GP1/Z de Sonatrach, nous avons étudié en profondeur le fonctionnement de l'unité de démercurisation. Cette immersion sur le terrain nous a également permis de mener des observations détaillées au sein du laboratoire d'analyses et de la salle de contrôle, dont nous exposons ci-après les principaux aspects techniques.

II.3.1 Description de l'unité de démercurisation

Intégrée à la phase III du complexe GP1/Z, cette unité est dédiée à l'élimination du mercure contenu dans le GPL. Le GPL est fourni par la Région de Transport Ouest (RTO) et acheminé vers l'installation par canalisation, avec un débit nominal de 1 500 tonnes par heure (T/h)

Le flux traverse la section de démercurisation via des vannes motorisées de type HV-1571, avant d'être orienté vers les sphères de charge sous des conditions de pression et de température strictement contrôlées. Cette section assure ensuite l'alimentation en GPL des neuf trains de traitement responsables de la production des produits finis. Elle est structurellement composée de :

- Deux filtres A et B à Cartouches (120 cartouches par filtre), chargés de retenir les particules solides ;
- Deux coaliseurs, conçus pour éliminer l'eau libre et redresser l'écoulement ;
- Six démercuriseurs, dédiés au piégeage du mercure.

II.3.2 Base de calcul des équipements de la section démercurisation

Cette section présente les caractéristiques techniques, les bases de calcul et les marges de flexibilité opérationnelle prévues pour chaque équipement principal de l'unité.

II.3.2.a Élimination des particules solides par les filtres GPL (37-M-0010 A/B)

Les filtres GPL ont pour fonction de retenir les particules solides (*slops*) en suspension dans la charge d'entrée, illustrée sur la figure II.1. La teneur initiale en particules solides en amont du traitement est de 0,1 ppm. Après filtration, le diamètre des particules résiduelle est ramené à une valeur inférieure à 5 micromètres, garantissant ainsi la protection des équipements en aval.

II.3.2.b Élimination de l'eau libre par les Coalesceurs GPL (37-M-0015 A/B)

Les coalesceurs assurent la séparation de l'eau libre contenue dans le flux GPL. En entrée, la teneur en eau libre ne doit pas excéder 100 ppm, tandis qu'en sortie, cette concentration est réduite à une valeur inférieure à 25 ppm. Le principe de fonctionnement repose sur la coalescence des fines gouttelettes d'eau en gouttes plus volumineuses, qui se séparent ensuite naturellement du flux gazeux par différence de densité entre les deux phases.

II.3.2.c Élimination le mercure par les demercuriseurs (37-V-0021)

Cette section est équipée de six ballons d'adsorption disposés en parallèle (notés A, B, C, D, E et F) et dédiés à la rétention du mercure. La concentration en mercure dans la charge d'entrée varie de 1000 ng/Nm³. Le procédé permet d'atteindre en sortie une concentration résiduelle maximale de 5 ng/Nm³[16].



Figure II. 1 : Les filtres de la section de démercurisation (complexe GP1/Z).

II.3.3 Description de circulation de procédé dans la section démercurisation

Les filtres, coaliseurs et demercuriseurs GPL sont implantés à l'est de la zone de chargement par camion (desservant les clients NAFTAL et les opérateurs privés), et au sud de l'aire de stockage sphérique alimentant la phase II. [17]

Le flux de GPL subit d'abord un prétraitement mécanique et physique au sein des filtres et des coalesceurs, avant d'être introduit dans les unités de démercurisation. Le GPL épuré alimente ensuite les réservoirs de propane des phases I, II et III du complexe.

II.3.4 Description des démercuriseurs

Les démercuriseurs sont des colonnes d'adsorption à lit fixe. Le flux de GPL y circule de manière descendante (flux de haut en bas) afin de stabiliser le lit. Chaque colonne est équipée d'un trou d'homme facilitant les opérations de maintenance, notamment le déchargement et le rechargement du lit d'adsorbant.

Lors du passage du GPL à travers le démercuriseur, le mercure est capté sélectivement par l'adsorbant. En début de cycle, la cinétique d'adsorption fait que la partie supérieure du lit retient prioritairement le mercure élémentaire. Chaque type d'adsorbant possède une capacité de charge maximale au-delà de laquelle il atteint la saturation et perd toute efficacité de captation.

La figure II.2 présente la structure interne d'une colonne d'adsorption de mercure, illustrant les différents composants qui la constituent.

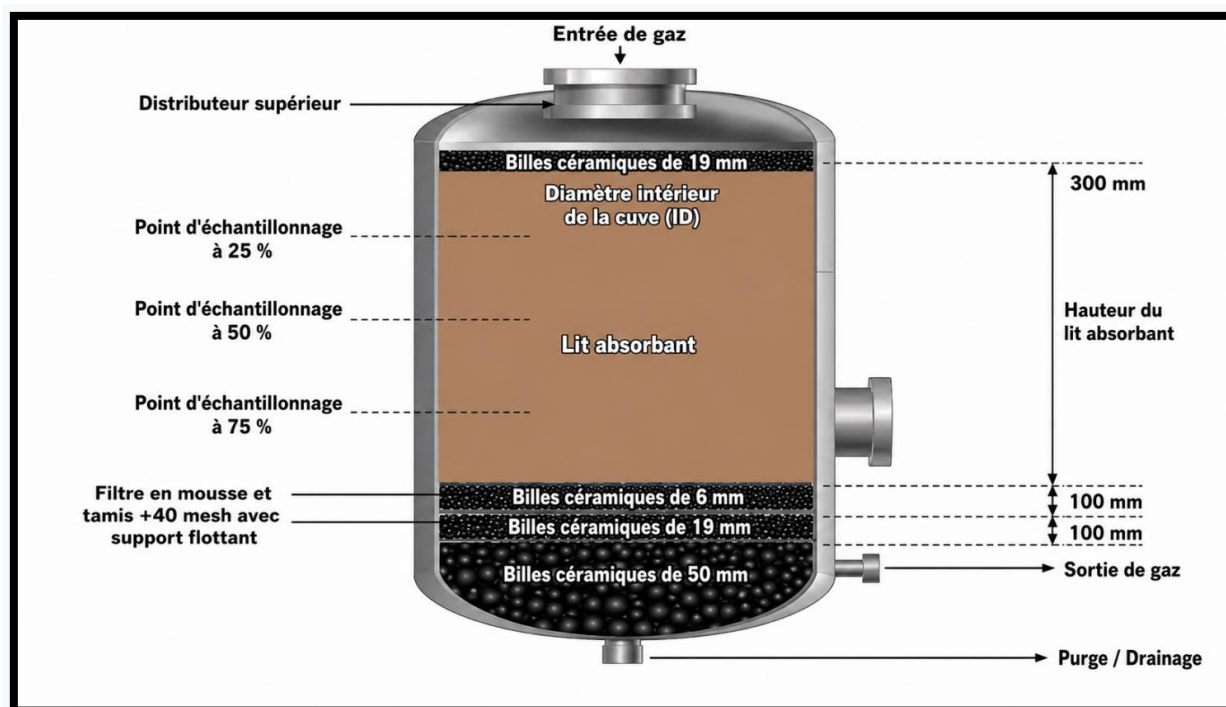


Figure II. 2 : colonne d'adsorption de mercure du démercuriseur.

