الجمهـــوريـــــة الجزائـــريـــــة الديمقـــراطيـــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـــيـــم العـــــالـــــي والبـــحـــــث العـلمـــــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد ال صيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité Industrielle et Environnement

Thème

Simulation des gaz torchés au niveau du complexe GL2/z

(Méthode HAZOP et PHAST)

Présenté et soutenu publiquement par :

Mr CHLAOUA Sofiane & Mr AMMARI Mohammed

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
		IMSI	**Président**
Mme. HEBBAR Chafika	Professeur	IMSI	**Encadrante**
Mr. TIRES Hachemi	Ingénieur		**Co-Encadrant**
		IMSI	**Examinateur**

Remerciements

Nous remercions premièrement le Dieu tout puissant qui ne cesse de nous protéger. Merci Seigneur de nous accorder ta bénédiction à travers notre soutenance.

En guise de reconnaissance, nous tenons à témoigner nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de notre stage de fin d'étude et à l'élaboration de ce travail.

Nos sincères et profondes gratitudes à notre Prof. Mme ***Hebbar Chafika****, et* ***Dr Tires hachemi*** *pour leur bonne volonté d'accepter de nous encadrer. Merci pour cet honneur, pour tout le temps que vous nous avez accordé et pour tous les conseils prodigués, pour la qualité de leurs enseignements, leurs gentillesses, leur patience, et leurs intérêts incontestables qu'il portent à tous les étudiants.*

Nous tenons à remercier les membres du jury Dr Derias Fatema Zohra et Dr Talbi Zahera pour accepter d'examiner et de présider notre travail.

Nous remercions ***Dr Lalaoui Mohamed et Dr Guetarni Hadj Mohamed Islam*** *pour son aide précieuse, sa patience, sa gentillesse et sa bonne humeur et sa modestie*

Dans l'impossibilité de citer tous les noms, nos sincères remerciements vont à tout l'ensemble du personnel du département SIE, ceux et celles, qui de près ou de loin, qui ont permis par leurs conseils et leurs compétences la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous n'oserons pas oublier de remercier spécialement ***Mr Kazitani Wail*** *et* ***Mme Bouaaza Nour El Imen*** *pour leur aide énorme fournie pour nous, leur bon accueil des étudiants, leurs encouragements et leur bonne humeur.*

DÉDICACES

A MA TRÈS CHÈRE MÈRE : ***Benhamouda Wafia***

Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. Puisse le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie.

A MON TRÈS CHER PÈRE : ***Ammari Mostefa***

Autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes sont-elles ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. Tu as su m'inculquer le sens de la responsabilité, et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. Ta patience sans fin, ta compréhension et ton encouragement sont pour moi le soutien indispensable que tu as toujours su m'apporter. Je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester ta fierté et ne jamais te décevoir. Que Dieu le tout puissant te préserve, t'accorde santé, bonheur, quiétude de l'esprit et te protège de tout mal.

À ***mes chères grands-mères****, pour leur tendresse, leur foi et leurs bénédictions précieuses.*

À ***mon frère et ma sœur****, pour leur affection, leur complicité et leur soutien tout au long de ce parcours.*

À ***mes encadrants universitaires****,* ***Madame Hebbar Chafika*** *et* ***Monsieur Tires Hachemi****, pour leur disponibilité, leur encadrement rigoureux et leur confiance dans mes capacités.*

À ***mes encadrants au sein du complexe GL2Z****,* ***Madame Bouazza Nour El Imen*** *et* ***Monsieur Kazitani Wail****, pour leur accompagnement technique, leur professionnalisme et leurs conseils avisés qui ont enrichi ce travail.*

À ***mes amis*** *pour leur soutien moral, leur motivation et leur présence tout au long de cette aventure.*

Et enfin, à ***toute ma famille*** *pour l'amour, les valeurs et la stabilité qu'elle m'a toujours offert.*

Je vous dédie ce travail avec toute ma reconnaissance, mon respect et mon affection.

Je vous aime beaucoup.

Ammari Mohammed

DÉDICACES

A MA TRÈS CHÈRE MÈRE : **Chlaoua Amel Amina**

Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. Puisse le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie.

A MON TRÈS CHER PÈRE : **Chlaoua Lahouari**

Autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes sont-elles ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. Tu as su m'inculquer le sens de la responsabilité, et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. Ta patience sans fin, ta compréhension et ton encouragement sont pour moi le soutien indispensable que tu as toujours su m'apporter. Je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester ta fierté et ne jamais te décevoir. Que Dieu le tout puissant te préserve, t'accorde santé, bonheur, quiétude de l'esprit et te protège de tout mal.

A ma grande sœur : **Chlaoua Sarra**

Pour son appui et son encouragement permanent, son aide, son soutien moral, et son sens de l'humour qui m'apporte toujours le sourire.

***Chère famille**, merci pour votre soutien tout au long de mon parcours universitaire, Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués.*

Mes amis, **Asslaoui Mohamed et Hadjal Mohamed**,

Qu'ils aient été compagnons de tout le long de ce chemin, Merci pour votre soutien infaillible, Merci d'être toujours là pour moi

***Je vous aime beaucoup**.*

Chlaoua Soufiane

I Table des matières

Liste des figures 9
Liste des tableaux 10
Liste des abréviations 11
Introduction / Problématique 14
Chapitre 1 : Bilan de connaissances sur le complexe GL2/z et le processus de liquéfaction du gaz naturel 18
I.1 Généralités 19
I.1.1 Généralités sur Sonatrach 19
I.1.2 Réserves gazière mondiale 19
I.2 Présentation sur le complexe GL2/z 20
I.2.1 Historique et rôle du complexe GL2/z dans l'industrie gazière algérienne 20
I.2.2 Situation géographique du complexe GL2/z 21
I.3 Description du complexe GL2/z 22
I.4 Organigramme du complexe GL2/z 24
I.5 Département HSE 25
I.5.1 Généralités 25
I.5.2 Missions 25
I.5.3 Service prévention 25
I.5.4 Service environnement 26
I.5.5 Service intervention 27
I.6 Description générale du procédé 29
I.6.1 Zone utilités 29
I.6.2 Zone de Procèdes 30
I.4.1 Zone Terminal 31
I.7 Réglementations et exigences environnementales spécifiques au site GL2/z 32
I.7.1 Cadre réglementaire général 32
I.7.2 Installations classées et environnement 32
I.7.3 Torchage et émissions 32
I.7.4 Équipements sous pression et sécurité 32
I.7.5 Études HAZOP et autorisations 32
I.7.6 Normes SONATRACH et internationales 33
I.8 Organigramme de gestion environnementale – ISO 14001 au GL2/z 33
Chapitre 2 : Bilan de connaissances bibliographiques sur les gaz torchés 34
II.1 Généralités 36
II.1.1 Définition de la torche (ou torchère) 36

II.1.2 Définition du torchage 36
II.1.3 Objectifs du Torchage 36
II.1.4 Origine du torchage 37
II.2 Valorisation du torchage 37
II.2.1 Valorisation du torchage – Point de vue sécurité 37
II.2.2 Valorisation – Point de vue technique et opérationnel 37
II.2.3 Valorisation – Point de vue environnemental 37
II.2.4 Valorisation indirecte – Point de vue énergétique 38
II.3 Types de torche, basés sur les sections liées aux utilités, à la liquéfaction, au fractionnement et au stockage au niveau du complexe GL2/z 38
II.3.1 Gaz torchés – Torche chaude 38
II.3.2 Gaz torchés – Torche froide 38
II.3.3 Torche de mise en froid des méthaniers 39
II.3.4 Torche BP (boil-off LNG) 39
II.3.5 Brûlot (pour les liquides) 39
II.4 Volumes mondiaux des gaz torchés 40
II.5 Méthodes d'analyse des gaz torchés au complexe GL2/z 41
II.5.1 Analyse par chromatographie en phase gazeuse (CPG / GC) 41
II.5.2 Suivi par capteurs et instrumentation en ligne 41
II.5.3 Estimations par bilans de masse et d'énergie 41
II.5.4 Surveillance environnementale (potentiellement externe) 42
II.6 Fonction de la torche au complexe GL2/z 42
II.6.1 Sécurité des installations 42
II.6.2 Contrôle des excès et purges 42
II.6.3 Protection environnementale 43
II.6.4 Gestion de l'énergie résiduelle 43
II.7 Description du système de torche au niveau du complexe GL2/z 43
II.7.1 Système de sécurité des équipements au complexe GL2/z (Sonatrach) 43
II.8 Sources et causes des émissions de gaz torchés 44
II.8.1 Causes principales 44
II.9 Impacts du torchage 44
II.9.1 Impacts positifs du torchage 44
II.9.2 Impacts négatifs du torchage 45
Chapitre 3 : Etude HAZOP sur la solution proposée 46
III.1 Résolution du problème des gaz torchés 47
III.2 Modifications Requises et Liste des Points de Raccordement 49

III.3 Analyse de l'Impact 49
III.4 Évaluation Économique 50
III.4.1 Estimation des Coûts et Évaluation de la Valeur Ajoutée 50
III.4.2 Résultats 50
III.5 Analyse de Constructibilité 51
III.6 Conclusion 51
III.7 Étude HAZOP 51
III.7.1 Historique et domaine d'pplication 51
III.7.2 Principe 51
III.7.3 Déroulement 52
III.7.4 Limites et avantages 55
III.7.5 Analyse HAZOP de récupération des gaz torchés au niveau du complexe GL2/z 57
III.7.6 Applicabilité de la nouvelle installation 59
III.8 Conclusion 60
Chapitre 4 : Analyse de Risques par le Logiciel PHAST – Implantation d'un Nouveau Collecteur Inter-trains pour la Récupération des Gaz Torchés au démarrage d'un train 61
IV.1 Introduction 62
IV.2 Objectif de l'étude 62
IV.3 Description du scénario de base 63
IV.3.1 Conditions atmosphériques 63
IV.3.2 Données du collecteur 63
IV.3.3 Deux scénarios à haut risque modélisés 64
IV.4 Seuils de référence 64
IV.4.1 Seuils de référence pour les effets thermiques 64
IV.4.2 Seuils de références pour les effets de surpression 65
IV.5 Condition métrologique 66
IV.6 Premier test (1er emplacement) 67
IV.6.1 Étude du premier emplacement — Scénario 1 : Rupture totale du collecteur ... 67
IV.6.2 Interprétation des résultats d'explosion pour le scénario de rupture du collecteur, modélisé sous PHAST pour les deux conditions météo : 1.5/F et 5/D 68
IV.6.3 Résultats PHAST – 2eme scénario grande fuite de 100 mm 72
IV.6.4 Conclusion 77
IV.7 Deuxième test (2eme emplacement) 77
IV.7.1 Interprétation du Scénario 1 – Rupture totale du collecteur 77
IV.7.2 Deuxième scénario: grande fuite de 100 mm 80

IV.8 Conclusion 84

Liste des figures

Page

Fig. 1.1 : vu satellite de l'emplacement de Complexe GL2/z 21
Fig. 1.2 : Vu satellite des différentes zones de complexe GL2/z 23
Fig. 1.3 : Schéma descriptif de l'organisation générale de GL2/z 24
Fig. 1.4 : Organigramme de département HSE 25
Fig. 1.5 : Organisation du service prévention 26
Fig. 1.6 : organisation du service environnement 28
Fig. 1.7 : organisation du département HSE 29
Fig. 1.8 :photo prise de la zone d'utilité 30
Fig. 1.9 : photo pise du bassin d'eau de mer 32
Fig. 1.10 : schéma générale de procédé de complexe GL2/z 34
Fig. 1.11 : schéma générale de gestion environnementale de complexe GL2/z 36
Fig. 2.1 : torche chaude (Ammari , Chlaoua) 42
Fig. 2.2 :Graphiques du volume de torchage de gaz et de la production de pétrole 49
Fig. 2.3 : shémat du nouvelle installation 59
Fig. 3.1 : categories des risques 69
Fig. 3.2 : matrice des risques 72
Fig. 4.1 : Localisation proposée du collecteur sur le site GL2/z – Vue cartographique (1er emplacement) 74
Fig. 4.2 : Distances maximales d'impact en cas de rupture totale de collecteur (1er emplacement) 76
Fig. 4.3 : Distances maximales d'impact en cas de boule de feu (1er emplacement) 77
Fig. 4.4 : Distances maximales d'impact en cas de jet enflammée (1er emplacement) 79
Fig. 4.5 : Distances maximales d'impact en cas de jet enflammée pour direction inverse (1er emplacement) 82
Fig. 4.6 : Distances maximales pour dispersion du gaz en cas d'une grande fuite 100mm (1er emplacement) 83
Fig. 4.7 : Distances maximales en cas de boule de feu (2ème emplacement) 85
Fig. 4.8 : Pression d'explosion en fonction de distance (2ème emplacement) 86
Fig. 4.9 : les distances maximales en cas de jet enflammée (jet fire) (2ème emplacement) 87
Fig. 5.10 :les distances maximales en cas de jet enflammée (jet fire) (2ème emplacement) .....
Fig. 4.11 :les distances maximales en cas de surpression (2ème emplacement)(north-est) 83
Fig. 4.12 : les distances maximales en cas de surpression (2ème emplacement) (sud-west) 83

Liste des tableaux

Page

Tab. 2.1 : les causes principales des émissions de gaz torchés 44
Tab. 3.1 : les composants du GN récupérable au sein du complexe GN2..... 48
Tab. 3.2 : les caractéristique physico-chimique du GN..... 48
Tab. 3.3 : les points de raccordement 49
Tab. 3.4 : Exemple de tableau pour l'HAZOP 54
Tab. 3.5 : Exemples de mots-clé pour l'HAZOP (norme CEI : 61882) 54
Tab. 3.6 : catégories de risque 57
Tab. 3.7 : Analyse détaillée des déviations du collecteur de gaz torchés (HAZOP) 58
Tab. 4.1 : Parametres du collecteur 63
Tab. 4.2 : Seuils pour les effets sur l'homme 65
Tab. 4.3 : Seuils pour les effets dominos..... 65
Tab. 4.4 : Seuils pour les effets sur l'homme 65
Tab. 4.5 : Seuils pour les effets dominos..... 66
Tab. 4.6 : effets consécutifs à différents scénarios accidentels (1er emplacement) 68
Tab. 4.7 : les effets d'explosion par logiciel phast (1er emplacement)..... 68
Tab. 4.8 : Résultat PHAST – fireball (Boule de feu) (1er emplacement) 71
Tab. 4.9 : Résultat PHAST- Flash Fire (Inflammation différée d'un nuage dispersé) (1er emplacement) 72
Tab. 4.10 : Résultat PHAST- Jet Fire (jet enflamée) (1er emplacement)..... 74
Tab. 4.11 : Résultat PHAST - en cas surpression (1er emplacement)..... 76
Tab. 4.12 : Résultat PHAST - en cas de boule de feu (2ème emplacement)..... 78
Tab. 4.13 : Résultat PHAST - en cas d'inflammation du nuage dispersé (flash fire) (2ème emplacement) 80
Tab. 4.14 : Résultat PHAST - en cas de grande fuite (2ème emplacement)..... 80
Tab. 4.15: Résultat PHAST - en cas de jet enflammée (jet fire) (2ème emplacement)..... 81

Liste des abréviations

- GNL : Gaz Naturel Liquéfié
- GNT : Gaz Naturel Traité
- GNC : Gaz naturel comprimé
- GN : Gaz Naturel
- HAZID : Identification Des Dangers (HAZard Identification)
- HAZOP : Étude des dangers et de l'opérabilité (Hazard And Operability Study)
- AMDEC : Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité
- APD : Analyse préliminaire des dangers
- APR : Analyse préliminaire des risques
- ATEX : Atmosphère explosive
- DCS (SNCC) : Système numérique de contrôle-commande (Distributed control system)
- DEKRA : Association allemande D'inspection des véhicules à moteur (Deutscher Kraftfahrzeug-Überwachungs-Verein)
- DNV : Droit Nord Veritas
- DRH : Direction des ressources humaines
- GIS : Système d'information géographique (Geographic information system)
- HSE : Hygiène, Sécurité, Environnement
- LII : Limite inférieur d'inflammabilité
- LSI : Limite supérieur d'inflammabilité
- MEA : MonoEthanolAmine
- MCR : Multi composant réfrigérant
- PGE : Plan de gestion environnementale
- PHAST : Outil logiciel d'analyse de risques de procédé (Process Hazard Analysis Software Tool)
- SEL : Seuil des effets létaux
- SELS : Seuil des effets létaux significatifs
- SER : Seuil des effets réversibles
- UVCE : Explosion de vapeur en milieux non confiné (Unconfined vapour cloud explosion)
- HELIOS : Société de récupération et traitement de l'hélium
- ARH : Autorité de Régulation des Hydrocarbures
- DPEM : Direction de la Production et de l'Exploitation Minière
- CO_2 : Dioxyde de carbone
- CO : Monoxyde de carbone
- NOx : Oxyde(s) d'azote
- C1 : Méthane CH_4 (Gaz) Principal composant du gaz naturel
- C2 : Éthane C_2H_6 (Gaz) Matière première pour la pétrochimie
- C3 : Propane C_3H_8 (Gaz) Gaz de pétrole liquéfié (GPL), usage domestique
- C4 : Butane C_4H_{10} (Gaz liquéfié) Mélangé au propane dans les bouteilles GPL
- C5 : Pentane C_5H_{12} (Liquide) Présent dans la gazoline / essence
- C6 : Hexane et dérivés C_6H_{14} (Liquide) Solvants base pour carburants légers

- IEC: Commission électrotechnique internationale

•Sonatrach : Société nationale pour la recherche, la production, le transport, la transformation, et la commercialisation des hydrocarbures.

• TEE : TECHNOEDIF ENGENHARIA
• Dép. T : Département Technique
• Dép. F : Département Finance et juridique
• Dép. W : Département Travaux neufs
• Dép. ADM : Département Administration et Social
• Dép. A : Département approvisionnement
• Service RT : relations de travail
• Dép. G : Département maintenance
• Dép. R : Département développement des ressources humaines
• Dép. P : Département production
• Dép. M : Département moyens généraux

Résumé : La récupération des gaz torchés est une approche gagnant-gagnant qui permet de transformer un problème environnemental et un gaspillage de ressources en une opportunité de rentabilité et de développement durable. L'objectif de notre travail vise à proposer deux solutions techniques pour réduire le torchage des gaz lors du démarrage des trains de liquéfaction au complexe GL2/z : La 1ère solution consiste à recycler les produits liquides non traités d'un train dans la section de fractionnement en les redirigeant vers un autre train en fonctionnement, par la méthode HAZOP; ceci nous a permis de récupérer 66000 cm³ de méthane, 220 tonnes d'éthane, 361 tonnes de propane, 219 tonnes de butane, et 776 tonnes de gazoline. Ce qui représente une réduction estimée du torchage de 550000 cm³/an. La 2ème solution consiste à implanter un collecteur commun entre les bacs de stockage et les trains de liquéfaction, qui relie les pipelines de sortie des trains au démarrage vers le début d'un autre train en service, permettant ainsi une séparation plus efficace du GNL. Cette solution nous a permis de récupérer les gaz torchés à la source et de réduire les émissions en phase transitoire, tout en maintenant la sécurité des unités grâce à une régulation de pression dans le collecteur. L'étude des risques réalisée par le PHAST (v. 8.71) montre que ce système présente un meilleur compromis de sécurité, notamment si nous adoptons un emplacement optimisé éloigné des trains mais correctement protégé. En conclusion, ces deux solutions sont techniquement réalisables et présentent un intérêt stratégique pour Sonatrach en termes d'efficacité énergétique, de rentabilité et de conformité environnementale à long terme.
Mots clés : GNL, Collecteur, Gaz torchés, HAZOP, PHAST, Simulation de dispersion, Système de récupération.