II.3.5 Composition de la colonne de démercurisation

Les six colonnes du complexe GP1/Z possèdent une géométrie et une capacité identiques. Leur structure interne se compose, de haut en bas, des éléments suivants :

II.3.5.a MESH supérieure : constituée d'une grille métallique associée à une toile, elle assure le maintien mécanique de la couche de billes céramiques supérieure ainsi que du catalyseur, afin de prévenir tout phénomène de fluidisation lors de variations brusques de pression.

II.3.5.b Couche supérieure de billes céramiques : Il s'agit d'une couche inerte à base de cuivre, dont la structure poreuse joue un rôle de support pour le lit catalytique et distribue uniformément le flux de GPL en tête de colonne.

II.3.5.c Lit catalytique (catalyseur d'élimination du mercure) : C'est la phase active du système, composée de l'adsorbant CMG 273, responsable de la capture et de l'élimination du mercure contenu dans le gaz traité.

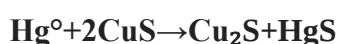
II.3.5.d Couche inférieure de billes céramiques : De composition identique à la couche supérieure, elle constitue un support poreux inerte à base de cuivre, placé en dessous du lit catalytique.

II.3.5.e MESH inférieure : composée également d'une grille métallique et d'une toile, elle sert de support structurel à l'ensemble des couches superposées (billes céramiques et catalyseur).

II.3.6 Démercurisation par les adsorbants AxTrap 271 et AxTrap 273

AxTrap 271 & AxTrap 273 consistent tous les deux en une phase active de sulfure de cuivre dispersée sur une surface de support alumine très résistant. La dispersion fine de la phase active sur la surface d'adsorbant et le réseau poreux optimisé du support alumine favorisent tous les deux l'efficacité du mécanisme d'adsorption.

Le procédé de démercurisation repose sur un phénomène de chimisorption (adsorption chimique). Le mercure élémentaire Hg réagit de manière irréversible avec la phase active de l'adsorbant, constituée de sulfure de cuivre CuS, pour former du sulfure de mercure HgS ou cinabre, illustré sur la figure III.3, selon l'équation chimique suivante :



Bien que cette réaction soit légèrement exothermique, les concentrations de mercure à l'état de traces sont si faibles qu'aucune élévation thermique notable n'est enregistrée dans les conditions normales d'exploitation.

Le schéma II.3 suivant illustre le principe de fonctionnement du lit d'adsorbant AxTrap™ Bed utilisé pour la capture du mercure.

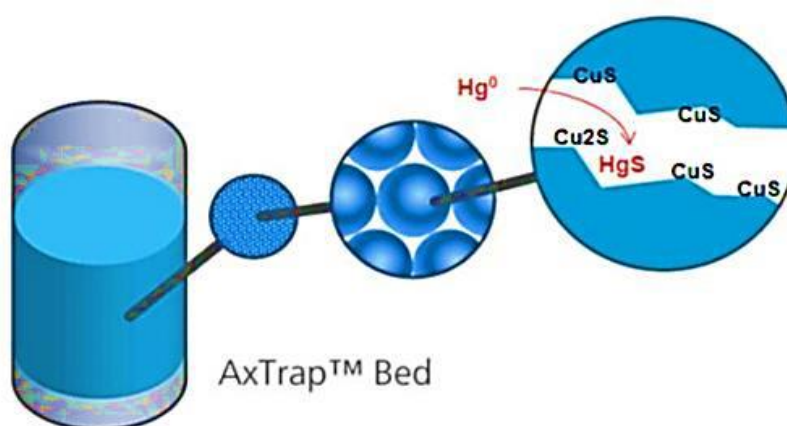


Figure II.3 : schéma représentatif d'adsorbant axtrap TM Bed.

II.4 LA NORME INTERNATIONALE DU MERCURE Á LA SORTIE DU DÉMERCURISATION

La réglementation internationale fixant la teneur résiduelle en mercure à la sortie d'une unité de démercurisation n'est pas uniforme ; elle est conditionnée par l'état physique, la composition chimique et la destination aval du fluide traité.

Dans le cas spécifique des Gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL), les spécifications industrielles et environnementales imposent une concentration maximale admissible particulièrement drastique, généralement inférieure ou égale à 5ng/Nm^3 [16]. Ce seuil ultra-trace est indispensable pour s'affranchir des risques de fragilisation par les métaux liquides (LME : *Liquid Metal Embrittlement*). En effet, le mercure élémentaire réagit par amalgamation avec les métaux non ferreux, notamment l'aluminium constitutif des échangeurs de chaleur à plaques brasées. Ce phénomène de corrosion catastrophique peut provoquer des défaillances structurales subites et des fuites majeures au sein des complexes pétrochimiques.

II.5 CONCLUSION

Ce deuxième chapitre a permis de caractériser le procédé du complexe GP1/Z de Sonatrach tout en détaillant le fonctionnement critique de sa section de démercurisation.

CHAPITRE III

PARTIE PRATIQUE

III.1 INTRODUCTION

Le traitement et la valorisation des tamis moléculaires contaminés au mercure, issus des lits de démercuration des gaz et du gaz de pétrole liquéfié (GPL), exigent la mise en œuvre de procédés spécialisés. Cette spécificité opérationnelle est dictée par la haute toxicité de ce métal lourd et par les risques majeurs de fragilisation qu'il fait courir aux équipements industriels (notamment le phénomène de fragilisation par les métaux liquides).

III.2 PROBLÉMATIQUE

Ce mémoire a pour objectif d'analyser en profondeur les méthodes de traitement, de conditionnement, de stockage et de transport des tamis contaminés au mercure au sein de GP1/Z. En explorant les voies émergentes de valorisation et de traitement durable de ce type de déchets, cette étude propose des améliorations techniques et opérationnelles visant à optimiser les pratiques existantes, en s'appuyant sur les normes environnementales les plus strictes et les contraintes réelles du secteur industriel.

III.3 RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSES

III.3.1 Appareillage de laboratoire

Pour quantifier le mercure résiduel dans le GPL, le département laboratoire du complexe GP1/Z utilise les équipements suivants:

- Un analyseur de mercure à ultra-traces Mercury Instruments UT-3000, illustré sur la figure III.1;
- Des sacs d'échantillonnage spécifiques (baudruches) d'une capacité de 3 litres.



Figure III.1 : appareil d'analyse Hg UT-3000.

III.3.2 Suivi des concentrations de mercure dans le GPL

Le tableau III.1 présente les mesures des teneurs en mercure (Hg) effectuées à l'entrée et à la sortie du démercuriseur au cours de la période de novembre-décembre 2025.

Tableau III.1 : Évolution des concentrations de mercure à l'entrée et à la sortie du démercuriseur (Nov-Déc 2025)

La date	Hg entré (ng / m ³)	Hg sortie (ng/ m ³)	Rendement (R%)
27/11/25	151,7	90,0	40,67 %
28/11/25	62,50	60,0	4,00 %
29/11/25	72,70	60,0	17,47 %
30/11/25	98,20	53,7	45,32 %
02/12/25	63,4	34,4	45,74%
03/12/25	54,2	31,4	42,06%

Pour analyser l'efficacité du démercuriseur, il est essentiel de calculer le rendement d'épuration pour chaque date. Ce rendement se calcule avec la formule suivante :

$$R(\%) = \frac{\text{concentration Entrée} - \text{Concentration Sortie}}{\text{Concentration Entrée}} \times 100$$

L'analyse du tableau III.1 met en évidence une variabilité importante des concentrations de mercure (Hg) en entrée du dispositif, oscillant entre un minimum de 62,50 ng/m³ (le 28/11/25) et un pic de 151,7 ng/m³ (le 27/11/25). À la sortie de l'unité, les teneurs en mercure restent globalement plus stables, se situant dans une fourchette allant de 53,7 ng/m³ à 90,0 ng/m³.

Bien que le démercuriseur parvienne systématiquement à réduire la charge en mercure de l'effluent gazeux, le rendement d'épuration mesurée s'avère globalement faible et irrégulière. Le rendement d'épuration maximal est enregistré le 30 novembre avec 45,32% d'élimination, tandis qu'un effondrement critique des performances est observé le 28 novembre, affichant un

rendement quasi nul de 4,00%. Sur l'ensemble de cette période, le rendement moyen d'abattement s'établit à seulement 26,86%.

Un rendement moyen de aux environ de 27% est bas pour un procédé industriel de démercurisation, cela suggèrent souvent que le lit de d'adsorption peut-être en fin de vie (a atteint la saturation). Donc il faut changer les tamis ou bien les régénérer.

Le tableau III.2 présent les résultats d'analyse du taux de mercure (Hg) à l'entrée et à la sortie d'un démercuriseur pour quatre dates réparties entre février et mars 2026.

Tableau III.2 : Évolution des concentrations de mercure à l'entrée et à la sortie dudémercuriseur (fev-mars 2026)

La date	Hg entré (ng / m ³)	Hg sortie (ng/ m ³)	Hg sortie (ng/ Nm ³)	Rendement (R%)
24/02/26	26,3	11,0	0,453	58,17%
27/02/26	435,6	96,9	3,99	77.75%
03/03/26	236,9	48,30	1,98	79,61%
18/03/26	254,42	16,43	0,676	93,54%

Le tableau III.2 présente les concentrations de mercure mesurées à l'entrée et à la sortie du démercuriseur durant la période allant de février à mars 2026. Les résultats font apparaître une diminution significative de la teneur en mercure après le passage du gaz à travers le lit d'adsorption, ce qui démontre la performance du procédé.

Afin de s'aligner sur les conditions normales, la concentration de mercure mesurée à la sortie du démercuriseur a été convertie en ng/Nm³ à l'aide de la relation suivante :

$$[\text{Hg}]_{\text{ng/m}^3} = [\text{Hg}]_{\text{ng/Nm}^3} \times \left(\frac{P_{\text{réelle}}}{1,013} \right) \times \left(\frac{273,15}{T(^{\circ}\text{C}) + 273,15} \right)$$

Où :

$P_{\text{réelle}}$ représente la pression du gaz (en bar) à la sortie du démercuriseur ;

T °C représente la température du gaz en Celsius, à la sortie du démercuriseur.

Dans le cas spécifique du gaz de pétrole liquéfié (GPL), les normes industrielles et environnementales imposent une concentration maximale admissible en mercure généralement inférieure ou égale à 5ng/Nm³ [16]. Durant la période sous revue (Tableau III.2), les exigences de cette norme sont globalement satisfaites.

À la suite du remplacement du tamis moléculaire par un adsorbant neuf (CMG 273), le système affiche une nette amélioration de ses performances. Le procédé semble d'ailleurs plus efficace (avec un meilleur rendement) lorsque la concentration en mercure à l'entrée est significative (200 ng/m³) plutôt que lorsqu'elle est très faible (comme l'illustrent les données du tableau III.1). Cela confirme l'influence directe de la charge entrante sur la cinétique ou l'équilibre du procédé de démercurisation.

De plus, les résultats indiquent que la performance optimale a été observée le 18/03/2026, avec une réduction de la concentration de 254,42 à 16,43ng/m³, soit un taux d'élimination supérieur à 93%. Le procédé s'avère désormais mature et hautement performant pour éliminer le mercure, permettant ainsi de protéger efficacement les équipements en aval et de réduire significativement les impacts environnementaux.

III.3.3 Différentiel de pression(ΔP) et saturation de l'adsorbant

L'analyse de la perte de charge (ΔP), définie comme la différence de pression entre l'entrée et la sortie d'un équipement, constitue un indicateur fondamental pour évaluer l'état de colmatage d'un filtre ou d'un lit adsorbant. En effet, l'accumulation de particules solides en amont de l'adsorbant obstrue les pores du milieu poreux et restreint le passage du flux gazeux. Cette restriction dynamique engendre une augmentation significative de la pression en amont. Ainsi, une élévation critique de la ΔP sert de signal d'alarme, révélant la saturation ou l'encrassement du système. Si cette valeur continue de croître au-delà des seuils admissibles malgré les vérifications opérationnelles, la mise à l'arrêt de l'unité devient impérative. Il convient alors de procéder à un écumage (*skimming*) de la section supérieure du lit de garde. Cette intervention consiste à extraire une épaisseur de matière comprise entre 40 cm et 1 mètre afin d'éliminer les fractions fines colmatantes, avant de renouveler le matériau adsorbant [17].

Lors de notre stage pratique au sein du complexe GP1/Z, nous avons enregistré une valeur de $\Delta P = 0,008$ MPa, durant la période novembre et décembre 2025, témoignant d'un encrassement

effectif du lit d'adsorption. Cette résistance hydraulique résulte de l'accumulation de particules solides combinée à la saturation progressive du milieu par le mercure. La perte d'efficacité de ces tamis moléculaires (constitués de cuivre supporté sur alumine) est principalement imputable à la saturation de leurs sites actifs par le mercure. Ce phénomène de désactivation est exacerbé par plusieurs facteurs concomitants : le colmatage des pores, l'altération structurelle des tamis, la co-adsorption d'hydrocarbures lourds et d'eau, la contamination issue du pipeline, la défaillance des filtres amont, ainsi que le vieillissement thermique et mécanique de l'adsorbant en l'absence de maintenance préventive.