ملخص

خلال مراحل تشغيل قطارات تمييع الغاز. GL2/z يهدف هذا العمل إلى دراسة تقنيتين لتقليل حرق الغازات في مركب تعتمد الحل الأول على إعادة توجيه المنتجات السائلة غير المفصولة من قطار معطّل نحو قطار آخر يعمل، وذلك وفقًا لدراسة HAZOP، مما مكّن من تقليل الحرق بما يعادل 550,000 سم³ سنويًا.

أما الحل الثاني فيقترح إنشاء مجمّع مشترك لاسترجاع الغازات المحروقة عند الانطلاق وتحويلها نحو قطار آخر، مع ضمان سلامة التشغيل عبر تنظيم الضغط. وقد أظهرت دراسة PHAST أن هذا الحل يوفر مستوى أمان مقبولًا إذا ما تم اختيار موقع مناسب.

كلا الحلّين قابلان للتطبيق ويوفّران فرصًا حقيقية لتحسين الأداء البيئي والاقتصادي للمركب.

Abstract: This study proposes two technical solutions to reduce gas flaring during the startup of liquefaction trains at the GL2/z complex. The first solution involves redirecting untreated liquid products from an inactive train to another active one, based on HAZOP analysis, allowing the recovery of key hydrocarbons and reducing flaring by 550,000 cm³/year. The second solution consists of installing a common collector to reroute flare gases from startup trains to operating ones, enhancing LNG separation. PHAST simulations confirm the safety of this setup, especially with optimized collector placement. Both solutions are technically viable and align with Sonatrach's goals for energy efficiency and environmental sustainability.
Keywords:
LNG, Flared Gas, Collector, HAZOP, PHAST, Recovery, Simulation.

Introduction générale

Introduction générale

Le gaz naturel liquéfié (GNL) est le pilier essentiel de la sécurité énergétique mondiale, un outil de transition vers un avenir moins carboné, et un facteur clé dans la diversification des sources d'énergie. Son rôle est appelé à s'intensifier au fur et à mesure que les pays cherchent à concilier leurs besoins énergétiques croissants avec leurs engagements environnementaux.

En effet, l'Algérie dispose de réserves importantes de plus 3000 milliards de mètres cubes de gaz naturel, ce qui lui a attribué une place importante dans le marché mondial du gaz naturel. L'un des principaux atouts du GNL, est sa capacité à être transporté par voie maritime sur de très longues distances. Les complexes de liquéfaction ont été conçus pour permettre d'assurer le transport du gaz sous sa forme liquide. Le but de liquéfaction du gaz naturel est de réduire son volume de 600 fois pour faciliter son transport.

Le torchage mondial du gaz a augmenté de 9 milliards de m^3 en 2023, atteignant 148 m^3, son niveau le plus élevé depuis 2019. Les neuf principaux pays torcheurs restent les principaux contributeurs aux volumes mondiaux de torchage. Les gaz torchés représentent une quantité significative de gaz naturel, brûlée à l'air libre, généralement dans les installations pétrolières et gazières (champs de production, raffineries, usines de traitement), pour des raisons de sécurité, d'exploitation ou d'économie. Cette pratique, bien que parfois inévitable pour la sécurité des opérations, est critiquée en raison de son impact environnemental majeur (CO_2, CH_4, Nox, …) et du gaspillage d'une ressource énergétique précieuse qui peut être récupérable.

La récupération des gaz torchés est une approche gagnant-gagnant qui permet de transformer un problème environnemental et un gaspillage de ressources en une opportunité de développement durable et de rentabilité. C'est aussi un processus qui consiste à capturer et à valoriser les gaz qui seraient brûlés dans les torches. Au lieu d'être simplement rejetés, propagés dans l'atmosphère et détruits, ces gaz peuvent être collectés, comprimés, et réintroduits dans le système de production pour être de nouveau utilisés. Face à la prise de conscience environnementale croissante et aux réglementations de plus en plus strictes sur le torchage en Algérie, la récupération des gaz torchés devient non seulement une opportunité économique mais aussi une nécessité pour la responsabilité sociale et environnementale des différentes entreprises. Le décret exécutif n° 21-330 du 25 août 2021 fixe les conditions d'octroi de l'autorisation exceptionnelle de torchage de gaz, avec des seuils admissibles très stricts. A cela s'ajoute une taxe de torchage dans le but d'inciter financièrement les opérateurs à investir dans des solutions de récupération et de valorisation (JORADP, 2021).

Sonatrach, acteur majeur, est au cœur de la démarche de réduction du torchage. Elle a réitéré son engagement à atteindre le "zéro torchage de routine" à l'horizon 2030. Elle a investi dans la mise en service de nouvelles unités de récupération des gaz torchés dans plusieurs régions de production, notamment Hassi Messaoud, Ohanet, ... Le Global Gas Flaring Tracker Report 2024 de la Banque Mondiale a souligné que l'Algérie avait réalisé la plus importante réduction de torchage en 2023, avec une diminution de 0,4 milliard m^3 (soit 5%). Ces projets ont déjà permis de récupérer des millions de mètres cubes de gaz, avec une réduction des gaz torchés de 28% en 2023 par rapport à 2020.

Notre pays dispose de plusieurs complexes de liquéfaction majeurs, notamment à Arzew (GL1/z, GL2/z) et Skikda (GL1/K), qui ont contribué à maintenir son rôle d'acteur clé sur le marché du GNL pendant des décennies.

Le présent travail est relatif à l'étude de récupération des gaz torchés au niveau du complexe GL2/z où nous avons effectué notre stage. Une analyse de risques au niveau du nouveau collecteur de récupération des gaz torchés du complexe GL2/z par la méthode HAZOP a été réalisée, afin de renforcer les moyens de prévention et de protection existants et proposer ou suggérer des barrières de sécurité supplémentaires en tenant compte du respect et l'application de la réglementation algérienne en vigueur dans un seul objectif de protection des travailleurs, la sécurisation des installations et la préservation de l'environnement.

Notre travail qui débute par une introduction générale, est structuré en quatre chapitres. Le chapitre 1 dresse un bilan de connaissances bibliographiques sur le complexe GL2/z (zone de notre stage) et sur le procédé de liquéfaction du gaz naturel. Le chapitre 2 est relatif à un bilan de connaissances bibliographiques sur les gaz torchés. Dans le chapitre 3, nous avons suivi une méthode de récupération de gaz torchés et faire une analyse des risques par HAZOP. Le chapitre 4 est relatif à l'implantation d'un nouveau Collecteur inter-trains pour la récupération des gaz torchés (Analyse de risques par le PHAST). Le mémoire est achevé par une conclusion et quelques recommandations.

Problématique

La ratification par l'Algérie de l'Amendement de Doha au Protocole de Kyoto le 28 septembre 2015 témoigne de son engagement envers la réduction des émissions de gaz à effet de serre, dans le but de soutenir les efforts mondiaux de lutte contre les changements climatiques.

En adhérant à cet amendement, l'Algérie se joint aux initiatives internationales visant à accélérer la transition vers une économie à faible émission de carbone et à limiter le réchauffement climatique à des niveaux acceptables.

Dans notre étude de récupération des gaz torchés au niveau du complexe GL2/z, nous avons donné une importance capitale aux risques liés à l'implantation de solution fiable et sure afin de préserver l'environnement et garantir une exploitation optimale de gaz naturel.

Cela implique la mise en place de mesures de protection des travailleurs, de l'environnement et la sécurisation des installations inspirer de l'étude de risque HAZOP. En accordant une attention particulière à l'aspect environnementale,

Chapitre 1

Bilan de connaissances sur le complexe GL2/z et le processus de liquéfaction du gaz naturel

I.1 Généralités

I.1.1 Généralités sur SONATRACH

La Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport par Canalisation et la Commercialisation des Hydrocarbures, plus connue sous le nom de Sonatrach, est une entreprise publique algérienne considérée comme l'un des acteurs majeurs du secteur énergétique à l'échelle mondiale.

Entièrement détenue par l'État algérien, Sonatrach joue un rôle stratégique dans l'économie nationale. Elle a pour principales missions :

- **Participer activement au développement économique de l'Algérie** à travers la valorisation de ses ressources naturelles.
- **Optimiser la gestion et l'exploitation des ressources en hydrocarbures** pour en maximiser la valeur sur le long terme.
- **Assurer la couverture des besoins énergétiques du pays**, aussi bien pour les générations actuelles que futures, en garantissant la disponibilité des hydrocarbures et des produits dérivés.

I.1.2 Réserves gazière mondiale

Le gaz naturel est une source d'énergie majeure, représentant un quart de la consommation mondiale. Les réserves prouvées atteignent environ 200 000 milliards de m^3, principalement en Russie, Iran, Qatar et États-Unis. L'Algérie est un acteur clé en Afrique. Utilisé pour l'électricité, le chauffage et l'industrie, le gaz est aussi important pour la transition énergétique grâce à ses émissions de CO_2 réduites. Il est donc essentiel à la fois sur les plans économique et environnemental. La **demande mondiale en gaz naturel (GN)** atteint environ 4 000 milliards de m^3 par an, tirée principalement par l'Asie, l'Europe et l'Amérique du Nord. Ce carburant est de plus en plus recherché comme source d'énergie de transition, car il émet moins de CO_2 que le charbon ou le pétrole. Le gaz naturel se distingue par ses **caractéristiques physiques** : incolore, inodore (l'odeur est ajoutée artificiellement pour détecter les fuites), plus léger que l'air, et très inflammable. Sur le plan chimique, il est composé principalement de **méthane (CH_4)**, mais contient aussi de petites quantités d'éthane (C_2H_6), propane (C_3H_8), butane (C_4H_{10}), dioxyde de carbone (CO_2), azote (N_2), et parfois de l'hydrogène sulfuré (H_2S). Il existe plusieurs **types de gaz naturel**, selon leur origine ou leur état :

- Le **gaz naturel sec** (riche en méthane, peu d'autres hydrocarbures)

- Le **gaz naturel humide** (contient des hydrocarbures plus lourds comme le propane et le butane)
- Le **GNL (gaz naturel liquéfié)**, obtenu par refroidissement à -162°C pour faciliter le transport
- Le **GNC (gaz naturel comprimé)**, utilisé principalement comme carburant pour les véhicules.
- Ainsi, le GN est une ressource énergétique stratégique, à la fois pour répondre aux besoins mondiaux croissants et pour accompagner la transition vers des sources d'énergie plus durables.[1]

I.2 Présentation sur le complexe GL2/z

I.2.1 Historique et rôle du complexe GL2/z dans l'industrie gazière algérienne

La mission dévolue à Sonatrach lors de sa création le 31 Décembre 1963, étant le transport et la commercialisation des hydrocarbures Algérien.

Cette mission s'élargit à la mise en œuvre de toutes les formes possibles que pouvait prendre la valorisation de cette richesse et c'est dans le cadre de cette politique que le 09 Octobre 1969 un contrat a été signé entre Sonatrach et la société Américaine El Paso Natural Gaz Company portant sur la livraison de dix milliards de mètres cube de gaz naturel liquéfié par année pendant une durée de vingt-cinq ans.

Pour répondre à ce contrat, une usine appelée (Project GL2/z) a été créée par décision numéro A.0016 du Avril 1971 et dénommée le complexe GL2/z .

Sa construction fut confiée par SONATRACH à la société Américaine CHEMICO suite à la signature du contrat les liant en date du 09février1976. La date de démarrage des travaux eu lieu le 15mars 1977.

À partir du 20janvier 1981 l'entrée en exploitation du complexe ayant débuté le 29 janvier1981 ainsi que la satisfaction du contrat EL PASO dès l'année 1983.

Compte tenu de la demande internationale en matière de besoin de gaz naturel liquéfié, Sonatrach a décidé de rénover ces installations pour :

• Rétablir et augmenter la capacité d'installée à 110,7 %.

• Fiabiliser les installations.

• Actualiser la technologie.

La production du complexe de liquéfaction est au-dessous de la capacité initialement installée ceci est due à plusieurs facteurs dont :

• Vieillissement des équipements.

• Technologie des années 1970.

La phase de rénovation est lancée par la signature du contrat entre la SONATRACH et la société Américaine BECHTEL en date 04 Février 1991. Les travaux ont été entrepris par la même société en septembre 1993, et sont supervisés par une direction de projet attachée à la division étude et développement de la branche.

Le complexe GL2/z est l'un des complexes de liquéfaction de gaz naturel dans la zone industrielle d'Arzew (ORAN), son rôle principal est de liquéfier le GN pour en réduire 600 fois le volume initial afin de permettre son chargement à bord de méthaniers pour son transport jusqu'aux pays consommateurs.

Le complexe GL2/z a pour objet :

1- Liquéfaction du gaz naturel ;
2- D'extraction du propane, du butane et de la gazoline (C5+)
3- Gaz de charge pour l'unité d'Hélios (production de l'Hélium) .[2]

I.2.2 Situation géographique du complexe GL2/z

Le complexe GL2/z est situé à Béthioua (40 km à l'EST d'ORAN, 450 km d'Alger). Il s'étend sur une superficie de 72 Hectares, il est limité au nord par la mer, au sud par le village de Béthioua, à l'ouest par GL1/z , et à l'Est par l'usine de dessalement Kahrama,son emplacement au bord de la mer lui permet d'utiliser cette ressource inépuisable pour produire de l'eau distillée, le refroidissement des équipements, et à la lutte contre le feu.[3]

Fig. 1.1 :vu satellite de l'emplacement de Complexe GL2/z [3]

I.3 Description du complexe GL2/z

Le complexe GL2/z est divisé en 04 grandes zones :

- **Au Nord Est :** la zone stockage et de chargement de GNL
- **A l'Ouest :** la zone production et utilités
- **A l'Est, en partie médiane :** zone occupée par les torches, le parc déchets et stockage produits chimiques et les installations annexes (École à feu, DRH, MAGASINS APPRO…)
- **Au Sud :** les bâtiments des services administratifs et techniques et les locaux sociaux, ainsi que le bâtiment de la société **HELIOS.**

Le complexe de liquéfaction de gaz naturel GL2/z (fig. 1.2) comprend **six trains** de liquéfaction indépendants fonctionnant en parallèles, le gaz naturel est distribué à chacun des trains par un réseau de canalisation. Dans chaque train le gaz naturel est d'abord traité pour **éliminer le gaz carbonique** et **la vapeur d'eau**, en effet ces deux composants outre qu'ils n'ont pas d'intérêt pour le gaz naturel en tante que combustible, se présent à l'état solide à la température de liquéfaction du gaz et risqueraient donc d'obstruer les conduites du complexe. Après ce traitement le gaz naturel subit d'abord un **pré-refroidissement** dans les échangeurs de propane qui abaissent la température à -30,6 C°. Il pénètre ensuite dans une section de séparation ou sont extraits les hydrocarbures lourds condensée qui vont vers la section de fractionnement. Le gaz subit un premier refroidissement dans le faisceau chaud de la colonne de liquéfaction et revient une deuxième fois vers la section de séparation, puis il retourne enfin vers l'échangeur principal pour y être liquéfie. A la sortie du l'échangeur, sa température est de -142C° et sa

pression de 24 bars effectifs. Le GNL obtenue est alors détendu et débarrassé de son azote dans un **déazoteur** pour acquérir ses spécifications définitives et être acheminé vers le stockage par des pompes GNL. La section de fractionnement qui reçoit les hydrocarbures lourds de la section séparation, extrait l'éthane, le propane, le butane et de la gazoline. Il existe deux types de fonctionnement de l'unité correspondant à deux types de destination de ces produits :

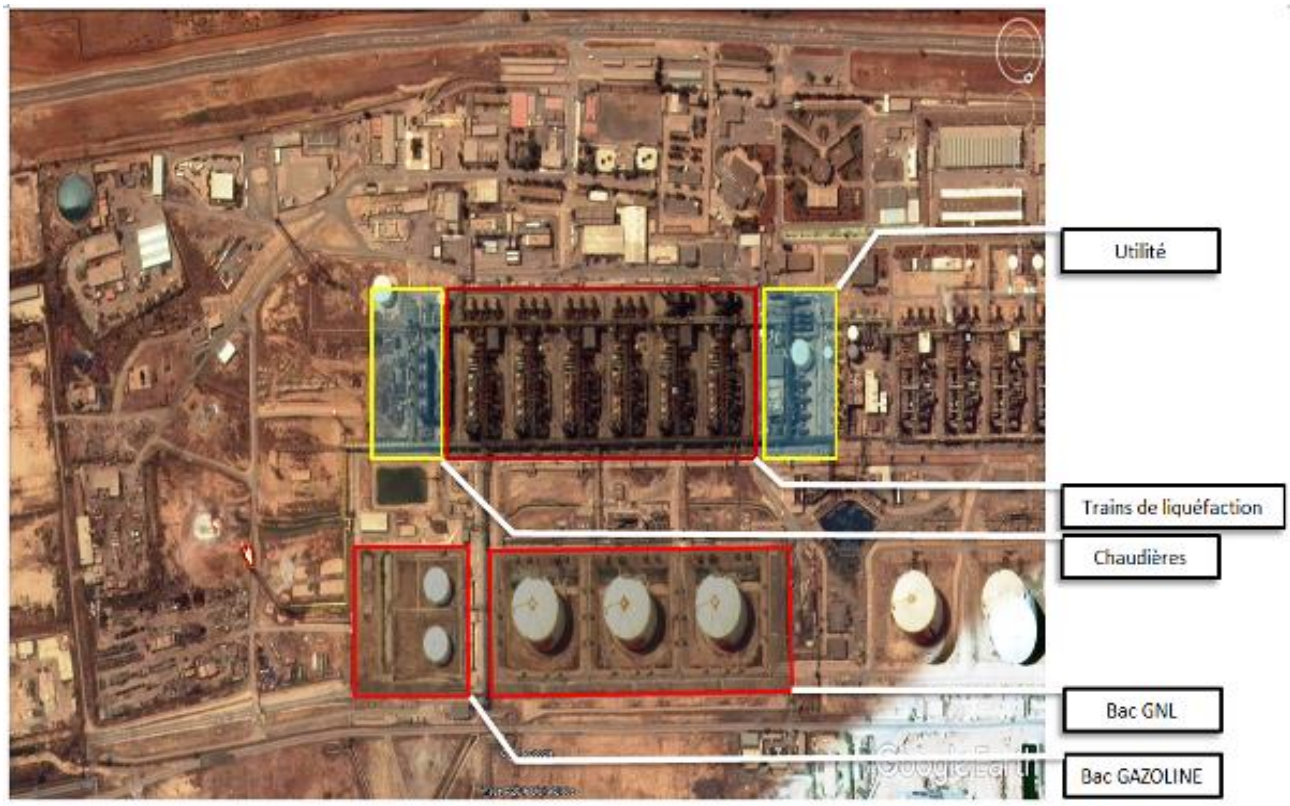


Fig. 1.2 : *Vu satellite des différentes zones de complexe GL2/z [3]*

- **Cas avec extraction :** Le butane, le propane et la gazoline produit sont envoyées vers un stockage indépendant ;
- **Cas sans extraction :** La gazoline seul est stockée, le butane et le propane sont réinjectés dans le GNL ou utilisés comme combustible.

Dans les deux cas, l'éthane est réinjecté dans le GNL tout en servant d'appoint au **MCR** avec le propane.

Les installations de stockage de GNL comprennent essentiellement 03 réservoirs cryogéniques calorifugées pouvant contenir chacun 100 000M3 de GNL, et une station de chargement constitué par 05 pompes destinées au chargement de méthaniers, et 03 pompes de circulation et de transfert. Les installations disposent en outre de systèmes de récupération des gaz d'évaporation.