Une fois saturés en mercure, les tamis de la section de démercuration perdent leurs propriétés opérationnelles et sont qualifiés de déchets dangereux. En raison de la haute toxicité de ce métal lourd, leur gestion et leur élimination finale doivent strictement se conformer aux normes environnementales en vigueur. Le mercure présente en effet des risques majeurs : une forte persistance écotoxicologique, un potentiel élevé de bioaccumulation dans les chaînes trophiques, ainsi qu'une toxicité sévère pour la santé humaine, que ce soit par inhalation de vapeurs ou par contact cutané direct.

III.4 GESTION DES TAMIS CONTAMINÉS PAR LE MERCURE

Les résultats obtenus confirment la saturation en mercure des lits de tamis moléculaires de la section de démercuration. Cette contamination confère à ces adsorbants le statut de déchets dangereux, imposant une gestion rigoureuse conformément aux normes environnementales en vigueur. En raison de sa haute toxicité, le mercure engendre des risques écologiques et sanitaires majeurs. Il se distingue notamment par une forte persistance environnementale, un potentiel élevé de bioaccumulation dans les chaînes trophiques, ainsi qu'une sévérité toxicologique accrue pour les opérateurs par inhalation ou contact cutané prolongé. Au-delà de ces impacts écotoxicologiques, la présence résiduelle de ce métal lourd menace l'intégrité structurelle des installations industrielles en initiant des phénomènes de fragilisation par le mercure liquide (FML), de corrosion et d'encrassement des équipements aval [18].

III.4.1 Procédure de décontamination, d'inertage et de déchargement de l'adsorbant

Préalablement au renouvellement du lit d'adsorbant usé (de type AxTrap 271 ou AxTrap 273), l'élimination de la fraction hydrocarbonée résiduelle et la mise en sécurité de l'adsorbant sont impératives. Ce protocole de conditionnement s'articule selon les étapes opératoires suivantes :

- **Isolation de l'équipement** : L'alimentation de l'adsorbeur en charge brute est interrompue afin d'isoler l'unité du reste du procédé.
- **Vidange des phases liquides** : Les fractions hydrocarbonées liquides accumulées en fond d'enceinte sont évacuées par purge via la ligne de drainage inférieure.
- **Dépressurisation** : La pression interne du réacteur est abaissée de manière progressive jusqu'à l'obtention d'une pression manométrique proche de la pression atmosphérique (pression relative nulle).
- **Inertage et entraînement (stripping) à l'azote** : Un balayage continu à l'azote est initié via les piquages supérieurs ou les lignes de drainage. Ce processus vise à réduire la concentration volumique en hydrocarbures du flux gazeux sortant sous le seuil critique de 0,2 % vol. Cette phase de purge requiert typiquement une durée opératoire d'environ 12 heures. Pour optimiser la désorption ainsi que l'évacuation des composés résiduels, l'application de cycles alternés de pressurisation et de dépressurisation à l'azote (*pressure swinging*) peut être envisagée.

Une fois l'enceinte inertée, l'ouverture de la bride de tête ou de la tubulure de déchargement est effectuée sous un léger flux d'azote de maintien, garantissant l'absence d'entrées d'air. Le déchargement mécanique des solides est ensuite réalisé par aspiration sous vide, soit par la section supérieure, soit par la tubulure de soutirage inférieure. Les solides usés et contaminés sont directement conditionnés dans des fûts en acier hermétiquement scellés sur site, sécurisant ainsi leur entreposage temporaire avant leur expédition vers un centre de traitement agréé.

III.4.2 Phase terminale du déchargement et inspection du réacteur

La phase finale du déchargement requiert l'accès d'opérateurs à l'intérieur de la capacité. Cette intervention est strictement conditionnée par le port d'équipements de protection individuelle (EPI) spécifiques aux risques chimiques et aux milieux confinés. Elle permet l'extraction des derniers résidus d'adsorbants et le nettoyage intégral des parois internes.

Une fois le réacteur exempt de tout sédiment, une inspection structurelle et visuelle de la capacité est menée. Enfin, l'ensemble des tamis et supports contaminés résiduels sont collectés et centralisés en vue de leur prise en charge ultérieure comme déchets dangereux.

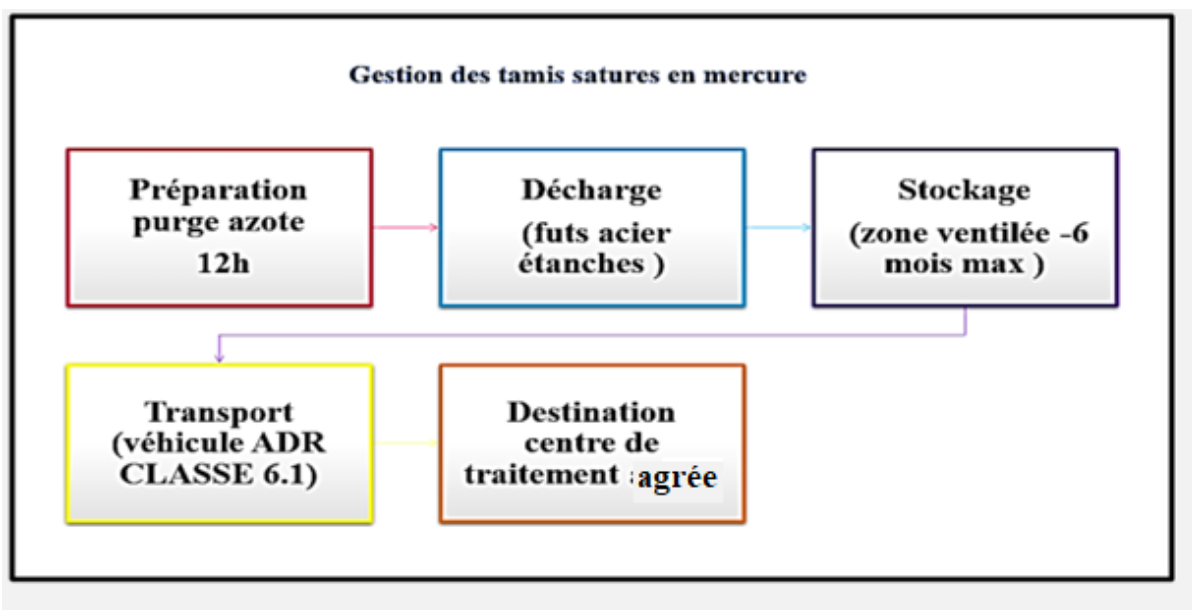


Figure III.2 : Schéma différent étapes de la gestion des tamis contaminé par le Hg

III.5 STOCKAGE ET TRANSPORT TEMPORAIRE DES DÉCHETS CONTAMINÉS AU MERCURE

Les déchets concernés par cette procédure sont des tamis moléculaires à base d'alumine imprégnée de sulfure de cuivre (CuS), saturés ou contaminés par du mercure (Hg).

III.5.1 Le stockage temporaire

Dans la filière de gestion des résidus industriels en mercure, en particulier ceux issus des procédés d'épuration du secteur pétrolier et gazier, le stockage temporaire constitue une phase critique. Cette étape intermédiaire vise à sécuriser le confinement des déchets dans l'attente de leur acheminement vers une installation d'élimination ou de valorisation homologuée, préservant ainsi la santé humaine et les écosystèmes. Une telle démarche s'aligne sur les directives de l'Organisation Mondiale de la Santé [OMS, 2005], qui préconisent une prise en charge rigoureuse des matrices contaminées au mercure afin de minimiser les risques d'exposition environnementale et sanitaire.

Cette phase de transition poursuit quatre objectifs fondamentaux :

- **Confinement physique** : Prévenir tout relargage ou fuite de mercure (sous forme liquide ou de vapeur) dans le milieu récepteur.
- **Protection sanitaire** : Prémunir le personnel opérant sur site contre l'inhalation de vapeurs toxiques.

- **Traçabilité réglementaire** : Assurer le suivi documentaire systématique de ces flux de déchets dangereux jusqu'à leur prise en charge finale.
- **Conformité légale** : Respecter les durées maximales d'entreposage autorisées par la législation en vigueur avant l'expédition vers un centre agréé.

III.5.2 Le transport

Le transport des tamis moléculaires saturés en mercure constitue une opération critique, strictement encadrée par les réglementations nationales et internationales relatives aux matières dangereuses. Cette phase logistique consiste à acheminer ces matrices solides contaminées depuis le site de production industrielle vers une installation de traitement ou de stockage final dûment habilitée.

Afin de garantir la sécurité sanitaire et environnementale durant le transit, cette opération doit être réalisée en conformité rigoureuse avec les dispositions applicables aux déchets dangereux, notamment les prescriptions techniques de l'ADR (*Accord relatif au transport international des marchandises dangereuses par route*) ainsi que les textes législatifs nationaux régissant le transport des matières hautement toxiques.

III.5.2.1 Objectifs du transport

- ✓ Optimisation temporelle : Le transfert doit s'effectuer dans les plus brefs délais consécutivement à la phase de stockage, sans interruption injustifiée du flux logistique.
- ✓ Traçabilité spatio-temporelle : Pour les flux à longue distance, l'implémentation d'un suivi par géolocalisation est préconisée afin d'assurer la traçabilité continue du chargement.
- ✓ Exclusivité de la destination : L'acheminement doit être opéré directement vers un centre de traitement habilité, proscrivant tout entreposage intermédiaire.

III.5.2.2 Nature du déchet transporté

Les matières résiduelles ciblées par cette opération de transport sont constituées de tamis moléculaires à base d'alumine. Ces matrices poreuses ont été préalablement imprégnées de sulfure de cuivre (CuS) afin de servir de lits d'adsorption pour le piégeage des polluants.

Au terme de leur cycle d'utilisation, ces adsorbants se trouvent contaminés par du mercure (Hg), principalement sous forme de mercure élémentaire ou amalgamé. En raison de la toxicité intrinsèque du mercure et de la réactivité potentielle des sulfures métalliques, ce sédiment est classé comme un déchet dangereux. Son transport requiert par conséquent une attention rigoureuse quant à la stabilisation de la matrice et au choix des conteneurs, afin de prévenir tout risque de volatilisation, de lixiviation ou de contamination environnementale durant le transfert.

III.6 MÉTHODE DE VALORISATION

Au sein de plusieurs complexes de traitement du gaz naturel, les tamis moléculaires saturés en mercure sont classés comme des déchets dangereux en raison de la toxicité systémique aiguë de ce métal lourd pour la santé humaine et les écosystèmes. Au niveau du complexe GP1/Z, la gestion conventionnelle de ces adsorbants usagés repose sur leur collecte, suivie d'un stockage temporaire sur site, avant leur acheminement vers des centres de traitement spécialisés. Parmi les filières technologiques existantes, la distillation thermique est fréquemment exploitée ; elle permet la volatilisation et la récupération du mercure par condensation, libérant ainsi la matrice solide.

Toutefois, dans le cadre des investigations menées au complexe GP1/Z durant notre stage pratique, une approche alternative de traitement *in situ* a été proposée. Cette stratégie vise à coupler la récupération du mercure à la régénération de la matrice d'alumine directement sur le site de production, s'affranchissant ainsi des coûts opérationnels et des risques environnementaux inhérents au transport de matières dangereuses. Le procédé proposé repose sur une décontamination par lixiviation sélective douce des tamis moléculaires, complétée par une étape subséquente de stabilisation et de solidification des résidus mercuriels extraits.

III.6.1 Le procédé de distillation thermique

La distillation thermique constitue l'une des technologies de référence pour le traitement des déchets contaminés par le mercure, notamment les tamis moléculaires usagés issus des unités de démercuration du gaz naturel. Ce procédé d'extraction physique repose sur la volatilité élevée du mercure métallique (Hg^0), caractérisé par une température d'ébullition standard de 356,7°C.

D'un point de vue opératoire, les tamis moléculaires saturés sont introduits au sein d'un réacteur thermique hermétique. La charge y subit un chauffage progressif, généralement maintenu dans une gamme de températures comprises entre 400°C et 650°C. L'application d'une atmosphère contrôlée ou d'un vide partiel est fréquemment préconisée afin d'abaisser la pression partielle du contaminant et d'optimiser la cinétique de transfert de masse. Sous l'effet de cet apport calorifique, le mercure piégé dans la porosité de l'adsorbant franchit la barrière énergétique de désorption et se vaporise, se séparant ainsi de la phase solide.

Les effluents gazeux riches en vapeurs de mercure sont ensuite acheminés vers une unité de condensation. Le refroidissement de ces flux permet le changement de phase du métal vers son état liquide, ouvrant la voie à des étapes ultérieures de purification et de valorisation industrielle.

Bien que ce procédé permette d'atteindre des taux de décontamination élevés (teneur résiduelle en mercure fortement réduite), il présente des limites structurelles et économiques majeures. Les contraintes thermiques sévères ($> 400^{\circ}\text{C}$) induisent fréquemment une dégradation irréversible de la structure cristalline des tamis, annihilant leur capacité de réutilisation. De plus, la nature énergivore du traitement, couplée aux risques industriels liés au confinement des vapeurs toxiques, impose des protocoles de sécurité rigoureux.

Le protocole global de ce procédé de traitement thermique est illustré par la figure III.3.