Le complexe est doté d'un certain nombre d'équipements auxiliaires destinés à fournir les fluides nécessaires à son fonctionnement se sont essentiellement :

- Les chaudières de production de vapeur
- Les générateurs électriques
- Les systèmes de refroidissement par eau de mer
- Le système de production d'air comprimé
- L'unité de production d'azote [2].

I.4 Organigramme du complexe GL2/z

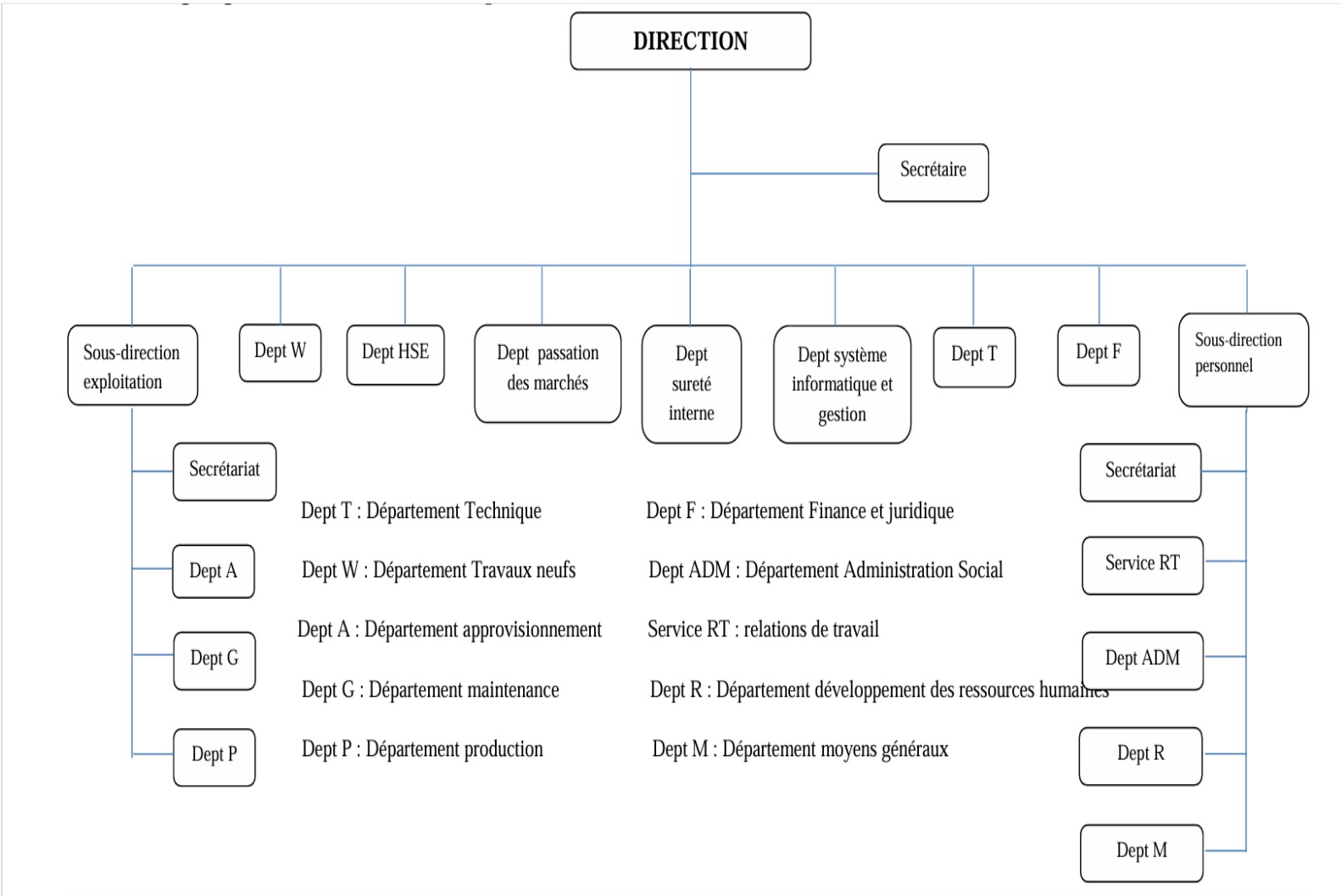


Fig. 1.3 : Organigramme de département HSE [2]

I.4.1 Département HSE :

Le département sécurité est (fig. 1.4) constitué de trois services :

- Service prévention;
- Service Intervention ;
- Service environnement.

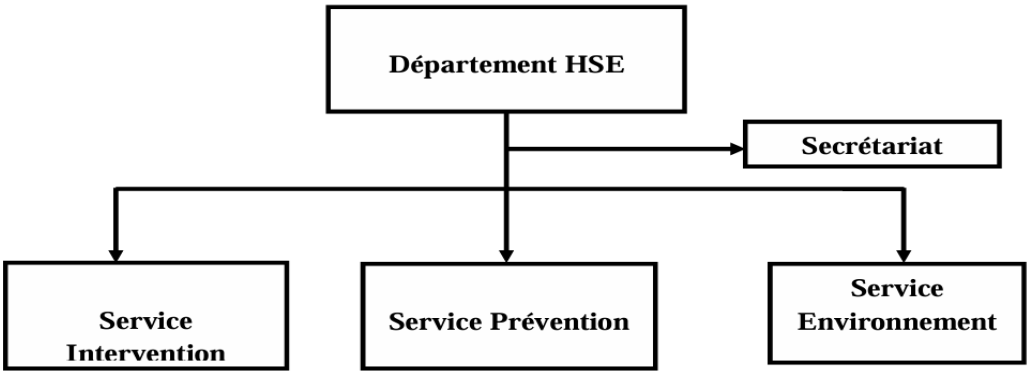


***Fig. 1.4** : Organigramme de département HSE.*

I.4.3 Missions:

- Prévenir les incidents et les accidents.
- Intervenir en cas d'accident.
- L'application des règles de sécurité pour éviter tout facteur de risque.
- Le contrôle des installations et la détermination des recommandations nécessaires.
- Le suivi des projets de développement en collaboration avec le service technique afin de respecter les normes de sécurité.
- Assumer toute opération d'intervention en cas d'accident.
- L'organisation des mouvements de véhicules et de personnel à l'intérieur du complexe.

I.4.4 Service prévention

Le service prévention est composé de :

- Chef de service prévention
- Section contrôle et inspection
- Section animation
- Ingénieur(s) sécurité

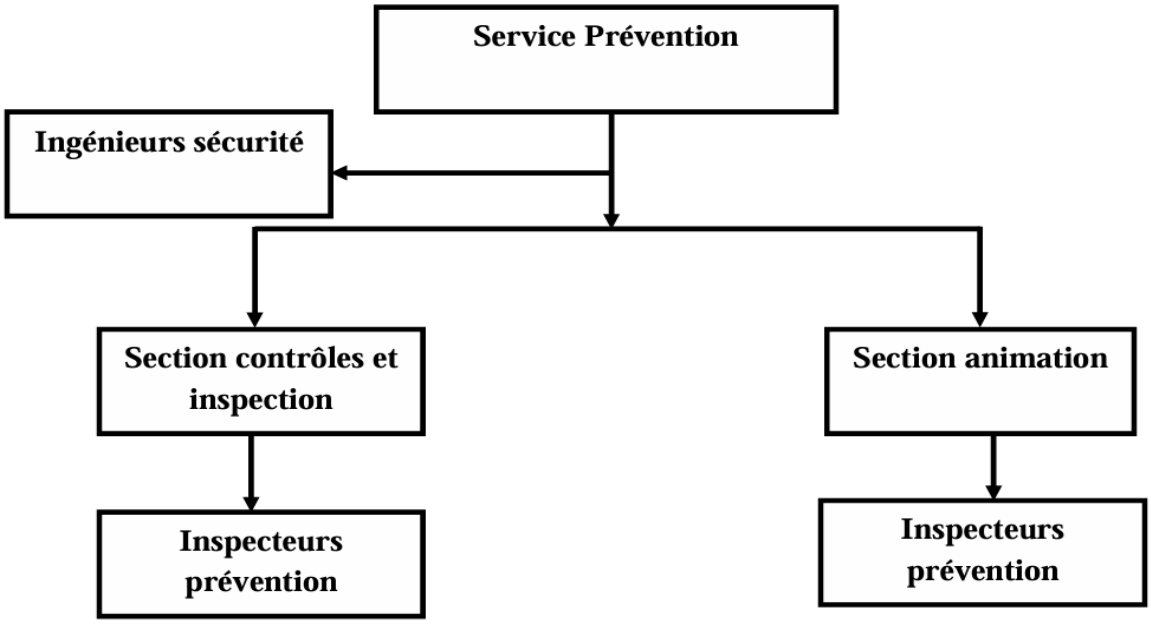


Fig. 1.4 : *Organisation du service prévention [2]*

I.4.4.1 Missions :

Les missions du service Prévention sont les suivantes :

- Veiller au respect de la réglementation, normes, référentiels, procédures consignes de sécurité
- Mettre en œuvre la politique de l'entreprise en matière HSE
- Veiller au suivi des travaux pour assurer la sécurité de l'unité
- Élaborer et déclencher les programmes de sensibilisation et de formation du personnel à la prévention des risques
- Participer aux études de sécurité sur toutes modifications ou nouvelles installations
- Déclencher les investigations sur tout accident et/ou incident
- Analyser les statistiques des accidents et incidents pour engager les actions préventives et correctives afin d'améliorer la sécurité

I.4.5 Service environnement

Le service d'environnement (fig. 1.6) est doté de plusieurs missions :

I.4.5.1 Missions :

- Planifier et lancer toutes les actions d'analyse des différents milieux et rejets ;
- Mettre en place des outils d'évaluation de la performance environnementale ;

- Élaborer les procédures et consignes en matière d'environnement et veiller à leurs diffusions ;
- Participer aux études de sécurité sur toutes modifications ou nouvelles installations
- Veiller à l'application de la réglementation et au respect des procédures et normes Environnementales ;
- Veiller à la réalisation d'investigation sur tout accident/incident environnemental ;
- Représenter l'unité en tant que « Délégué Environnement », auprès des organismes externes ;
- Organiser des campagnes de sensibilisation pour la protection de l'environnement ;
- Assurer la veille règlementaire, normative et technologique en matière d'environnement ;
- Participer à l'élaboration du volet environnement des plans d'intervention ;
- Participer aux projets et études dans le domaine de l'environnement ;
- Veiller à la mise en œuvre du plan de gestion environnementale (PGE) ;
- Veiller à l'évaluation des impacts environnementaux et analyser leurs causes ;
- Veiller au traitement des aspects liés à l'environnement dans les cahiers des charges des autres des autres structures ;
- Veiller à la gestion de l'aspect HSE des produits chimiques ;
- Promouvoir la culture environnement sur les lieux de travail ;
- Veiller à la réalisation des inspections et des audits environnementaux ;
- Contribuer dans le système permis de travail en qualité de signataire ;
- Veiller à l'élaboration, dans les délais impartis, les rapports périodiques, d'activités du service ;

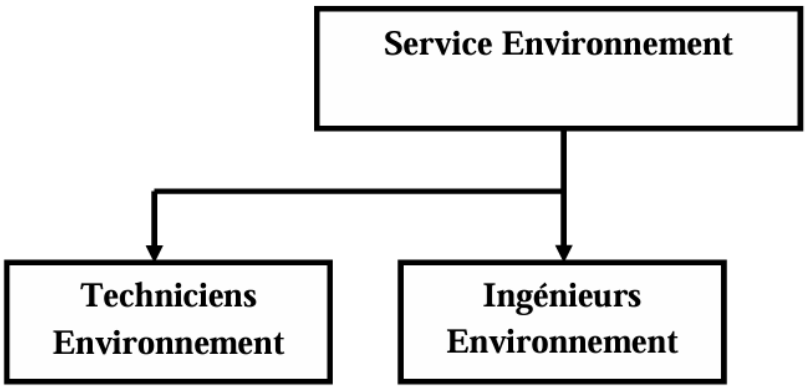


Fig. 1.6 : Organisation du service environnement.

I.4.6 Service intervention

Le service intervention (fig. 1.7) est constitué de deux sections à savoir: Section intervention et Section équipement.

I.4.6.1 Missions de la section intervention

La section intervention est chargée de :

- Intervenir en cas d'accident/ incident.
- Évacuer des victimes.
- Faire des rondes d'inspections des installations de production.
- Participer à la formation au feu.
- Contrôler et entretenir les équipements et matériels de sécurité.
- Surveiller les installations de production par le biais des caméras téléguidées ; ainsi que les équipements de lutte contre l'incendie à partir de deux consoles DCS.

I.4.6.2 Missions de la section équipement

La section équipement est chargée de :

- Inspecter en permanence les équipements fixes et mobiles de sécurité.
- Entretenir les équipements mobiles (extincteurs) ainsi que ceux d'Hélios et COGIZ.
- Assurer la maintenance des équipements fixes en collaboration avec le département G.
- Assurer l'installation des équipements fixes nouveaux avec le département W.
- Gérer les produits extincteurs (poudre, émulseurs, CO2).
- Assurer la disponibilité de tous les véhicules avec les départements G & M
- Effectuer les différents tests des équipements avec le département.

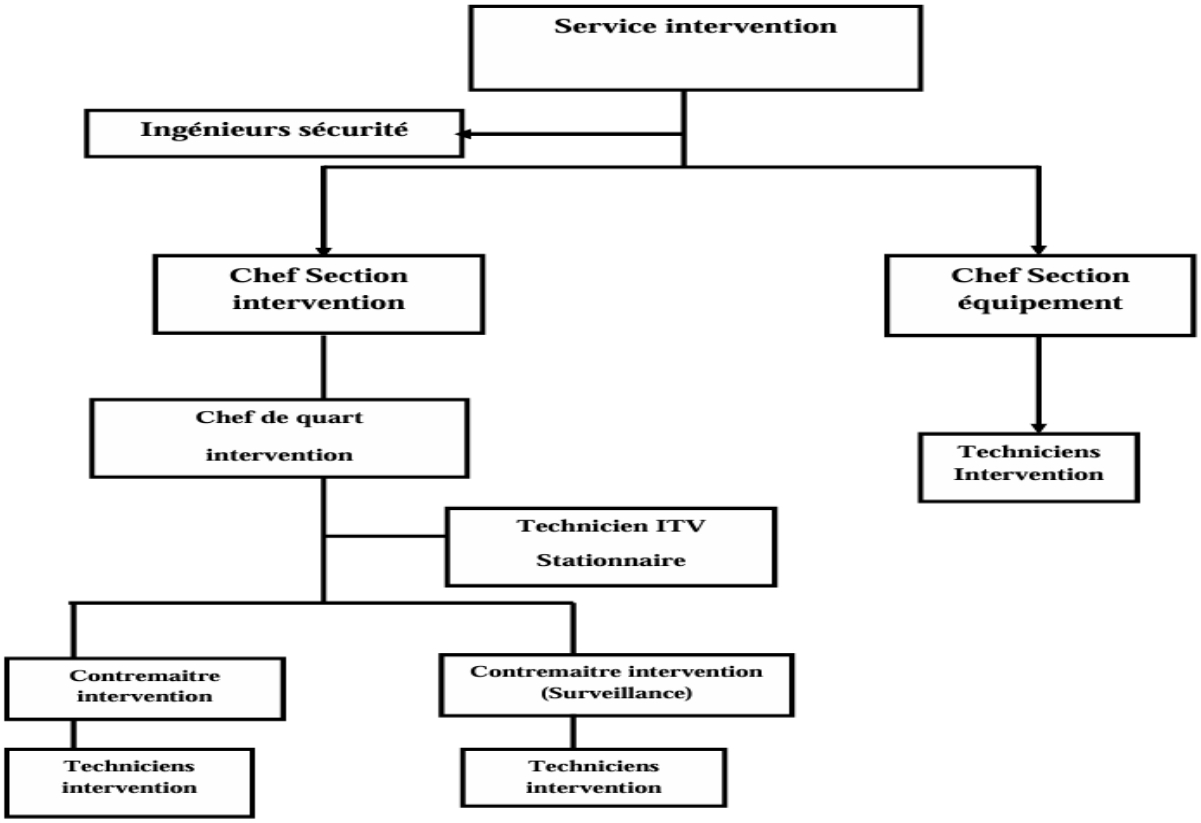


Fig. 1.5 : *organisation du département HSE [2]*

I.5 Description générale du procédé

Le complexe GL2/z comprend trois (03) zones d'exploitation

I.5.1 Zone utilités

Les utilités (fig. 1.8) constituent une zone importante au sein du complexe **GL2/z**. Elles permettent d'assurer la fourniture de tous les besoins pendant le démarrage et la marche normale des trains de liquéfaction.

Fig. 1.8 : Zone Utilités.

I.5.1.1 Source d'énergie

La vapeur d'eau est la source d'énergie choisie pour le complexe :

- Six (06) chaudières haute pression 62 bars de 400 tonnes\h par train

Fig. 1.6 : *Bassin d'eau de mer (Ammari et Chlaoua, 2025).*

I.5.1.2 Production d'électricité

La production d'électricité est assurée par trois (03) alternateurs entraînés par des turbines à vapeurs. Les turbo-alternateurs fournissent l'énergie de 36 MW par générateur.

I.5.1.3 Unité de dessalement

Elle permet de produire de l'eau distillée pour l'alimentation des chaudières.

I.5.1.4 Production d'air comprimé

Une grande partie de l'instrumentation du complexe est pneumatique. La production de l'air comprimé est assurée par un ensemble de quatre (04) compresseurs et d'un compresseur d'air secours.

I.5.2 Zone de Procèdes

Cette zone est composée de six (06) trains qui produisent 9000 m^3/jour/train du **GNL,** Chaque train dispos de sa propre section de décarbonatation, de séchage et de liquéfaction des hydrocarbures. D'où :

I.5.2.1 Section de traitement de gaz

Elle comprend trois étapes :

1. Démercurisation : élimination de Mercure Hg.
2. Décarbonatation : élimination du CO_2.
3. Déshydratation : élimination du H2O
4. Pré refroidissement du GN au propane

I.5.2.2 Section de séparation et de liquéfaction

Elle comprend deux étapes *:*

1-Séparation : séparation des hydrocarbures lourds.

2-Liquéfaction : Liquéfier le gaz naturel et Élimination de l'azote.

I.5.2.3 Section de fractionnement

C'est le système de fractionnement des hydrocarbures lourds, il comprend trois étapes :

1-De-éthanisation : récupération de l'éthane.

2-Dépropanisation : récupération du propane.

3-Débutanisation : récupération du butane

I.4.1 Zone Terminal

C'est la zone de stockage et de chargement, elle contient trois (03) réservoirs de **GNL** d'une capacité de 100000 m^3 chacun et deux (02) réservoirs de gazoline d'une capacité de 14500 m^3 chacun.

- Une station de pompage de **GNL** d'une capacité de 10000 m^3/h ;
- Et de Deux (02) quais d'expédition avec dix (10) bras de chargement.
- Un réseau d'annexe comprenant les systèmes d'épuration pour les torches et le brûlot.

La figure 1.10 résume d'une façon générale le procès du complexe GL2/z depuis l'arrivée de gaz naturel jusqu'au chargement au niveau des navires pour la commercialisation.

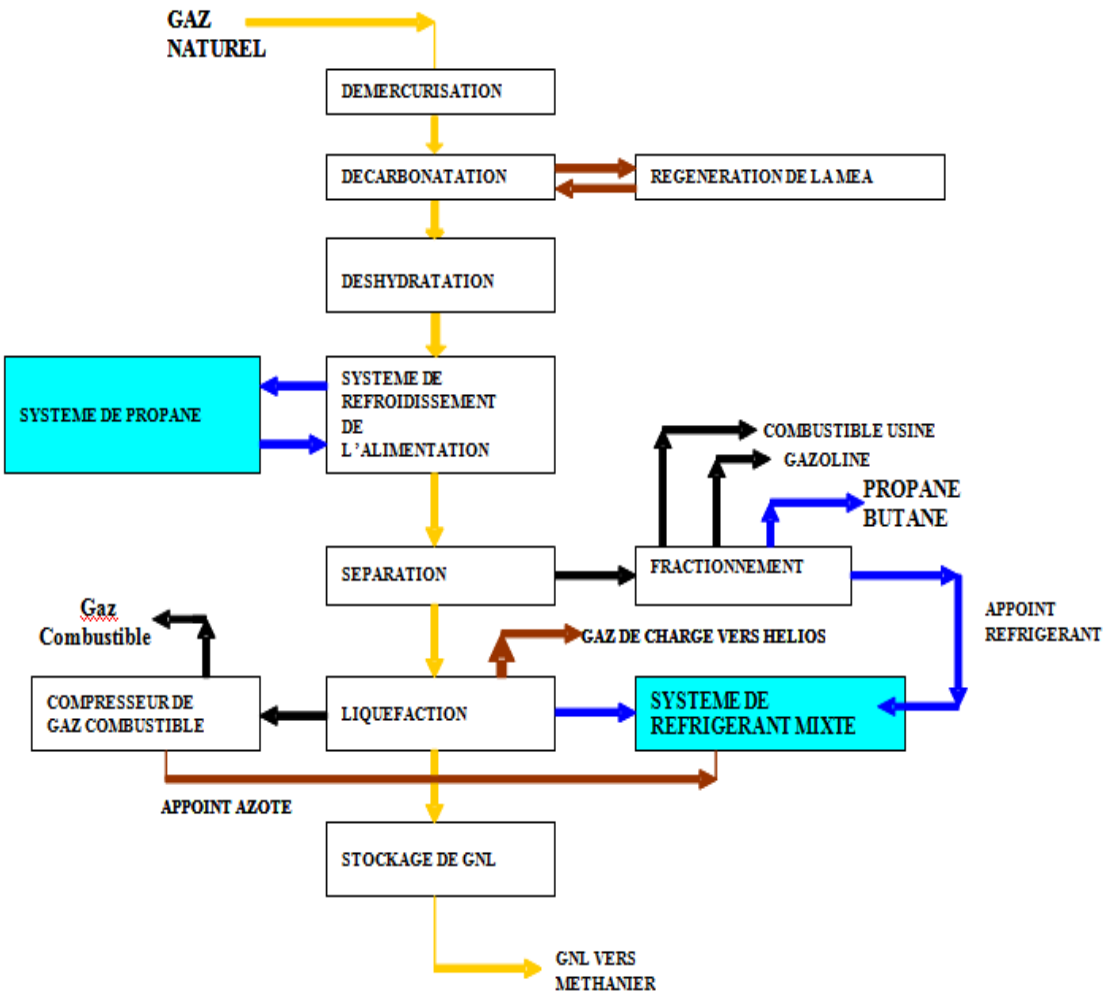


Fig. 1.7 : Procédé de complexe GL2/z

I.6 Réglementations et exigences environnementales spécifiques au site GL2/z

I.6.1 Cadre réglementaire général

Le site de GL2/z, comme tout complexe gazier en Algérie, est soumis à des réglementations strictes en matière de sécurité, d'environnement et de prévention des risques industriels, conformément à la législation nationale et aux standards internationaux adoptés par Sonatrach.

I.6.2 Installations classées et environnement

Les unités de liquéfaction sont classées parmi les établissements dangereux et insalubres, relevant du Décret exécutif n° 76-04 du 20 février 1976.
Le fonctionnement doit respecter les normes définies par la loi n° 83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement, ainsi que les textes abrogés et remplacés par la loi 01-19 et le décret 03-10, avec des dispositions spécifiques pour la pollution atmosphérique (décret exécutif n° 06-138).

I.6.3 Torchage et émissions

L'émission des gaz torchés est encadrée par des procédures de minimisation des rejets à l'atmosphère, notamment pendant les phases de démarrage.
Le décret n° 21-319 du 14 août 2021 impose une étude de risques obligatoire et des autorisations d'exploitation pour les unités manipulant des hydrocarbures
Une surveillance des installations est requise par la circulaire DPEM du 21/07/1993 portant sur le contrôle technique des unités de traitement et de stockage des hydrocarbures.

I.6.4 Équipements sous pression et sécurité

Les équipements du site sont soumis aux exigences du décret exécutif n° 21-261 du 13 juin 2021, concernant les équipements sous pression (ESP). Une attention particulière est portée à la sécurité incendie via le décret n° 76-36 relatif à la protection contre les risques d'incendie et de panique. Des règles spécifiques encadrent l'utilisation de gaz sous pression, ainsi que les systèmes de torchage pour les phases critiques (ex. démarrage, mise à l'arrêt).

I.6.5 Études HAZOP et autorisations

Avant toute mise en service, une étude HAZOP (Hazard and Operability) doit être menée conformément aux normes IEC 61882 et les procédures ARH (Autorité de Régulation des Hydrocarbures).

I.6.6 Normes SONATRACH et internationales

Le projet suit également les standards SONATRACH internes, et des normes comme API 521 (dépressurisation et torchage) et NFPA 59A (stockage et manipulation du GNL). Toutes les installations doivent se conformer aux règles parasismiques RPA 99, et aux exigences techniques de construction civile et électrique (DTU, IEC, ISO).

I.7 Organigramme de gestion environnementale – ISO 14001 au GL2/z

L'organigramme ci-dessous illustre les différents pôles du système de management environnemental (SME) tel qu'appliqué au GL2/z. Il met en évidence la centralité du responsable HSE environnement dans la coordination des activités de suivi des émissions, d'identification des aspects environnementaux significatifs (ex. torchage), et de pilotage des actions correctives. La direction générale assure un soutien stratégique, tandis que la communication et la formation HSE garantissent l'implication de tous les niveaux opérationnels.

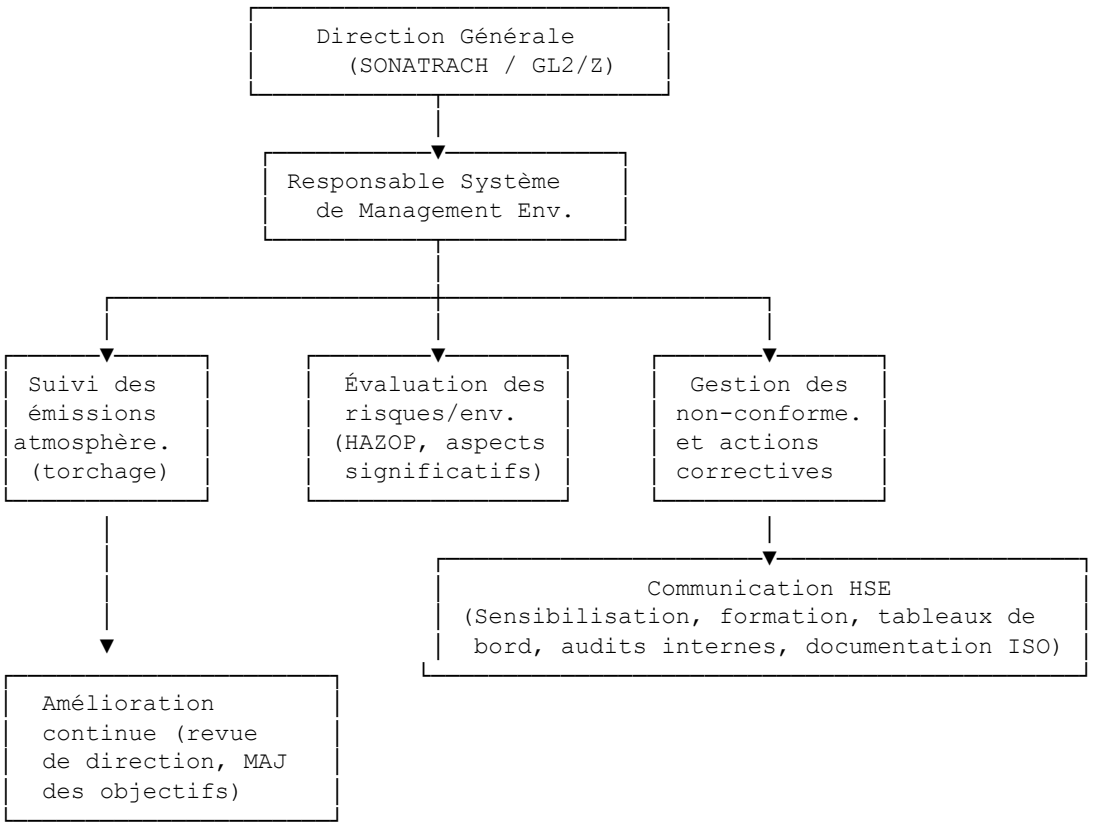


Fig. 1.8 : *schéma générale de gestion environnementale de complexe GL2/z [2]*

Chapitre 2

Bilan de connaissances bibliographiques sur les gaz torchés

Fig. 2.1 *: Torche chaude (Ammari et Chlaoua, 2025)*

II.1 Généralités

Le système de torchage du complexe GL2/z est composé de plusieurs torches réparties selon les origines des gaz à évacuer. Il inclut :

- Des collecteurs de gaz torchés acheminant les gaz vers les torches,
- Des systèmes d'allumage automatique (flamme pilote),
- Des systèmes de sécurité pour la détection des surpressions et déclenchement des purges,
- Et une structure élevée pour une dispersion efficace des produits de combustion.

Chaque type de torche est conçu pour s'adapter à la température, la composition et la pression du gaz qu'elle traite.

II.1.1 Définition de la torche (ou torchère)

Dans le contexte industriel (comme celui du complexe GL2/z de SONATRACH), une torche est un dispositif de sécurité utilisé pour l'évacuation contrôlée des gaz ou liquides en excès. Elle sert à brûler les hydrocarbures (gaz ou liquides volatils) qui ne peuvent pas être récupérés ou recyclés de manière économique ou sécurisée, notamment lors : des démarrages ou arrêts des unités, des purges de sécurité, des situations d'urgence, ou de rejets excédentaires dans les systèmes de stockage ou de traitement.

II.1.2 Définition du torchage

Le torchage est l'action de brûler à la torche les gaz ou liquides hydrocarburés. Il s'agit d'une mesure de sécurité et environnementale qui permet d'éviter les émissions non contrôlées de substances potentiellement dangereuses. Cette opération est encadrée pour limiter les impacts environnementaux (notamment les émissions de CO_2, de Nox, de suies, etc.).

Le torchage est souvent associé à des systèmes de récupération des vapeurs et à des brûlages dans des brûlots pour les liquides lourds (C5+, gazoline en excès) comme cela est décrit dans le document.

II.1.3 Objectifs du Torchage

Le principal objectif du torchage est de **sécuriser les installations** en éliminant les excédents de gaz qui ne peuvent être utilisés immédiatement. Il sert également à **prévenir les risques d'explosion ou d'incendie** en maintenant une pression stable dans les systèmes de production. Cependant, cette pratique a des impacts environnementaux significatifs, notamment des émissions de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane, ce dernier ayant un potentiel de réchauffement global bien supérieur à celui du CO_2.

II.1.4 Origine du torchage

Origine du torchage au complexe GL2/z (Sonatrach) Le torchage au complexe GL2/z intervient principalement pour des raisons de sécurité, notamment lors :

- des phases de démarrage et d'arrêt des installations,
- des déséquilibres de procédé (ex. : surpression),
- des incidents ou pannes, où le gaz ne peut pas être traité ou stocké,
- ou encore pour évacuer les excès de gaz non utilisables en temps réel.

Ainsi, le torchage permet d'éviter l'accumulation de gaz dangereux en les brûlant de manière contrôlée.

II.2 Valorisation du torchage

Le torchage, bien qu'il implique la combustion de produits énergétiques, est valorisé dans le cadre du complexe GL2/z comme un outil essentiel de gestion des risques, de fiabilisation des opérations, et de réduction contrôlée des émissions. Il est intégré dans une logique plus large de sécurité industrielle, de continuité de service et de conformité environnementale.

II.2.1 Valorisation du torchage – Point de vue sécurité

Évacuation rapide et sécurisée des gaz en excès lors des phases de démarrage, d'arrêt, ou d'urgence, prévenant les surpressions ou l'accumulation de gaz explosifs dans les unités. Toutes les soupapes de sécurité sont connectées aux torches (sauf quelques exceptions mineures), ce qui fait du torchage un élément central du système de sécurité industrielle.

II.2.2 Valorisation – Point de vue technique et opérationnel

Permet de purger les systèmes des hydrocarbures résiduels ou excédentaires (C2 à C5), qui pourraient compromettre le bon fonctionnement des équipements.

Facilite les phases de transition dans les unités (ex. : refroidissement, mise en froid des méthaniers, vidanges de lignes).

La séparation entre torches chaudes, froides et de boil-off optimise la gestion énergétique en minimisant le gaspillage de gaz utile et en canalisant les flux selon leur nature (température, pression, composition).

II.2.3 Valorisation – Point de vue environnemental

Le torchage réduit les émissions directes de gaz à effet de serre ou de vapeurs toxiques dans l'atmosphère en les brûlant de manière contrôlée.

Le système inclut également un brûlot, destiné à détruire les liquides lourds ou les excédents de gazoline, limitant ainsi les risques de fuites au sol ou d'incendies en zones non contrôlées.

II.2.4 Valorisation indirecte – Point de vue énergétique

Bien que le torchage soit une forme de perte énergétique, il est parfois préféré à une récupération coûteuse et techniquement difficile, surtout pour les petites quantités ou les situations imprévues. Certaines fractions torchées peuvent être partiellement récupérées (ex. : gaz de boil-off renvoyé à l'aspiration des compresseurs de fuel gaz), ce qui limite le volume final de gaz effectivement torché.la composition chimique des gaz torchés varie en fonction de la nature des flux évacués et du système de torche concerné.

II.3 Types de torche, basés sur les sections liées aux utilités, à la liquéfaction, au fractionnement et au stockage au niveau du complexe GL2/z

II.3.1 Gaz torchés – Torche chaude

II.3.1.1 Origine des gaz :

-Décarbonatation

-Déshydratation

-Tour de lavage

-Fractionnement

-Régénération MEA (via ballon X37F)

II.3.1.2 Composition probable :

-CO_2

-Méthane (CH_4)

-Éthane (C_2H_6)

-Propane (C_3H_8)

-Traces de vapeur d'eau (H_2O)

-Possiblement H_2S, si traces présentes dans le gaz brut

-Impuretés hydrocarbonées légères

II.3.2 Gaz torchés – Torche froide

II.3.2.1 Origine des gaz :

-Boucles froides (propane, MCR)

-Section de liquéfaction

-Vapeurs issues de la tour de lavage ou du refroidissement cryogénique

II.3.2.2 **Composition probable**

-Méthane (CH_4)

-Azote (N_2)

-Éthane (C_2H_6)

-Propane (C_3H_8)

-Gaz en phase vapeur issus de la liquéfaction ou de la séparation des phases

II.3.3 Torche de mise en froid des méthaniers

II.3.3.1 Origine des gaz :

Vapeurs générées pendant le refroidissement des cuves des méthaniers (ébullition du GNL)

II.3.3.2 Composition probable :

-Méthane (CH_4) (principal composant du GNL)

-Azote (N_2)

-Traces d'éthane et autres C_2+

II.3.4 Torche BP (boil-off LNG)

II.3.4.1 Origine des gaz :

-Vapeurs des réservoirs GNL

-Bras de retour vapeur pendant chargement

II.3.4.2 Composition chimique typique du boil-off :

- 90 à 99 % Méthane (CH_4)
- 1 à 8 % Azote (N_2)
- <1 % Éthane et autres hydrocarbures légers

Remarque : ce mélange dépend des conditions de stockage et des pertes thermiques)

II.3.5 Brûlot (pour les liquides)

II.3.5.1 Origine des gaz :

-Fractions liquides lourdes (C5+)

-Excès de gazoline

II.3.5.2 Composition liquide (avant évaporation/combustion)

-Pentane (C_5H_{12})

-Hexane (C_6H_{14})

-Heptane (C_7H_{16})

-Gazoline : mélange complexe d'hydrocarbures légers C5–C9

En cas de combustion, ces composés donnent des gaz comprenant :

-CO_2, CO (incomplet)

-Nox, suies (si combustion imparfaite)

-Vapeur d'eau (H_2O)

-Cendres ou résidus selon les additifs chimiques

II.4 Volumes mondiaux des gaz torchés

Évolution récente des volumes torchés

2021 : 144 Gm^3

2022 : 139 Gm^3 (-3 % par rapport à 2021)

2023 : 148 Gm^3 (+7 % par rapport à 2022)

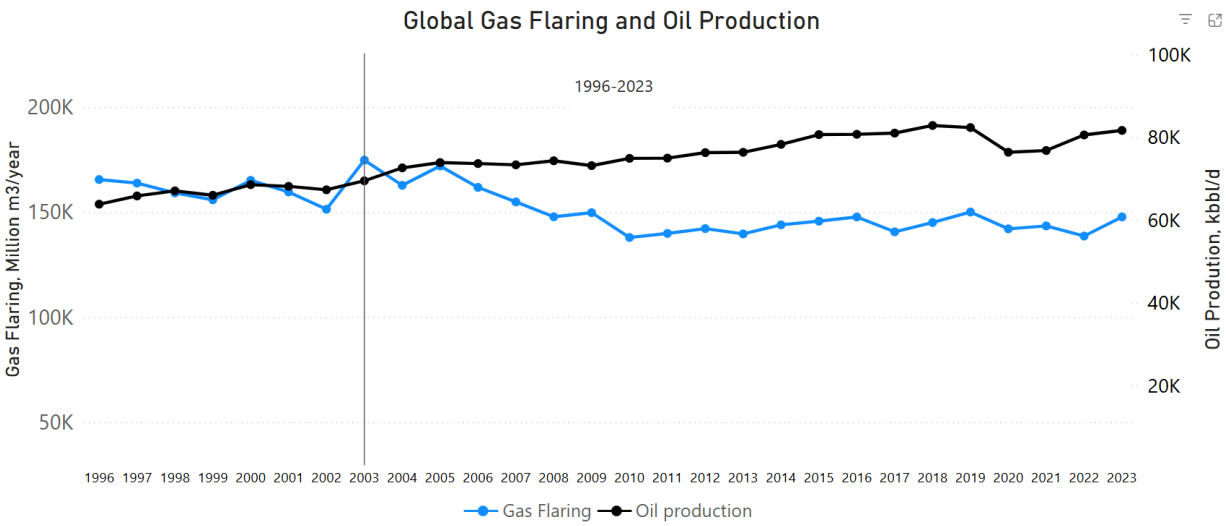


Fig. 2.2 : *Graphiques du volume de torchage de gaz et de la production de pétrole .[4]*

Le graphique mondial du torchage de gaz publié par la Banque mondiale révèle qu'en 2023, le volume de gaz torché a atteint 148 milliards de mètres cubes, enregistrant une hausse de 7 % par rapport à 2022, malgré une production pétrolière restée relativement stable. Cette tendance montre que les efforts de réduction du torchage restent insuffisants et souligne l'urgence de mettre en place des solutions durables pour la valorisation du gaz associé dans une optique de sécurité, d'environnement et d'efficacité énergétique.[4]

II.5 Méthodes d'analyse des gaz torchés au complexe GL2/z

La méthode d'analyse des gaz torchés à GL2/z repose sur une combinaison de chromatographie en ligne, d'analyses de laboratoire, de suivi en temps réel par le DCS, et d'estimations via bilans de process. Cela garantit un contrôle de la sécurité, de la performance, et de la conformité environnementale

II.5.1 Analyse par chromatographie en phase gazeuse (CPG / GC)

Le laboratoire du complexe est équipé pour réaliser des analyses de gaz, incluant :

- La composition du gaz naturel,
- Les composants du GNL,
- Le teneur en CO_2, H_2S, azote, hydrocarbures lourds, etc**.**

Principe : La chromatographie en phase gazeuse permet de séparer et identifier les constituants d'un gaz torché, en mesurant leur concentration à l'aide de détecteurs spécifiques (ex : TCD, FID).