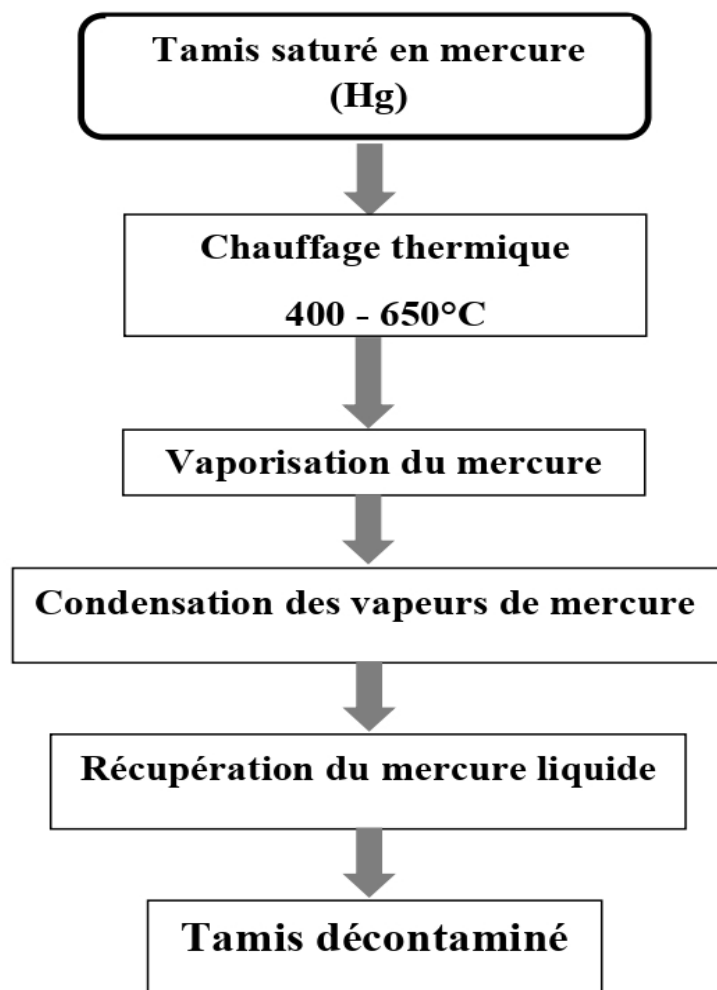


Figure III.3: Schéma du procédé de traitement des tamis saturés en mercure par distillation thermique

III.6.2 Méthode de rinçage

Le rinçage constitue une étape unitaire critique du protocole de décontamination [17], ayant pour objectif l'élimination des solutés résiduels et des agents lixivants piégés au sein de la porosité du matériau. Cette opération est réalisée exclusivement au moyen d'eau distillée ou déminéralisée, afin de s'affranchir de toute interférence ionique parasite susceptible de modifier les équilibres de solubilité ou d'induire des précipitations secondaires sur le solide.

D'un point de vue opératoire, les conditions cinétiques et thermodynamiques sont rigoureusement contrôlées :

- La température du fluide est maintenue dans une gamme comprise entre 25 et 40°C. Cet apport calorifique modéré permet d'accroître la solubilité des contaminants et de stimuler la diffusion intraparticulaire sans altérer l'intégrité structurale du support poreux.
- La durée de contact varie de 20 à 40 minutes. Afin de maximiser le gradient de concentration, le procédé est fractionné en deux ou trois cycles successifs. Le renouvellement de la phase liquide à chaque cycle permet de déplacer l'équilibre thermodynamique vers la solution et d'optimiser le taux de récupération global.

III.6.3 Description du Procédé de valorisation utilisé

L'apport majeur de ce travail réside dans le développement d'un procédé de traitement et de valorisation des tamis moléculaires saturés en mercure, visant à atténuer leur éco-toxicité, à récupérer le métal adsorbé et à régénérer la matrice adsorbante. La stratégie proposée repose sur une lixiviation sélective menée sous conditions opératoires modérées, préservant ainsi l'intégrité structurale du tamis, suivie d'une étape cruciale de stabilisation et solidification (S/S) des résidus ultimes.

Le schéma du procédé proposé se constitue en huit étapes séquentielles, est décrit sur la figure III.4 :

1. **Collecte et caractérisation** : Les tamis moléculaires saturés sont échantillonnés à la sortie des unités de démercuration. Ces solides, renfermant le mercure sous forme adsorbée en surface ou piégée au sein de la porosité intra-cristalline, constituent des déchets industriels dangereux nécessitant une gestion spécifique.
2. **Préparation mécanique et soufflage pneumatique** : Cette phase préliminaire vise à éliminer les fractions pulvérulentes, les particules libres et les impuretés exogènes susceptibles d'inhiber les réactions ultérieures. Le traitement pneumatique optimise l'homogénéité granulométrique du lit et améliore l'accessibilité des sites contaminés lors du contact solide-liquide.

3. **Lixiviation sélective ménagée** : Les tamis sont soumis à une lixiviation douce, opérée à des températures modérées (20 à 40°C) et sous un pH légèrement alcalin (8 à 10). Ces conditions thermodynamiques et cinétiques favorisent le transfert sélectif des espèces mercurielles vers la phase aqueuse, tout en limitant la désaluminisation ou la dégradation de la charpente zéolithique du tamis.
4. **Séparation solide-liquide** : Le système biphasique résultant est séparé par filtration ou décantation, permettant d'isoler, d'une part, le substrat solide partiellement décontaminé et, d'autre part, le lixiviat enrichi en ions mercuriques.
5. **Récupération et valorisation du mercure** : La phase liquide est acheminée vers une unité de récupération sélective. Deux voies d'extraction sont envisageables : l'électrodéposition (électrolyse), permettant de récupérer le mercure sous sa forme métallique (Hg^0), ou la précipitation chimique sous forme de complexes insolubles (ex. HgS). Cette étape minimise la charge polluante de l'effluent tout en valorisant le sous-produit métallique.
6. **Stabilisation et Solidification (S/S) des résidus** : (Développé en détail dans la section ci-dessous).
7. **Séchage et activation thermique** : Les tamis zéolithiques lavés subissent un séchage contrôlé à une température inférieure à 120°C jusqu'à l'obtention d'une humidité résiduelle d'environ 2 %. Ce traitement thermique permet de libérer la porosité de l'eau résiduelle sans calciner la structure.
8. **Obtention des tamis régénérés** : Le produit final présente une concentration en mercure drastiquement réduite, conforme aux seuils environnementaux. Ces matrices aluminosilicatées restaurées sont aptes à être réintroduites dans des cycles de sorption industriels ou à intégrer des filières de valorisation secondaires, s'inscrivant ainsi dans une démarche d'économie circulaire propre à l'industrie gazière.