Utilisation probable pour

-Identifier la proportion de méthane, éthane, propane, butane, azote, etc.

-Contrôler la qualité des gaz envoyés à la torche ou leur résidu après combustion.

II.5.2 Suivi par capteurs et instrumentation en ligne

Le document mentionne l'utilisation :

- De chromatographes en ligne (ex. : pour la MEA, donc probablement aussi pour le gaz)

- De systèmes DCS (Commande Numérique) permettant un suivi en temps réel des gaz dans différentes parties du process.

Utilisation probable

- Contrôle continu des gaz à différents points (entrée/sortie de colonne, avant torche),

- Détection d'anomalies (présence de composés non souhaités),

- Ajustement automatique des conditions de torchage si nécessaire.

II.5.3 Estimations par bilans de masse et d'énergie

Dans un cadre opérationnel, on peut aussi estimer indirectement la composition ou le débit des gaz torchés à partir :

- des données de purge ou de surpression,

- des bilans de production (débits entrants, récupérés, perdus),

- et des modèles thermodynamiques des gaz traités.

- Cela permet notamment de calculer les volumes torchés non mesurés directement, surtout lors de phases transitoires (arrêt, démarrage).

II.5.4 Surveillance environnementale (potentiellement externe)

Les sites industriels sont souvent tenus de :

- Analyser les émissions de torche (CO_2, Nox, suies, COV),
- Fournir des rapports aux autorités environnementales.

Cela se fait souvent via :

- Capteurs de gaz en sortie de torche,
- Ou mesures ponctuelles de l'air ambiant autour du site. [5]

II.6 Fonction de la torche au complexe GL2/z

La torche est un dispositif de sécurité, de régulation et de protection environnementale. Elle permet d'éliminer les gaz et liquides indésirables ou dangereux, en garantissant la sûreté du complexe et la conformité aux normes industrielles.

II.6.1 Sécurité des installations

La torche permet l'évacuation sécurisée des gaz et liquides hydrocarburés en cas de :

- surcharges ou surpressions,
- démarrages et arrêts d'unités,
- arrêts d'urgence (ESD),
- ou défaillances d'équipements.

Elle joue un rôle vital dans la prévention des explosions et la protection des équipements sensibles.

II.6.2 Contrôle des excès et purges

Le système de torche sert à brûler les gaz excédentaires et les liquides purgeables qui ne peuvent pas être récupérés ou stockés :

- Gaz en excès dans les réservoirs (boil-off LNG),
- Vapeurs produites lors du chargement des méthaniers,
- Résidus volatils de procès (CO_2, hydrocarbures légers, etc.),
- Hydrocarbures liquides (C2 à C5) par le brûlot, en cas de débordement ou de nettoyage.

II.6.3 Protection environnementale

Au lieu de libérer directement les gaz dans l'atmosphère, la torche les brûle de manière contrôlée, réduisant ainsi les émissions nocives :
- Moins de gaz à effet de serre non brûlés,
- Réduction des composés organiques volatils (COV),
- Contrôle des émissions de sécurité (via torche chaude, froide, BP, etc.).

II.6.4 Gestion de l'énergie résiduelle

- Certains gaz torchés sont récupérés partiellement en amont (ex. : boil-off LNG renvoyé aux compresseurs).
- La torche intervient donc seulement en dernier recours, lorsque la valorisation ou la réinjection du gaz ne sont pas possibles. [5]

II.7 Description du système de torche au niveau du complexe GL2/z

Le système de torchage du GL2/z est un élément essentiel de la sécurité du site. Il permet d'assurer une évacuation contrôlée et sécurisée des gaz en cas d'excès ou de dysfonctionnement, tout en respectant les normes environnementales dans la mesure du possible. L'étude HAZOP s'est précisément concentrée sur l'amélioration du collecteur de récupération des gaz torchés, pour réduire les émissions inutiles et valoriser une partie de ces gaz en les recyclant vers d'autres trains opérationnels.

II.7.1 Système de sécurité des équipements au complexe GL2/z (Sonatrach)

Le système de sécurité est étroitement lié à la gestion des surpressions, à la détection de gaz et au contrôle des émissions. Il comprend :

Principaux dispositifs de sécurité

- Soupapes de sécurité : protègent les équipements contre la surpression.
- Vannes de décharge (Blow down) : permettent l'évacuation rapide du gaz vers les torchères en cas d'incident.
- Systèmes de détection gaz/flamme : surveillent les fuites ou la présence d'une flamme anormale.

- Flamme pilote : allume automatiquement les gaz en cas de torchage.
- Systèmes d'arrêt d'urgence (ESD) : arrêtent rapidement les installations en cas de situation critique.
- Surveillance continue par le Département HSE : en lien avec le service prévention, environnement et intervention [5]

II.8 Sources et causes des émissions de gaz torchés

Les émissions de gaz torchés dans le complexe GL2/z peuvent avoir plusieurs origines techniques ou opérationnelles :

II.8.1 Causes principales

Tab. 2.1 : les causes principales des émissions de gaz torchés

Origine	Explication
Démarrages/arrêts des unités	Pendant ces phases, les gaz excédentaires sont torchés pour éviter des surpressions.
Surpression	En cas de dérèglement du procédé, le gaz excédentaire est envoyé vers la torche.
Défaillance ou maintenance	Une panne ou une opération sur une ligne oblige parfois à détourner le gaz.
Pertes de procédé	Fuites dans les échangeurs, séparateurs ou compresseurs.
Torchage des vapeurs GNL	Pendant la mise en froid des cuves ou le dégazage.

Les torchères sont donc des équipements de sécurité et d'évacuation contrôlée, mais elles deviennent une source d'émissions lorsque les gaz ne sont pas récupérés ni valorisés.

II.9 Impacts du torchage

II.9.1 Impacts positifs du torchage

Même si controversé, le torchage présente quelques aspects bénéfiques, notamment en matière de sécurité :

- Prévention des surpressions : évite les explosions ou les incidents dus à une accumulation de gaz dans les conduites ou équipements.
- Sécurité du personnel et des installations : en cas de dysfonctionnement ou de démarrage, le gaz est évacué vers une torche plutôt que d'être libéré dans l'atmosphère.
- Réduction des gaz dangereux : en brûlant le méthane (CH_4), on le transforme en CO_2, moins nocif en termes de potentiel de réchauffement global ($CO_2 < CH_4$).

II.9.2 Impacts négatifs du torchage

II.9.2.1 Impact des gaz torchés sur l'Homme :

L'exposition aux émissions des gaz torchés peut avoir des effets néfastes sur la santé, notamment le cancer, des lésions pulmonaires et des problèmes de peau.

- Irritation des yeux et des voies respiratoires due aux oxydes d'azote, soufre, suie.
- Affections respiratoires chroniques : bronchites, asthme, allergies.
- Risque de cancer : exposition prolongée aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).
- Effets sur le système nerveux : à cause du benzène, toluène, etc.

II.9.2.2 Impact économique des gaz torchés

- Pertes de ressource énergétique : le gaz torché représente du gaz non valorisé, donc une perte de revenu potentiel pour l'entreprise.
- Moins de productivité : surtout en cas de torchage répété lors des arrêts ou défauts de procédé.
- Coût indirect : image négative de l'entreprise, sanctions environnementales, taxes sur les émissions, etc.

Selon la Banque mondiale, 148 milliards de m^3 de gaz ont été torchés en 2023, représentant des milliards de dollars de gaz perdu

II.9.2.3 Impact environnemental des gaz torchés

- Émissions de gaz à effet de serre (GES) : surtout CO_2, mais aussi méthane (CH_4) et oxydes d'azote (NO_x), qui participent au changement climatique.
- Pollution atmosphérique : production de suie, particules fines (PM), monoxyde de carbone (CO), composés organiques volatils (COV).
- Dégradation de la qualité de l'air : notamment à proximité des installations, affectant la faune, la flore et les populations locale.[6]

Chapitre 3

Etude HAZOP sur la solution proposée

III.1 Résolution du problème des gaz torchés

FRACTIONNEMENT – RECYCLAGE A UN AUTRE TRAIN

Cette solution consiste à recycler le liquide présent dans le ballon tampon de l'alimentation du dééthaniseur X51-F, en cas d'indisponibilité de la section de Fractionnement d'un train, pendant le démarrage ou pendant les périodes d'indisponibilité de la section de Fractionnement pour d'autres raisons.

Les ballons tampon de l'alimentation du dééthaniseur X51-F des trains seront connectés par l'intermédiaire d'un collecteur unique, permettant d'envoyer le fond de la tour de lavage X01E d'un train, dont la section de Fractionnement est indisponible, vers les sections de Fractionnement des autres trains en fonctionnement.

Pour le schéma de procédé de cette solution, on propose :

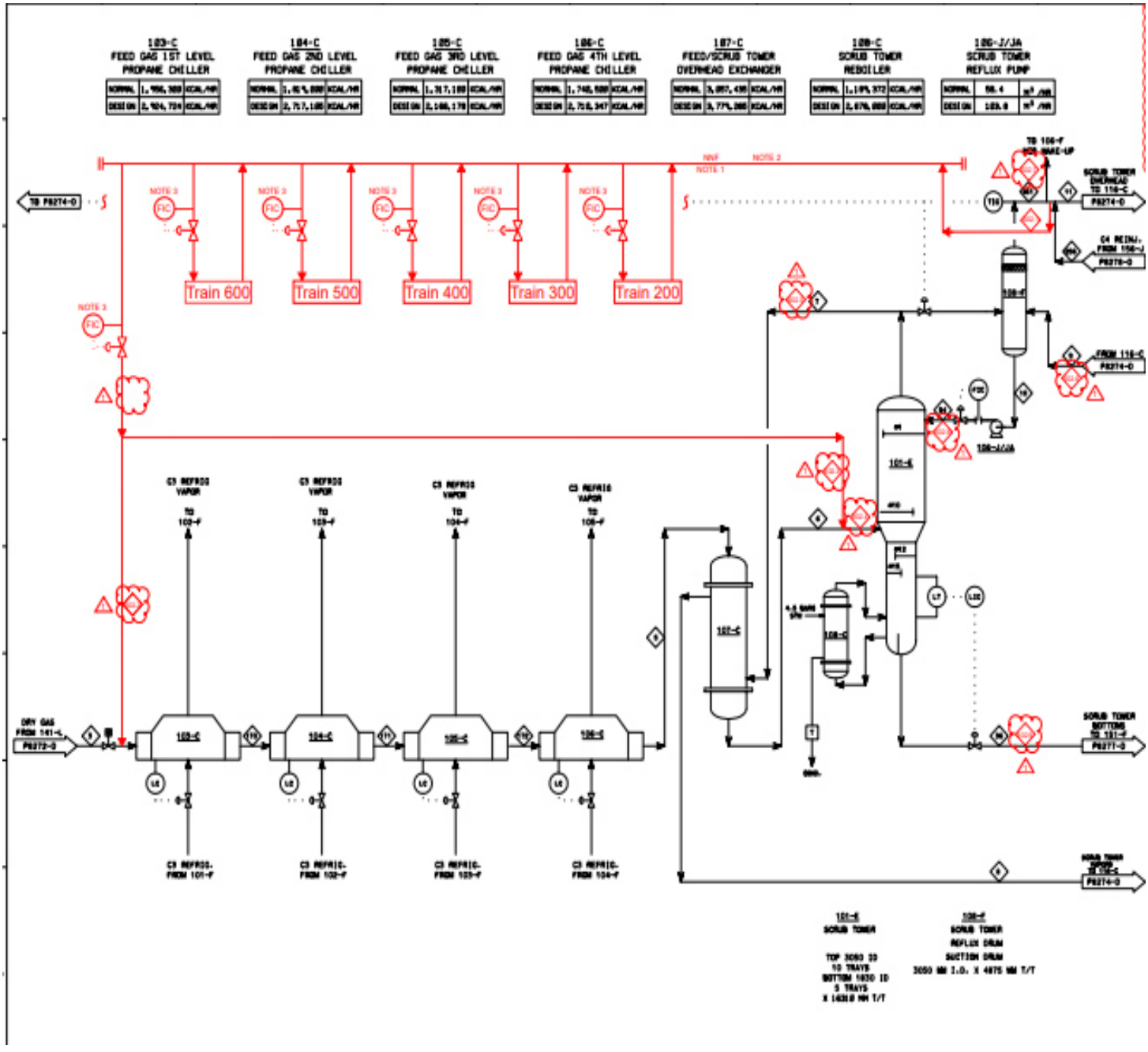


Fig. 3.1 : schéma de la nouvelle installation

Bilan Matière et Énergétique

Le scénario d'un train en opération stable avec instabilité du fractionnement n'a pas été enregistré récemment.

Le gaz qui peut potentiellement être récupéré sera donc celui envoyé vers le réseau FG par la vanne XV-704 pendant un démarrage. Mais ce gaz ne sera torché que si le réseau FG est saturé, ce qui ne sera pas le cas avec trois trains en fonctionnement normal et un quatrième en démarrage (appoint GN estimé à 14 550 Cm3/h).

Pour cette raison, les quantités de produits récupérés présentées ci-dessous, à prendre en compte pour l'étude de cette solution, correspondent à seulement une fraction des quantités maximales récupérables et estimé par TEE de façon conservatrice à 50%.

La mise en œuvre de cette solution devra permettre de récupérer, ou d'éviter de torcher, les quantités listées dans le tableau 3.1.[7]

Tab. 3.1 : *Composants du GN récupérable au sein du complexe GL2/z*

Produit	Quantité récupérée/an	Unité
Fuel Gaz (CH_4)	66 000	Cm^3
Éthane (C_2)	220	Tonnes
Propane (C_3)	361	Tonnes
Butane (C_4)	219	Tonnes
Gazoline (C_5^+)	776	Tonnes

Réduction totale du torchage estimée **:** 550 000 cm^3/an.

Cette estimation est basée sur une récupération maximale conservatrice de **50 %**, principalement lors des **démarrages** ou en cas de **saturation du réseau FG**.

Tab. 2.2 : *Caractéristiques physico-chimiques du GN*

Composant	% Molaire	Debit (Kmol/H)	Volume Récuperé/an (cm^3)	Masse Récupérée/an (Tonnes)	Poids Moleculaire
C1 (Méthane)	12,00 %	43	131 124	65 562	16,04
C2 (Ethane)	31,62 %	114	345 512	220	30,07
C3 (Propane)	35,40 %	128	386 816	361	44,10
IC4 (Isobutane)	6,49 %	23	70 949	87	58,12
NC4 (N-Butane)	9,83 %	36	107 380	132	58,12
IC5 (Isopentane)	2,30 %	8	25 110	38	72,15
NC5 (N-pentane)	2,30 %	8	25 110	38	72,15

Bilan des Utilités

Cette solution n'a pas d'impact sur le bilan des utilités du complexe.

Liste d'Équipements

Aucun équipement n'est prévu dans le cadre de cette solution.

III.2 Modifications Requises et Liste des Points de Raccordement

L'implémentation de cette solution nécessitera les modifications décrites ci-après aux installations existantes du Complexe GL2/z :

• Installation de nouvelles lignes d'interconnexion entre les ballons tampon de l'alimentation du dééthaniseur X51-F des trains, équipées de vannes tout ou rien et un nouveau régulateur de pression sur la nouvelle conduite vers les ballons X51-F de tous les trains. Le point de consigne des régulateurs des trains en fonctionnement qui recevront le liquide recyclé sera géré par un nouveau contrôleur Master, qui règlera le niveau du ballon X51-F du train en démarrage ou avec la section de Fractionnement indisponible.

Les conduites nécessaires à la solution seront raccordées aux tuyauteries existantes suivantes :

Tab. 3.3 : *Points de raccordement*

Point de raccordement	Fluide	P&ID	Ligne
GL2Z.S04-TP01	Gaz de procédé	62-D30	P-402 – 4 » (3P1)
GL2Z.S04-TP01	Gaz de procédé	62-D30	P-626 – 6 » (3P1)

Plan d'Implantation

Aucun Plan d'Implantation n'est présenté pour cette solution, car aucun équipement nouveau n'est prévu.

III.3 Analyse de l'Impact

L'implémentation de cette solution aura l'impact décrit ci-après sur le fonctionnement normal des installations existantes du Complexe GL2/z.

La pression de fonctionnement du ballon tampon de l'alimentation du dééthaniseur X51-F du train en démarrage, ou avec la section de Fractionnement indisponible, devra augmenter 1 à 2 bars de façon à permettre l'envoi du liquide vers les autres ballons X51-F des trains en fonctionnement. Aucun impact est attendu sur le train en démarrage, ou avec la section de

Fractionnement indisponible, si les trains en fonctionnement peuvent récupérer la totalité du liquide.
Les trains qui recevront le liquide recyclé devront pouvoir continuer à fonctionner normalement. L'exception est pour le cas où un seul train en fonctionnement normal recevrait le liquide recyclé à partir d'un autre train en fonctionnement avec une charge au-delà de son minimum technique, dont la section de Fractionnement est indisponible.

Les points de raccordement listés font référence à un seul train. A répercuter sur les six trains du Complexe GL2/z.

Dans ce cas, serait nécessaire soit de réduire la charge en GN du train qui a la section de Fractionnement indisponible à son minimum technique (60%), soit de réduire la charge en GN du train qui reçoit le liquide de façon à ne pas surcharger sa section de Fractionnement.[8]

III.4 Évaluation Économique

III.4.1 Estimation des Coûts et Évaluation de la Valeur Ajoutée

Les coûts d'investissement sont estimés à la hauteur de 1 045 068 US$, sur la base du coût des équipements, tuyauteries et instruments listé dans les sections Liste d'Équipements et Modifications Requises et Liste des Points de Raccordement.
Les coûts opérationnels sont estimés à la hauteur de 123 508 US$ par an.
La valeur ajoutée crée par cette solution est estimée à la hauteur de 275 053 US$ par an, sur la base de la matière première et des produits récupérés, ou non torchés, et des utilités éventuellement produites, listées dans les sections Bilan Matière et Énergétique et Bilan des Utilités.

III.4.2 Résultats

La Valeur Actuelle Nette (VAN) de cette solution est de 275 291 US$, le Ratio Bénéfice-Coût (RBC) 1.30, le Retour Sur Investissement (RSI) 151%, le Taux de Rentabilité Interne (TRI) 17.8% et le Pay Out Time (POT) 7 ans.
Cette solution est donc rentable, d'un point de vue purement de rentabilité.
La réduction du torchage de cette solution correspond à 5.5 x 105 Cm3/an de gaz et à un Ratio Coût-Efficacité (RCE) de 0.52 Cm3/an/US$.
Pour l'évaluation économique détaillée de cette solution, [9]

III.5 Analyse de Constructibilité

Les points de raccordement doivent obligatoirement être réalisés pendant un arrêt de train.

Cependant, l'installation des nouvelles tuyauteries peut être réalisée pendant le fonctionnement normal de chaque train. Dans ce cas, toutes les mesures de sécurité requises pour la réalisation des travaux avec les installations en fonctionnement doivent être suivies et assurées.