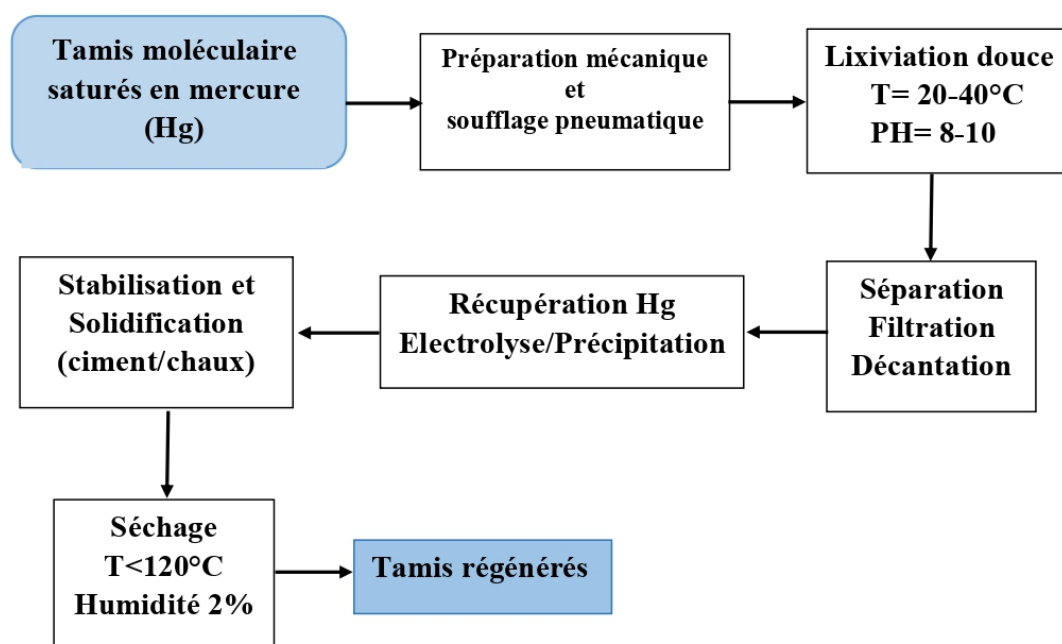


Figure III.4 : Schéma du procédé de régénération des tamis saturés en mercure.

Pour donner du poids à votre contribution, il est indispensable de détailler les mécanismes physico-chimiques de la Stabilisation/Solidification S/S.

III.7 Le Procédé de Stabilisation/Solidification (S/S)

L'étape de stabilisation et solidification (S/S) constitue le cœur de la contribution environnementale de ce procédé, garantissant le confinement ultime des traces de mercure non extraites lors de la lixiviation. L'incorporation des résidus dans une matrice liante à base de ciment Portland ordinaire (CEM I) ou de chaux vive (CaO), selon un rapport liant/déchet optimisé, met en œuvre des mécanismes synergiques de fixation physique et chimique :

- **La Stabilisation Chimique (Insolubilisation) :**

L'utilisation du CEM I ou de la chaux (CaO) génère, lors de l'hydratation, un milieu fortement alcalin dû à la libération d'hydroxyde de calcium (portlandite, Ca(OH)_2). À ce pH élevé, les traces résiduelles de mercure sont converties en espèces hautement insolubles, telles que l'oxyde de mercure (HgO) ou des hydroxydes complexes. De plus, des phénomènes de substitution isomorphe se produisent : les ions mercuriques (Hg^{2+}) peuvent remplacer chimiquement les ions Ca^{2+} au sein des réseaux cristallins des silicates de calcium hydratés (phases C-S-H) ou des aluminates en cours de formation.

- **La Solidification Physique (Encorporation macro- et micro-structurale) :**

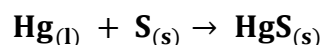
Sur le plan physique, la gélification et la cristallisation des phases C-S-H créent une matrice cimentaire à porosité réduite. Cette microstructure dense encapsule les particules de tamis moléculaires. L'enrobage physique réduit drastiquement la surface de contact spécifique entre le déchet et les agents lixivians potentiels (comme les eaux de pluie ou d'infiltration).

- **Contrôle de la Performance Environnementale :**

L'optimisation du rapport liant/résidu est fondamentale : elle permet d'atteindre un compromis idéal entre la résistance mécanique du monolithe formé (mesurée par des essais de compression) et une cinétique de relargage quasi-nulle. L'efficacité de cette barrière est validée par des tests de lixiviation normalisés (tels que la norme EN 12457 ou le protocole TCLP), garantissant que le taux de relargage du mercure reste largement inférieur aux seuils réglementaires pour l'admission dans les décharges de déchets non dangereux.

III.7.1 La réaction de stabilisation et solidification

La méthode de stabilisation la plus courante et efficace consiste à transformer le mercure métallique (Hg^0) en sulfure de mercure (HgS). Le cinabre (HgS) est l'une des formes les plus stables et insolubles dans la nature. Selon la réaction chimique suivante :



Le mercure liquide est broyé et mélangé avec du soufre en poudre. La réaction forme un composé solide sous forme de poudre noire (métacinabre).

Cette réaction peut être réalisée à température ambiante, ou par des procédés plus énergiques utilisant des températures élevées pour accélérer la réaction en phase

III.7.2 Les paramètres du procédé de stabilisation/solidification

Les conditions opératoires et les critères de performance optimales recommandées sont comme suit :

Rapport massique liant/résidu : Fixé dans un intervalle compris entre 1,5 et 3,0 afin d'assurer une encapsulation homogène du contaminant.

Cinétique de durcissement : Maintenu sur une période de 28 jours en conditions thermo-hygrométriques contrôlées (température ambiante de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$), correspondant au pic de maturité de l'hydratation de la matrice cimentaire.

Teneur en eau (humidité du mélange) : Ajustée entre 30 % et 40 % de la masse totale pour garantir l'ouvrabilité de la pâte sans compromettre la porosité finale.

Performance mécanique cible : Validée par une résistance à la compression uniaxiale supérieure ou égale à 1 MPa, seuil requis pour garantir la stabilité structurelle du matériau monolithique.

III.7. 3 Les avantages de stabilisation et Solidification (S/S)

Le procédé de stabilisation/solidification des résidus mercuriels présente un triple intérêt :

Environnemental : Il réduit drastiquement la lixivibilité du mercure par piégeage physico-chimique, abaissant son relargage sous les seuils admissibles pour un stockage en décharge de classe I (déchets dangereux).

Mécanique : L'hydratation du liant (formation de matrices de type C-S-H) confère au monolithe une haute résistance à la compression, garantissant sa stabilité géotechnique à long terme.

Réglementaire : Il assure une conformité stricte avec les exigences de la Directive 1999/31/CE et du Règlement (UE) 2017/852, qui impose la stabilisation préalable du mercure avant tout enfouissement définitif.

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- la réduction de la lixivibilité du mercure à des niveaux conformes aux normes de stockage en décharge de classe I,
- l'amélioration de la résistance mécanique du matériau solidifié,

- La compatibilité avec les réglementations environnementales en vigueur relatives à la gestion des déchets dangereux contenant du mercure (Règlement (UE) 2017/852; Directive 1999/31/CE).