En conclusion, malgré son faible impact dans la réduction du torchage du Complexe GL2Z (0.4%), cette solution est rentable d'un point de vue économique. On a pris comme hypothèse pour l'étude de cette solution une récupération de 50% des produits torchés. Approche très conservative, car pour le cas trois trains en fonctionnement normal et un train en démarrage le réseau FG n'est pas saturé, ce qui permet l'envoi de ces produits vers ce réseau.

III.6 Étude HAZOP

III.6.1 Historique Et Domaine D'application

La méthode HAZOP, pour HAZard Operability, a été développée par la société Imperial Chemical Industries (ICI) au début des années 1970. Elle a depuis été adaptée dans différents secteurs d'activité. L'Union des Industries Chimiques (UIC) a publié en 1980 une version française de cette méthode dans son cahier de sécurité n°2 intitulés « Etude de sécurité sur schéma de circulation des fluides ».

Considérant de manière systématique les dérives des paramètres d'une installation en vue d'en identifier les causes et les conséquences, cette méthode est particulièrement utile pour l'examen de systèmes thermo-hydrauliques, pour lesquels des paramètres comme le débit, la température, la pression, le niveau, la concentration… sont particulièrement importants pour la sécurité de l'installation.

De par sa nature, cette méthode requiert notamment l'examen de schémas et plans de circulation des fluides ou schémas P&ID (Piping and Instrumentation Diagram).

III.6.1 Principe

La méthode de type HAZOP est dédiée à l'analyse des risques des systèmes thermo hydrauliques pour lesquels il est primordial de maîtriser des paramètres comme la pression, la température, le débit…

L'HAZOP suit une procédure assez semblable à celle proposée par l'AMDE. L'HAZOP ne considère plus des modes de défaillances mais les dérives potentielles (ou déviations) des

principaux paramètres liés à l'exploitation de l'installation. De ce fait, elle est centrée sur l'installation à la différence de l'AMDE qui est centrée sur les composants.

Pour chaque partie constitutive du système examiné (ligne ou maille), la génération (conceptuelle) des dérives est effectuée de manière systématique par la conjonction :

• de mots-clés comme « Pas de », « Plus de », « Moins de », « Trop de »

• des paramètres associés au système étudié. Des paramètres couramment rencontrés concernent la température, la pression, le débit, la concentration, mais également le temps ou des opérations à effectuer.

Mot-clé + Paramètre = Dérive

Le groupe de travail doit ainsi s'attacher à déterminer les causes et les conséquences potentielles de chacune de ces dérives et à identifier les moyens existants permettant de détecter cette dérive, d'en prévenir l'occurrence ou d'en limiter les effets. Le cas échéant, le groupe de travail pourra proposer des mesures correctives à engager en vue de tendre vers plus de sécurité.

A l'origine, l'HAZOP n'a pas été prévue pour procéder à une estimation de la probabilité d'occurrence des dérives ou de la gravité de leurs conséquences. Cet outil est donc parfois qualifié de qualitatif.

Néanmoins, dans le domaine des risques accidentels majeurs, une estimation a priori de la probabilité et de la gravité des conséquences des dérives identifiées s'avère souvent nécessaire. Dans ce contexte, l'HAZOP doit donc être complétée par une analyse de la criticité des risques sur les bases d'une technique quantitative simplifiée. Dans une première approche, une démarche semi-quantitative similaire à celle présentée au paragraphe 3.3.3 pourra être retenue.

Cette adaptation semi-quantitative de l'HAZOP est d'ailleurs mentionnée dans la norme CEI :61882 « Études de danger et d'exploitabilité (études HAZOP) – Guide d'application ».

III.6.2 Déroulement

Le déroulement d'une étude HAZOP est sensiblement similaire à celui d'une AMDE. Il convient pour mener l'analyse de suivre les étapes suivantes :

1) Dans un premier temps, choisir une ligne ou de la maille. Elle englobe généralement un équipement et ses connexions, l'ensemble réalisant une fonction dans le procédé identifiée au cours de la description fonctionnelle.

2) Choisir un paramètre de fonctionnement,

3) Retenir un mot-clé et générer une dérive,

4) Vérifier que la dérive est crédible. Si oui, passer au point 5, sinon revenir au point 3,

5) Identifier les causes et les conséquences potentielles de cette dérive,

6) Examiner les moyens visant à détecter cette dérive ainsi que ceux prévus pour en prévenir l'occurrence ou en limiter les effets,

7) Proposer, le cas échéant, des recommandations et améliorations,

8) Retenir un nouveau mot-clé pour le même paramètre et reprendre l'analyse au point 3,

9) Lorsque tous les mots-clés ont été considérés, retenir un nouveau paramètre en reprendre l'analyse au point 2,

10) Lorsque toutes les phases de fonctionnement ont été envisagées, retenir une nouvelle ligne et reprendre l'analyse au point 1.

La démarche présentée ici est globalement cohérente avec la démarche présentée dans la norme CEI :61882 « Études de danger et d'exploitabilité (études HAZOP) – Guide d'application ».

Notons de plus que, dans le domaine des risques accidentels, il est souvent nécessaire de procéder à une estimation de la criticité des dérives identifiées.

Enfin, comme le précise la norme CEI :61882, il est également possible de dérouler l'HAZOP, en envisageant en premier lieu un mot-clé puis de lui affecter systématiquement les paramètres identifiés.

Tout comme pour l'APR et l'AMDEC présentées dans les paragraphes précédents, un tableau de synthèse se révèle souvent utile pour guider la réflexion et collecter les résultats des discussions menées au sein du groupe de travail.

Un exemple de tableau pouvant être utilisé est présenté et commenté dans les paragraphes suivants.

Tab. 3.4 : Exemple de tableau pour l'HAZOP

Date : Ligne ou équipement :								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
N°	Mot-clé	Paramètre	Causes	Conséquences	Détection	Sécurité existante	Propositions d'amélioration	Observations

III.6.3 Définition des mots-clés (Colonne 2)

Les mots-clés, accolés aux paramètres importants pour le procédé, permettent de générer de manière systématique les dérives à considérer. La norme CEI : 61882 propose des exemples de mots-clés dont l'usage est particulièrement courant. Ces mots-clés sont repris dans le tableau3.5 .[10]

Tab. 3.5 : Exemples de Mots-clés pour l'HAZOP (norme CEI : 61882)

Type de déviation	Mot-Guide	Exemple d'interprétation
Négative	Ne pas faire	Aucune partie de l'intention n'est remplie
Modification quantitative	Plus	Augmentation quantitative
	Moins	Diminution quantitative
Modification qualitative	En plus de	Présence d'impuretés – Exécution simultanée d'une autre opération/étape
	Partie de	Une partie seulement de l'intention est réalisée
Substitution	Inverse	S'applique à l'inverse de l'écoulement dans les canalisations ou à l'inversion des réactions chimiques
	Autre que	Un résultat différent de l'intention originale est obtenu
Temps	Plus tôt	Un évènement se produit avant l'heure prévue
	Plus tard	Un évènement se produit après l'heure prévue
Ordre Séquence	Avant	Un évènement se produit trop tôt dans une séquence
	Après	Un évènement se produit trop tard dans une séquence

III.6.4 Définition des paramètres (Colonne 3)

Les paramètres auxquels sont accolés les mots-clés dépendent bien sûr du système considéré. Généralement, l'ensemble des paramètres pouvant avoir une incidence sur la sécurité de l'installation doit être sélectionné. De manière fréquente, les paramètres sur lesquels porte l'analyse sont :

• la température,

• la pression,

• le débit,
• le niveau,
• la concentration,
• le temps,
• des opérations à réaliser…

La combinaison de ces paramètres avec les mots clé précédemment définis permet donc de générer des dérives de ces paramètres.

Par exemple :

• « Plus de » et « Température » = « Température trop haute »,
• « Moins de » et « Pression » = « Pression trop basse »,
• « Inverse » et « Débit » = « Retour de produit »,
• « Pas de » et « Niveau » = « Capacité vide ».

III.6.5 Causes et Conséquences de la Dérive (Colonnes 4 et 5)

De la même façon que pour une AMDE, le groupe de travail, une fois la dérive envisagée, doit identifier les causes de cette dérive, puis les conséquences potentielles de cette dérive. En pratique, il peut être difficile d'affecter à chaque mot clé (et dérive) une portion bien délimitée du système et en conséquence, l'examen des causes potentielles peut s'avérer, dans certains cas, complexe. Afin de faciliter cette identification, il est utile de se référer à des listes guides telles que celle présentée en Annexe 3 à titre illustratif.

III.6.6 Moyens de détection, Sécurités existantes et propositions (Colonnes 6, 7 et 8)

La méthode HAZOP prévoit d'identifier pour chaque dérive les moyens accordés à sa détection et les barrières de sécurité prévues pour en réduire l'occurrence ou les effets. Si les mesures mises en place paraissent insuffisantes au regard du risque encouru, le groupe de travail peut proposer des améliorations en vue de pallier à ces problèmes ou du moins définir des actions à engager pour améliorer la sécurité quant à ces points précis.

III.7 Limites et Avantages

L'HAZOP est un outil particulièrement efficace pour les systèmes thermo-hydrauliques.

Cette méthode présente tout comme l'AMDE un caractère systématique et méthodique.

Considérant, de plus, simplement les dérives de paramètres de fonctionnement du système, elle évite entre autres de considérer, à l'instar de l'AMDE, tous les modes de défaillances possibles pour chacun des composants du système.

En revanche, l'HAZOP permet difficilement d'analyser les évènements résultant de la combinaison simultanée de plusieurs défaillances. Par ailleurs, il est parfois difficile d'affecter un mot clé à une portion bien délimitée du système à étudier. Cela complique singulièrement l'identification exhaustive des causes potentielles d'une dérive. En effet, les systèmes étudiés sont souvent composés de parties interconnectées si bien qu'une dérive survenant dans une ligne ou maille peut avoir des conséquences ou à l'inverse des causes dans une maille voisine et inversement. Bien entendu, il est possible a priori de reporter les implications d'une dérive d'une partie à une autre du système. Toutefois, cette tâche peut rapidement s'avérer complexe.[6]

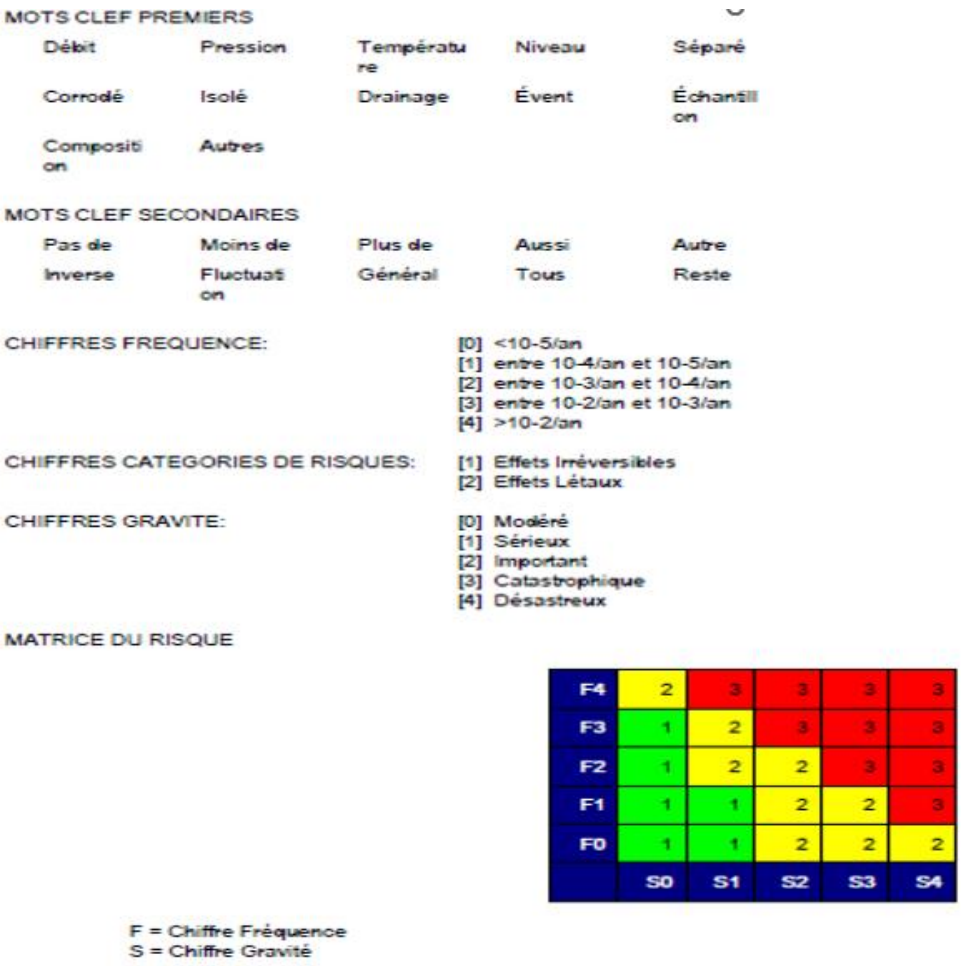


Fig. 3.2 : *catégories des risques.*

Tab. 3.6 : Catégories de risque.

	0 Modéré	1 Sérieux	2 Important	3 Catastrophique	4 Désastreux
1 : Effets indésirables	Externe : Pas de personne Interne : au plus 10 personnes	Externe : moins de 10 personnes Interne : entre 10 et 100 personnes	Externe : entre 10 et 100personnes Interne : entre 100 et 1000 personnes	Externe : entre 100 et 1000 personnes Interne : plus de 1000 personnes	Externe : plus de 1000 personnes
2 : Effets létaux	Au plus 1 personne	Externe : au plus 1 personne Interne : entre 1 et 10personnes	Externe : entre 1 et 10 personnes Interne : entre 10 et 100 personnes	Externe : entre 10 et 100personnes Interne plus de 100 personnes	Externe : plus de 100 personnes

III.8 Analyse HAZOP de récupération des gaz torchés au niveau du complexe GL2/z

III.8.1 Introduction

Dans le cadre de l'amélioration continue de la performance environnementale et de la sécurité industrielle du complexe GL2/z de Sonatrach, une analyse HAZOP (Hazard and Operability Study) a été réalisée sur le collecteur de récupération des gaz torchés. Cette analyse a pour objectif d'identifier les déviations potentielles des paramètres critiques de fonctionnement du système, d'en évaluer les causes et conséquences, et de proposer des mesures correctives pour renforcer les dispositifs de sécurité et d'opérabilité. Cette étude a été menée conformément aux exigences de la norme CEI 61882, sur la base des données opérationnelles, des observations de terrain et des spécificités techniques de l'installation.

III.8.2 Description de la ligne analysée

La ligne analysée correspond au collecteur central de récupération des gaz torchés, interconnecté aux différents trains de liquéfaction du complexe GL2/z. Ce collecteur permet d'acheminer les gaz hydrocarburés (CH_4, C_2H_6, C_3H_8, etc.) provenant des purges de sécurité, d'arrêt, ou de déséquilibre process, vers un système de valorisation ou, à défaut, vers la torche.

Les paramètres de fonctionnement critiques de cette ligne incluent : le débit, la pression, la température, le niveau de condensats, la qualité du gaz, et le bon fonctionnement des organes de commande et de détection.

III.8.3 Conclusion

L'analyse HAZOP du collecteur de récupération des gaz torchés met en évidence plusieurs déviations critiques, susceptibles d'affecter la performance environnementale, la sécurité des opérations, et l'efficacité énergétique du complexe GL2/z. Les barrières existantes sont généralement efficaces, mais certaines situations (perte de commande, allumage inactif, flux inversé) nécessitent un renforcement. Il est donc recommandé de :

- Renforcer la redondance des capteurs critiques (pression, débit, flamme)
- Instaurer des tests réguliers sur les vannes, clapets et purges
- Mettre à jour les logiques de sécurité inter-train
- Proposer un système d'évaluation continue des performances de récupération

Cette démarche s'inscrit dans les exigences de la norme CEI 61882 et des réglementations algériennes sur la sécurité des installations classées et la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Tab. 3.7 : *Analyse détaillée des déviations du collecteur de gaz torchés (HAZOP)*

N°	Mot-clé	Paramètre	Déviation	Causes possibles	Conséquences	Moyens de détection	Barrières existantes	Actions proposées	Observations
1	Pas de	Débit	Aucun débit	Vanne fermée, obstruction, gel	Perte de valorisation, torchage direct	Débitmètre (FT), alarme DCS	Vannes manuelles, torche active	Maintenance préventive, double instrumentation	Fréquent au démarrage
2	Moins de	Pression	Pression basse	Fuite, pertes de charge	Recyclage inopérant	PI, tendance DCS	Régulateur auto	Calibration périodique	Impacte performance
3	Plus de	Pression	Sursaturation	Blocage aval, saturation train	Soupape s'ouvre, torchage inopportun	PI avec alarme	Soupape sécurité, ESD	Réglage dynamique consignes	Démarrages simultanés
4	Inverse	Débit	Retour de gaz	Clapet défectueux	Contamination réseau FG	PI différentielle	Clapet anti-retour	Test périodique clapets	Grave mais rare
5	Trop de	Température	Gaz trop chaud	Recyclage chaud	Fatigue thermique, fuite	TT, DCS	Isolation thermique	Bypass ou dilution	Pendant purges
6	Pas de	Commande	Perte de contrôle	Défaillance DCS	Manuel risqué	Alerte DCS	Mode manuel, alarme	UPS, redondance automate	Critique en urgence
7	Trop de	Niveau	Condensats élevés	Mauvais drainage	Obstruction, coup de bélier	Inspection visuelle	Purge manuelle	Ajouter purge automatique	Si gaz avec C5+
8	Pas de	Allumage	Flamme inactive	Coupure air/combustible	Gaz non brûlé	Alerte flamme DCS	Redondance flamme	Tests, UPS spécifique	ATEX critique
9	Fausse	Lecture	Mesure erronée	Capteur déréglé	Réaction inappropriée	Données incohérentes	Alarmes croisées	Étalonnage régulier	Risque aveuglement
10	Mauvaise	Qualité gaz	Gaz avec liquide	Séparation inefficace	Obstruction, corrosion	Analyse gaz en ligne	Séparateur	Alarme HC liquide	Cas courant boil-off

III.9 Applicabilité de la nouvelle installation

L'étude HAZOP montre que les dérives potentielles sont bien identifiées, avec des causes connues, des moyens de détection existants, et des solutions correctives réalistes.
Les interconnexions entre trains, les vannes de régulation, les systèmes de surveillance DCS, ainsi que les mécanismes de récupération (vers le réseau fuel gaz ou vers d'autres trains) sont techniquement faisables et déjà partiellement en place.
Le coût d'investissement est raisonnable par rapport aux gains en gaz récupéré et à la réduction du torchage (1,045 million USD ≈ amortissable à moyen terme).

Alors, la solution est techniquement applicable sur le terrain, sans modification majeure des équipements principaux du GL2/z, Et elle n'est pas dangereuse si les recommandations HAZOP sont appliquées.

Les risques identifiés (perte de contrôle, retour de gaz, obstruction, défaillance allumage) existent mais sont maîtrisables.

Les barrières techniques actuelles (vannes, régulateurs, flamme pilote, capteurs, torche en secours) assurent un bon niveau de sécurité.

Les recommandations de l'HAZOP renforcent la résilience de l'installation : redondance, maintenance préventive, logique de protection croisée entre trains.

Conclusion : L'installation présente un niveau de risque faible à modéré, acceptable selon les normes CEI 61882 et la réglementation algérienne, à condition de respecter les actions proposées (tests, surveillance, etc.).