III.8 CONCLUSION

L'étude pratique menée au sein du complexe GP1/Z a permis de diagnostiquer l'état du procédé de démercurisation des GPL. Le suivi des données de fin 2025 a mis en évidence une saturation critique du lit d'adsorbant, marquée par un rendement moyen d'abattement faible (~27 %) et une augmentation de la perte de charge ($\Delta P = 0,008$ MPa). Le remplacement des tamis par un adsorbant neuf (CMG 273) en 2026 a validé ce diagnostic en rétablissant une efficacité optimale supérieure à 93 %.

Face aux risques industriels et environnementaux liés à la dangerosité de ces déchets, ce chapitre a exploré deux voies de gestion :

- La méthode industrielle classique reposant sur la distillation thermique (400–650 °C), efficace pour récupérer le mercure, mais énergivore et destructive pour la structure des tamis.
- Notre contribution est un procédé innovant sur site combinant une lixiviation sélective douce (pH 8–10, 20–40 °C) et une méthode de stabilisation/solidification (S/S).

Cette approche alternative permet non seulement d'extraire et de valoriser le mercure par voie électrochimique ou par précipitation, mais aussi de stabiliser durablement les résidus sous forme de métacinabre (HgS) dans une matrice ciment/chaux. Conforme aux normes environnementales de classe I, ce procédé ouvre la voie à une régénération efficace des tamis moléculaires tout en réduisant les coûts et les risques liés au transport des déchets dangereux.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude, menée au sein du complexe GP1/Z de Sonatrach, a permis d'évaluer de manière approfondie le procédé de démercurisation des GPL et de poser des méthodes d'une gestion éco-responsable des adsorbants usés contaminés par le mercure.

Sur le plan opérationnel, le suivi des données expérimentales à la fin de l'année 2025 a mis en évidence un dysfonctionnement critique de l'unité de démercurisation, caractérisé par des rendements anormalement faibles (~27 % en moyenne) et une augmentation progressive de la perte de charge ($\Delta P = 0,008$ MPa). Ce diagnostic a révélé la colmatation et saturation avancée du lit fixe d'adsorbant. La pertinence de cette analyse a été pleinement validée en 2026 par le remplacement des tamis saturés par un adsorbant neuf de type CMG 273. Cette opération de maintenance a permis de rétablir les performances nominales de l'installation, en réinstaurant une efficacité supérieure à 93 % et en abaissant la concentration résiduelle en mercure sous le seuil réglementaire de 5 ng/Nm^3 , garantissant de fait la protection des infrastructures cryogéniques aval contre les risques de fragilisation par les métaux liquides (FML).

Sur le plan environnemental et de la gestion des déchets, la dangerosité et la toxicité sévère des tamis moléculaires usés imposent le rejet du stockage brut et l'adoption de traitements spécialisés. L'évaluation technique menée dans ce travail oppose deux voies :

- La méthode industrielle classique par distillation thermique (400 et 650 °C), bien qu'efficace pour récupérer le mercure élémentaire purifié, présente l'inconvénient d'être énergivore et destructive pour la structure poreuse du support zéolithique.
- Notre contribution propose un procédé alternatif innovant sur site, combinant une lixiviation sélective douce en conditions alcalines modérées (pH 8–10, 20–40 °C) et une méthode de stabilisation/solidification (S/S). Cette approche permet d'extraire efficacement le mercure pour le valoriser par voie électrochimique ou par précipitation, tout en piégeant durablement les résidus sous forme de métacinnabre (HgS) – une phase d'une grande stabilité thermodynamique et à très faible solubilité – au sein d'une matrice ciment/chaux.

En conclusion, ce procédé hybride répond de manière satisfaisante aux exigences de l'écotoxicité et de la législation environnementale pour les centres d'enfouissement technique. Il ouvre ainsi des perspectives prometteuses pour concilier la sécurité des installations pétrochimiques majeures et les impératifs de la transition écologique industrielle.

LES RÉFÉRENCES

- [1] Chalkidis, A., Jampaiah, D., Hartley, P. G., Sabri, Y. M., & Bhargava, S. K. (2020). Mercury in natural gas streams: A review of materials and processes for abatement and remediation *Journal of Hazardous Materials*, 390, 121036. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121036>
- [2] Wauquier, J.-P. (1995). *Le raffinage du pétrole : Pétrole brut, produits pétroliers, schémas de fabrication*. Paris : Technip.
- [3] Mokhatab, S., Poe, W. A., & Speight, J. G. (2019). *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing* (4th ed.). Gulf Professional Publishing, Elsevier.
- [4] World Health Organization (WHO). (2017). *Mercury and health*. Geneva: World Health Organization.
- [5] Wilhelm, S. M., & Bloom, N. S. (2000). *Mercury in petroleum. Fuel Processing Technology*, 63(1), 1–27. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(99\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(99)00084-5)
- [6] PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement). (2002). *Évaluation mondiale du mercure / Global Mercury Assessment*. UNEP Chemicals, Genève, Suisse, 270 p. Disponible sur : <https://wedocs.unep.org/items/c3c54e78-f11e-4bd0-835d-b8231a6c1837>
- [7] Lauwerys, R., Haufried, V., Hoet, P., & Lison, D. (2007). *Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles* (5^e éd.). Elsevier Masson, Paris, France. ISBN : 978-2-294-01418-9.
- [8] IFA (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung). (2010). *GESTIS-Stoffdatenbank — Fiches de données sur les substances dangereuses : Composés du mercure (HgS, HgO)*. DGUV — Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Sankt Augustin, Allemagne. Disponible sur : <https://gestis.dguv.de>
- [10] World Health Organization (WHO). (2023). *Mercury and health*. Geneva, Switzerland: World Health Organization
- [11] BELATRECHE Mustapha, *Méthode d'adsorption de mercure au niveau du complexe GP1/Z*, 2019
- [12] MASMOUDI, Toufik. *Incidence de la minéralisation sur l'élimination du mercure par deux procédés physico-chimiques. Application à deux effluents résiduels*. 2018. Thèse de doctorat. UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
- [13] BERNARD, Eddy. *Interaction de physisorption d'une molécule de dihydrogène avec une surface métallique*. 2016. Thèse de doctorat. Université Paris-Est.
- [14] Amin, M. CHEMRAK Mohammed. "Élimination du mercure en phase aqueuse et en phase gazeuse par un nouvel adsorbant activé."
- [15] Manuel Opérateur GP1/Z, Généralités sur le complexe.
- [16] HOUARI Hadjira, BOUGUETIFA Kawther, *Gestion et valorisation des déchets contaminés par le mercure Au niveau du complexe GP1/Z*

[17] Axens. Technical Manual – Adsorbents Handling and Activation Guidelines. Rueil-Malmaison : Axens Group. (2012).