Concernant l'efficacité de cette méthode :

Elle permet de réduire le torchage de 550 000 cm^3/an, ce qui représente moins d'émissions de CO_2, CH_4, Nox (impact environnemental), moins de pertes énergétiques et une valorisation du gaz récupéré (CH_4, C_2, C_3, C_4, C_5+)

L'analyse économique montre :

- Un TRI de 17,8 % (bon)
- Un Retour sur investissement en moins de 7 ans

- Un Ratio Coût-Efficacité de 0,52 cm^3/USD

Alors, La solution est rentable, utile et cohérente avec les engagements environnementaux.

Conclusion

L'étude menée dans ce chapitre a permis de démontrer que la solution de recyclage des produits liquides non séparés, en cas d'indisponibilité de la section de fractionnement d'un train, constitue une **alternative réaliste et sécurisée** à l'envoi de ces produits vers la torchère. En connectant les ballons tampons d'alimentation des dééthaniseurs X51-F à travers un collecteur unique, il est possible de transférer ces flux vers les sections de fractionnement des autres trains en fonctionnement, sans modifier profondément l'architecture existante.

L'analyse HAZOP a permis d'identifier les points critiques liés à cette configuration, notamment la gestion de la pression dans les ballons et l'impact potentiel sur les trains récepteurs. Toutefois, l'évaluation a confirmé que ces risques peuvent être **maîtrisés à travers des modifications simples**, telles que l'ajout de régulateurs de pression et de contrôleurs de niveau.

Sur le plan économique, bien que la contribution de cette solution à la réduction globale du torchage du site reste limitée (environ **0,4 %**, soit **550 000 cm^3/an**), sa **rentabilité est clairement démontrée**, avec un Retour sur Investissement (RSI) de **151 %**, un Taux de Rentabilité Interne (TRI) de **17,8 %**, et une période d'amortissement (POT) de **7 ans**. L'hypothèse conservatrice de 50 % de récupération, formulée par TECHNOEDIF ENGENHARIA (TEE), renforce la crédibilité des résultats obtenus.

En conclusion, cette première solution est **techniquement faisable, économiquement avantageuse, et compatible avec les exigences de sécurité du complexe GL2/z**, tout en contribuant à la réduction des émissions torchées

Chapitre4

Analyse de Risques par le Logiciel PHAST – Implantation d'un Nouveau Collecteur Inter-trains pour la récupération des gaz torchés au démarrage d'un train

IV.1 Introduction

Face aux enjeux environnementaux, économiques et sécuritaires liés au torchage des gaz lors des phases de démarrage des trains de liquéfaction au complexe GL2/z, une solution innovante est proposée dans ce chapitre. Celle-ci repose sur l'implantation d'un collecteur commun, judicieusement positionné entre les bacs de stockage de GNL et les trains de liquéfaction.

L'objectif principal de cette solution est de réduire de manière significative le volume de gaz torché, en récupérant les gaz non séparés lors du démarrage d'un train pour les rediriger vers l'entrée d'un autre train en fonctionnement. Cela permet de limiter le recours à la torchère, tout en améliorant l'efficacité énergétique et la sécurité globale du site.

Sur le plan technique, cette solution implique la création d'un réseau de canalisations interconnectées, intégrant des pipelines issus des sorties de train et convergeant vers un collecteur équipé d'un système de régulation de pression. Le collecteur, en tant qu'élément central, permettra de transférer les gaz récupérés vers une section active du complexe, tout en assurant leur conditionnement sécurisé.

La mise en place d'un collecteur de récupération des gaz torchés entre les trains du complexe GNL2/z vise à améliorer la valorisation des hydrocarbures et réduire les impacts environnementaux du torchage. Afin de valider l'emplacement de ce collecteur (proposé entre les trains et les bacs de stockage), une étude de conséquences a été réalisée avec le logiciel PHAST 8.71.

Ce chapitre présente en détail deux test d'emplacement qui contient trois scénarios à haut risque modélisés, dans deux directions du vent ainsi que les résultats obtenus et les recommandations pour une implantation sécurisé du collecteur, même pour les équipements entourés.

IV.2 Objectifs de l'étude

- Évaluer les conséquences possibles d'accidents majeurs liés au nouveau collecteur de gaz torché (fuites, rupture, explosion).
- Identifier les distances de sécurité nécessaires pour éviter tout impact sur les installations critiques.
- Justifier le choix de l'emplacement du collecteur dans le plan d'aménagement du complexe GL2/z.

IV.3 Description du scénario de base

Lors du démarrage d'un train de liquéfaction, le gaz en sortie n'est pas immédiatement prêt à être dirigé vers les sections de traitement final ou de stockage, car il n'a pas encore atteint les conditions thermodynamiques stables permettant une séparation efficace des composants (méthane, éthane, propane, butane, etc.).

Pendant cette phase transitoire :

- Le gaz contient des impuretés résiduelles, parfois un excès de liquides, ou une composition instable.
- Il est donc dirigé vers la torchère, afin d'éviter d'endommager les unités en aval ou de polluer les produits stockés.

Il n'existe pas une durée "universelle" fixe, car elle dépend de plusieurs facteurs (technologie du train, pression, température, composition du gaz, état des équipements…). Cependant, dans l'installations GL2/z, les durées de torchage observées au démarrage sont généralement comprises entre **:**

- **15 à 45 minutes** pour les petits ajustements,
- **1 à 2 heures** pour les démarrages complets de trains (temps nécessaire pour stabiliser les températures, pressions et composition du gaz).

Donc on a décidé a ajouter un collecteur qui relie plusieurs trains de liquéfaction au niveau de la section de Fractionnement. Ou les gaz excédentaires sont déviés vers un autre train opérationnel.

Gaz naturel composé principalement de CH4, C2H6, C3H8, C4H10, gazoline.

IV.3.1 Conditions atmosphériques

- Catégorie 1.5/F (conditions stables, nuit)
- Catégorie 5/D (conditions instables, jour avec vent modéré)

Hauteur du collecteur par rapport au sol : 1 m (niveau du collecteur)

Tension de vapeur : élevée, possibilité de formation de nuage inflammable.

Les données du collecteur (tab. 4.1)

Tab. 4.1 *: Paramètres du collecteur*

Le volume du collecteur	65 m3
Le diamètres	6 pouces
La pression de sortie du GN	45,1 bar
La température du GN	76 c°

Débit	13805 kg/h

IV.4 Deux scénarios à haut risque modélisés

Afin d'optimiser le choix de l'emplacement du collecteur, une étude ciblée a été menée sur deux scénarios représentatifs d'incidents potentiels. Ces scénarios ont été choisis pour couvrir un large éventail de gravité, en tenant compte à la fois de la sévérité des effets et de la plausibilité technique de leur survenue.

IV.4.1 Scénario 1 : Rupture totale du collecteur

Ce scénario représente le cas le plus critique en termes de dangerosité, bien qu'il soit peu probable. Il permet cependant d'évaluer les conséquences maximales d'un incident majeur sur les installations voisines, notamment en ce qui concerne les effets thermiques, les surpressions et les risques dominos.

IV.4.2 Scénario 2 : Fuite importante de diamètre 100 mm

Ce scénario, plus probable que le précédent, constitue un cas intermédiaire à forte gravité.
Il est caractérisé par une fuite prolongée à haut débit, générant des effets significatifs en termes de dispersion, de jet fire, de flash fire et d'explosion.

À l'issue de l'analyse de ces deux scénarios, il a été démontré que si l'emplacement du collecteur permet d'éviter l'exposition des unités sensibles aux zones d'effet critique (trains, bacs de stockage, fosse des pompes, etc.), alors les scénarios de fuites plus petites telles que celles de 50 mm ou 10 mm, bien qu'étant statistiquement plus fréquents, ne constituent pas une menace suffisante pour remettre en cause l'implantation proposée. En effet, l'objectif principal de cette étude est clairement défini : assurer une implantation sécurisée du collecteur tout en garantissant la sécurité des autres installations critiques du site. Il est donc pertinent de fonder cette démarche sur les scénarios les plus sévères

IV.4.3 Seuils de référence

IV.4.3.1 Seuils de Reference Pour Les Effets Thermiques

Nous utiliserons les seuils thermiques suivants pour quantifier et mesurer les effets d'un accident majeur sur l'homme et les effets dominos possibles sur les structures :

- **Seuils pour les effets sur l'homme**

Tab. 4.2 : Seuils pour les effets sur l'homme

Seuils	Justifications
2,5 kW/m²	L'accident peut affecter des personnes sensibles ou non averties
6,4 kW/m²	Conséquences graves, directes ou indirectes, immédiates ou à long terme
10 kW/m²	1% de fatalité après 20s pour des personnes non protégées
12,5 kW/m²	Conséquences irréversibles ou létales, même à courte exposition

- **Seuils pour les effets dominos**

Tab. 4.3 : Seuils pour les effets dominos

Seuils	Justifications
8 kW/m²	Dégâts aux installations non protégées
32 kW/m²	Dégâts aux installations protégées opérant à pression atmosphérique
44 kW/m²	Dégâts aux installations protégées opérant sous pression

Les seuils d'exposition pour les effets thermiques ont été déterminés en considérant une exposition de 20 secondes. Pour des boules de feu ayant une durée inférieure à 20 secondes, les seuils d'exposition doivent être recalculés. La formule de calcul du flux thermique équivalent aux seuils normalement utilisés est donnée ci-dessous :

$$I = (S) * (20/t)3/4$$

Avec I le nouveau seuil, S l'ancien seuil et t la durée d'exposition en secondes.

IV.4.3.2 Seuils de référence pour les effets de surpression

Nous utiliserons les seuils de surpression suivants pour quantifier et discuter des effets d'un accident majeur sur l'homme et les effets dominos possibles sur les bâtiments :

- ***Seuils pour les effets sur l'homme***

Tab. 4.4 : Seuils pour les effets sur l'homme

Seuils	Justifications
25 mbar	Dommages graves
50 mbar	Dommages irréversibles ou létaux

- ***Seuils pour les effets dominos***

Tab. 4.5 : Seuils pour les effets dominos

Seuils	Justifications
160 mbar	Dégâts aux structures (effet domino)
300 mbar	Dégâts graves aux structures

Note : Dans le cadre de cette étude, l'analyse des conséquences accidentelles s'est principalement focalisée sur les effets potentiels sur les installations, plutôt que sur les impacts humains. En effet, l'objectif principal est de déterminer la faisabilité de l'implantation d'un collecteur destiné à recycler les gaz torchés, dans une position optimale située entre les bacs de stockage et les six trains de traitement. Cette approche vise à garantir la sécurité des équipements et à minimiser les risques d'effet domino en cas de fuite ou de défaillance du système, tout en assurant une intégration fonctionnelle du collecteur dans l'environnement industriel existant[11].

IV.4.3.3 Condition métrologiques

Dans le cadre de cette étude réalisée à l'aide du logiciel PHAST, deux catégories de conditions météorologiques ont été retenues afin de couvrir les situations atmosphériques les plus représentatives et influentes sur la dispersion des gaz dans la région de Bethioua.

La première catégorie correspond à la classe de stabilité **1,5F**, caractérisée par une **nuit stable avec une nébulosité modérée et des vents faibles à modérés**. Cette configuration est considérée comme la **plus stable**, ce qui favorise la concentration des gaz à proximité de la source en raison d'une faible dispersion verticale.

La seconde catégorie retenue est **5D**, associée à une **vitesse de vent plus élevée** et à une **atmosphère instable typique des journées venteuses**. Ce cas est considéré comme **le plus dispersif**, représentant des conditions de ventilation plus efficaces, mais pouvant entraîner une propagation plus large en surface.

Il convient de préciser que les **valeurs extrêmes de vitesse de vent**, telles que celles atteignant **12 m/s**, bien qu'observées ponctuellement par le passé, **n'ont pas été prises en compte** dans l'étude en raison de leur caractère exceptionnel et de leur faible représentativité statistique.

Par ailleurs, l'analyse a été menée selon les **deux directions de vent les plus fréquentes observées à Bethioua**, à savoir le **Nord-Est (NE)** et le **Sud-Ouest (SW)**, afin de garantir une simulation conforme à la réalité météorologique locale. [12]

Premier test (1er emplacement)

Fig. 4.1 : *Localisation proposée du collecteur sur le site GNL2Z – Vue cartographique (premier emplacement)*

Étude du premier emplacement — Scénario 1 : Rupture totale du collecteur

L'évaluation du premier emplacement du collecteur commence par l'analyse du scénario le plus critique : **la rupture totale du collecteur**. Ce scénario, bien que peu probable, est essentiel pour évaluer l'ampleur maximale des conséquences possibles sur les installations environnantes.
En cas de rupture complète, plusieurs types d'effets dangereux peuvent survenir :

- **Une explosion**, générant des surpressions susceptibles de causer des dommages mécaniques graves aux structures proches ;
- **Une boule de feu (fireball)**, entraînant un rayonnement thermique intense dans toutes les directions autour du point de rejet ;
- **Un flash fire**, en cas de dispersion du nuage inflammable et d'inflammation différée à distance ;

Ces phénomènes sont modélisés dans PHAST et visualisés via le module GIS afin de déterminer l'étendue réelle des zones impactées. L'objectif est de vérifier si l'implantation initiale du collecteur expose les **trains de traitement, les bacs de stockage, ou d'autres équipements sensibles** à ces effets.
À l'aide du logiciel PHAST 8.71, les simulations ont permis de générer des rapports détaillés présentant l'ensemble des effets consécutifs à différents scénarios accidentels. Ces résultats sont

accompagnés de représentations graphiques, telles que des courbes de surpression ou de rayonnement thermique, ainsi que d'une visualisation spatiale via le module GIS intégrer. Cette approche permet de mieux comprendre l'ampleur des effets (explosion, feu, dispersion) et de situer précisément les zones impactées par rapport aux installations du site. Comme illustré a la figure ……

Tab. 4.6 : Effets consécutifs à différents scénarios accidentels (premier emplacement)

Path	Scenario	Weather	Overpressure level [bar]	Maximum distance [m]	Diameter [m]
Study\Collecteur gn	Rupture du collecteur	Category 1.5/F	0,025 0,05 0,16 0,3	348,365 195,644 88,0067 64,8009	656,73 351,289 136,013 89,6018
		Category 5/D	0,025 0,05 0,16 0,3	340,378 191,372 86,3526 63,7112	640,756 342,745 132,705 87,4225
	grande fuites de 100 mm	Category 1.5/F	0,025 0,05 0,16 0,3	251,53 195,007 155,17 146,581	243,06 130,014 50,3395 33,1622
		Category 5/D	0,025 0,05 0,16 0,3	261,671 209,733 173,128 165,236	223,342 119,467 46,2557 30,4719
	moyenne fuite de 50 mm	Category 1.5/F	0,025 0,05 0,16 0,3	104,013 78,8922 61,1866 57,3694	108,027 57,7843 22,3732 14,7388
		Category 5/D	0,025 0,05 0,16 0,3	109,828 86,6532 70,3197 66,7983	99,6555 53,3064 20,6394 13,5966

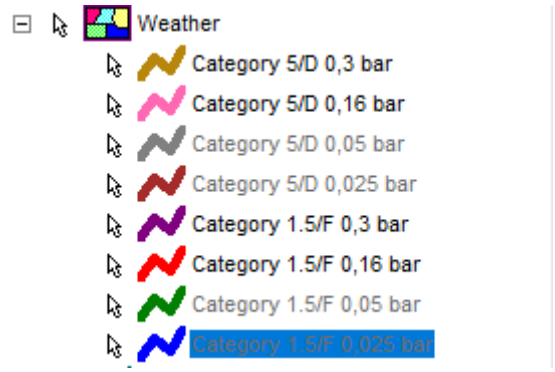
Interprétation des résultats d'explosion pour le scénario de rupture du collecteur, modélisé sous PHAST pour les deux conditions météo : 1.5/F et 5/D

Résultats PHAST – explosion

Tab. 4.7 : Effets d'explosion par logiciel PHAST (1er emplacement)

Surpression (bar)	**Distance max (1.5/F)**	**Distance max (5/D)**	**Commentaires**
0,025	348 m	340 m	Propagation large, dommages légers
0,05	196 m	191 m	Endommagement de structures secondaires
0,16 (effet domino)	**88 m**	**86 m**	**Risque domino sur structures proches**
0,3 (dommages graves)	**65 m**	**63 m**	**Détérioration sévère ou effondrement localisé**

Analyse spatiale fournie par le module GIS de PHAST :



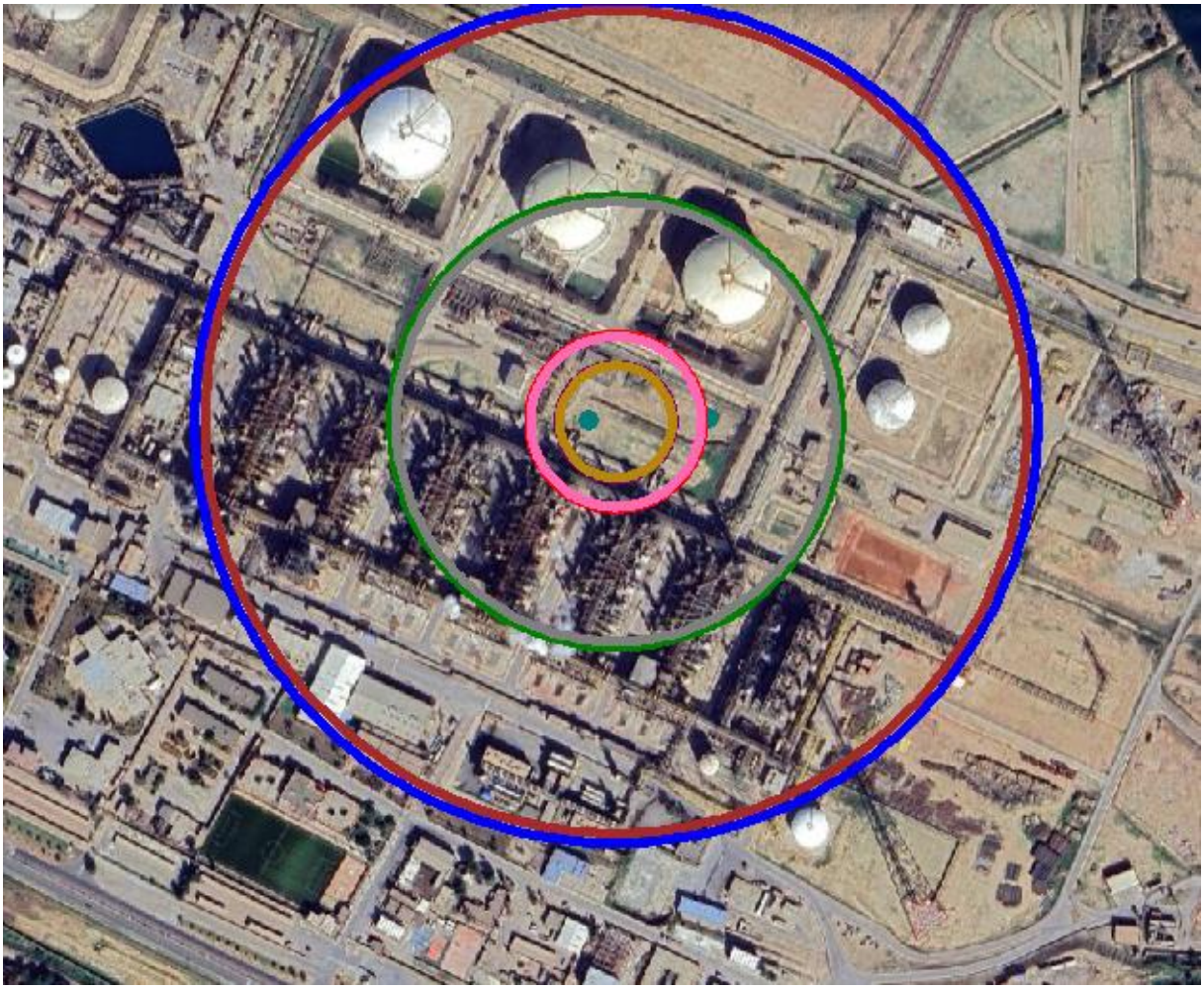


Fig. 4.2 : *Distances maximales d'impact en cas de rupture totale du collecteur (1er emplacement)*

On observe que, dans le cas d'une **rupture totale du collecteur**, les distances maximales d'impact calculées sous les conditions météorologiques **5D** (conditions instables à vent fort) sont **très similaires** à celles obtenues sous les conditions **1,5F** (conditions stables de nuit). Cela suggère que, dans ce type de scénario extrême, **les conditions météorologiques n'exercent qu'une influence limitée sur l'étendue des surpressions générées**.

Par ailleurs, bien que les seuils de surpression de **0,025 bar** et **0,05 bar** apparaissent dans les résultats issus du logiciel PHAST, ils sont principalement liés aux **effets sur les personnes** (blessures graves ou létales). Dans le cadre de cette étude, focalisée sur la **protection des infrastructures industrielles**, l'analyse a été réalisée en s'appuyant sur des seuils plus pertinents pour l'ingénierie :

- **0,16 bar**, correspondant au seuil minimal de déclenchement potentiel d'**effets dominos**,
- **0,3 bar**, associé à des **dommages structurels majeurs** (effondrements, ruptures d'équipements, etc.).

En conséquence, **toute implantation du collecteur à une distance inférieure à 90 mètres** des installations critiques (telles que les **bacs de stockage**, les **trains de traitement** ou autres unités sensibles) représenterait un **risque élevé et inacceptable**, tant du point de vue des **dommages physiques** que de la **propagation accidentelle**.

Plus spécifiquement, les résultats de simulation relatifs au scénario de **rupture totale du collecteur** révèlent l'apparition d'**effets dominos significatifs** affectant :

- **Une portion du train 400**,
- **Une partie de la fosse des pompes**,
- Ainsi qu'**un segment de la ligne commune de GNL** assurant le transfert vers les bacs de stockage.

Ces observations renforcent la nécessité d'un **positionnement rigoureux et sécurisé** du collecteur, basé sur une analyse de risques intégrée et tenant compte des interactions potentielles avec les différentes unités du site.

Résultat PHAST – fireball (Boule de feu)

La boule de feu est générée immédiatement après l'ignition du rejet gazeux en cas de rupture complète du collecteur. Ce phénomène engendre un rayonnement thermique intense sur une très courte durée, mais avec une propagation hémisphérique rapide.

Résultats clés :

Tab. 4.8 : Résultat PHAST – fireball (Boule de feu) (1er emplacement)

Paramètre	1.5/F	5/D
Diamètre de la boule de feu	72,76 m	72,76 m
Distance à 8 kW/m²	208,57 m	197,58 m
Distance à 32 kW/m²	104,43 m	99,50 m
Distance à 44 kW/m²	88,07 m	83,95 m

Résultats obtenus par GIS :

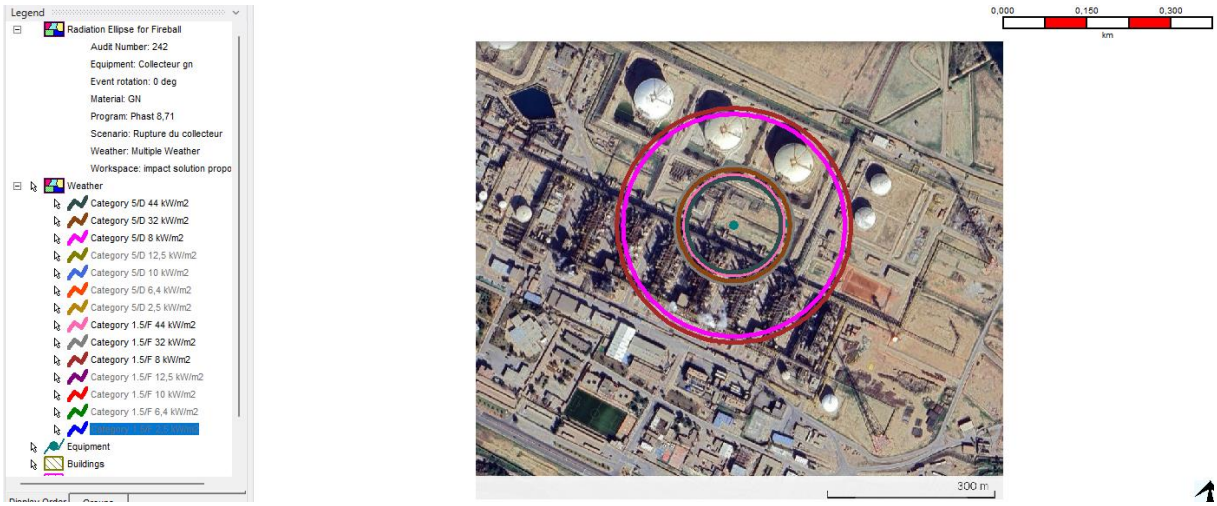


Fig. 4.3 : Distances maximales d'impact en cas de boule de feu (1er emplacement)

Interprétation des résultats précédents

- Les effets thermiques sévères (≥ 8 kW/m²) atteignent jusqu'à 200 m, exposant fortement les installations non protégées à proximité.
- Les équipements protégés (sous pression ou isolés thermiquement) peuvent subir des dommages s'ils sont situés à moins de 90 m (zone ≥ 44 kW/m²).
- Les valeurs sont légèrement plus élevées sous atmosphère stable (1.5/F), ce qui est typique, car les gaz se diluent moins.

Résultat PHAST- Flash Fire (Inflammation différée d'un nuage dispersé)

Le Flash Fire se produit lorsque le nuage gazeux ne s'enflamme pas immédiatement, mais rencontre une source d'ignition à distance. Cela peut générer une combustion rapide à travers le nuage, affectant les zones éloignées du point de fuite.

Résultats clés

Tab. 4.9 : Résultat PHAST- Flash Fire (Inflammation différée d'un nuage dispersé) (1er emplacement)

Paramètre	1.5/F	5/D
Distance jusqu'à LFL	18,95 m	20,13 m
Distance jusqu'à fraction de LFL	24,86 m	28,96 m
Flash fire max (tous niveaux)	24,63 m	28,88 m
Hauteur d'effet	~1,1 m	~1,1 m

Interprétation

- Le Flash Fire est localisé, avec une propagation inférieure à 30 m du point d'émission.
- Il reste néanmoins dangereux pour les opérateurs, équipements au sol, capteurs ou vannes, notamment à proximité immédiate du collecteur.
- Il peut initier un effet domino localisé si des tuyauteries ou équipements exposés sont présents dans cette zone.

Résultats PHAST – 2ème Scénario grande fuite de 100 mm

Dans ce scénario, les conditions présentes sur le site réunissent déjà deux des trois éléments du triangle du feu : un combustible, le GNL en phase gazeuse, et un comburant, l'oxygène de l'air ambiant. Il suffit alors de la présence d'une source d'ignition pour déclencher un incendie de type jet fire. Les résultats obtenus à partir de l'analyse PHAST confirment cette possibilité, avec des longueurs de flamme importantes et des rayonnements thermiques significatifs autour de la zone de fuite.

Caractéristiques de la fuite

- Débit de fuite : 54,16 kg/s
- Température : -69,89 °C
- Durée de la fuite : 36,45 s
- Vitesse de jet : 719,66 m/s

Il s'agit d'une libération rapide à haute pression, générant des effets potentiellement graves sur les installations environnantes.

1. Jet Fire – Effets thermiques directs

Dans l'analyse des résultats relatifs au scénario de la grande fuite de 100 mm, l'accent a été mis exclusivement sur les effets potentiels sur les installations proches. Celui de la grande fuite se caractérise par une dynamique d'émission plus localisée, où la direction du jet, la position de la fuite, ainsi que les conditions météorologiques (notamment la direction et la stabilité du vent) jouent un rôle déterminant dans l'ampleur et l'orientation des conséquences sur le site. Les résultats obtenus montrent que, même en l'absence de rupture complète, ce type de fuite peut générer des effets significatifs (thermiques, surpression, et boule de feu) sur un rayon important, ce qui impose une vigilance accrue quant au positionnement du collecteur vis-à-vis des structures critiques telles que les bacs de stockage ou les unités de traitement.

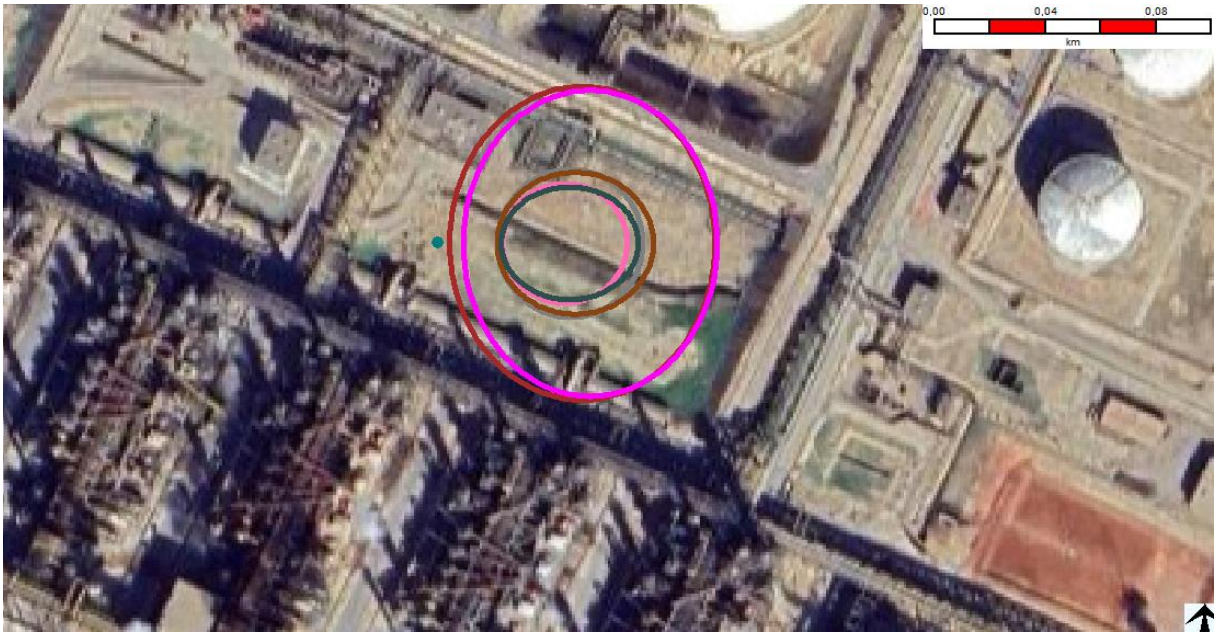
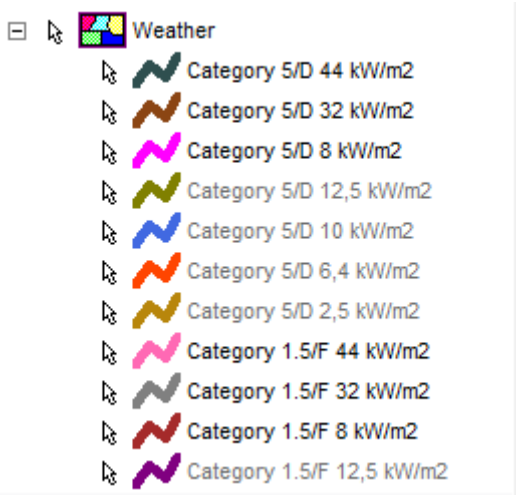


Fig. 4.4 : *Distances maximales d'impact en cas de jet enflammée (1er emplacement)*

Le code couleur des cercles qui sont dans dans l'analyse spatiale fournie par le module GIS :



Pour la direction inverse du vent

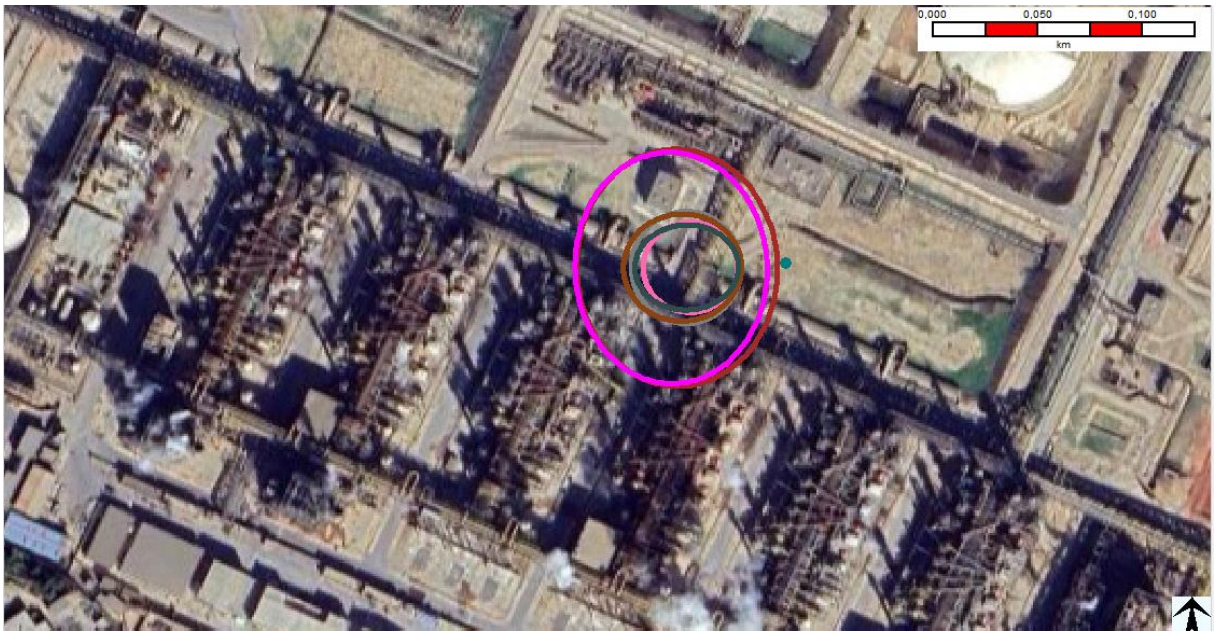


Fig. 4.5 : *Distances maximales d'impact en cas de jet enflammée pour direction inverse (1er emplacement)*

Seuils prise en charge

Tab. 4.10 : *Résultat PHAST- Jet Fire (jet enflammé) (1er emplacement)*

Seuil de rayonnement	1.5/F (m)	5/D (m)
2,5 kW/m² (effets faibles)	135,1	131,6
8 kW/m² (dommages installations non protégées)	99,5	100,3
32 kW/m² (dommages installations protégées atm)	73,5	77,3
44 kW/m² (dommages installations protégées sous pression)	67,9	71,9

Notes

Dans un scénario de Jet Fire, l'inflammation ne se produit pas nécessairement à la sortie immédiate de la fuite. Plusieurs facteurs expliquent cette distance :

1. Vitesse élevée du jet : Le gaz sort à très haute vitesse (dans ton cas, ~720 m/s). Cela crée un jet turbulent qui pousse le mélange air-gaz plus loin avant qu'il ne soit dans une plage inflammable (entre LII et LSI).
2. Mélange air/gaz optimal décalé : Au point de fuite, le mélange est souvent trop riche pour brûler. Il faut une certaine distance pour que le gaz se dilue dans l'air jusqu'à atteindre un mélange inflammable.
3. Source d'ignition éloignée : L'inflammation ne peut avoir lieu que si une source d'allumage (électrique, mécanique, flamme, etc.) est présente à un endroit où le mélange est inflammable.
4. Température du gaz : Le gaz peut être très froid (ici, -70 °C), ce qui retarde la réaction d'allumage et allonge la distance avant la flamme.

La distance d'inflammation peut être approximée par la longueur de la flamme (Jet Fire) :

Dans Notre scénario de fuite de 100 mm :

- 1.5/F : 62,36 m
- 5/D : 67,44 m

Interprétation

- Le rayonnement thermique dépasse 100 m, ce qui signifie que toute structure non protégée dans un rayon de 100 m est à risque.
- Les équipements protégés (y compris sous pression) doivent être à plus de 72 m pour éviter des dommages.

Dispersion du gaz en cas d'une grande fuite 100mm

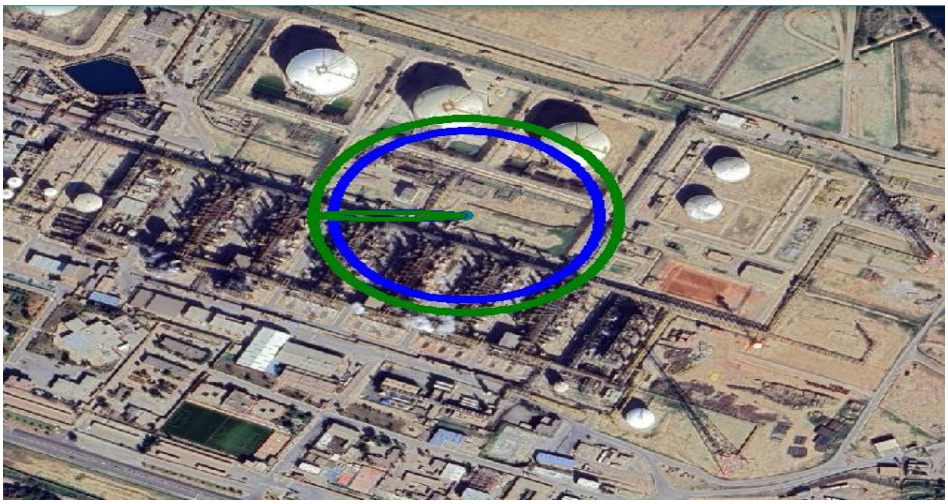


Fig. 4.6 : *Distances maximales pour dispersion du gaz en cas d'une grande fuite 100mm (1er emplacement)*

Selon l'analyse spatiale issue du module GIS intégrer à PHAST, la dispersion du nuage gazeux généré par une fuite de 100 mm peut s'étendre jusqu'à la zone du train 200. Cette propagation s'effectue dans les conditions météorologiques étudiées (1.5/F et 5/D), avec une concentration du gaz atteignant les seuils inflammables (entre LFL et UFL) sur une distance significative. Ainsi, la simple présence d'une source d'ignition dans cette zone peut déclencher une inflammation du nuage, conduisant à un phénomène de retour de flamme. Ce retour d'inflammation est susceptible de générer des dommages par effet thermique ou de surpression sur l'ensemble des équipements situés à proximité, y compris ceux qui ne sont pas directement exposés à la fuite initiale.

Explosion – effet de surpression
Résultat d'explosion

Tab. 4.11 : *Résultat PHAST - en cas surpression (1er emplacement)*

Surpression	Distance 1.5/F (m)	Distance 5/D (m)	Interprétation
0,025 bar	251,5	261,7	Effets sur l'homme (graves)
0,05 bar	195,0	209,7	Effets humains létaux
0,16 bar	155,2	173,1	Effets dominos sur installations
0,3 bar	146,6	165,2	Dommages graves aux structures

Interprétation

- Le seuil d'effet domino est dépassé jusqu'à 173 m (cas 5/D).
- Des dommages structurels sévères sont possibles jusqu'à ~165 m, impliquant un risque étendu même pour les équipements éloignés du point de fuite.

Conclusion

Analyse du scénario de grande fuite de 100 mm montre que les effets thermiques, de surpression et d'inflammation différée et peut présenter un niveau de danger supérieur dans certaines configurations représentent une menace importante pour les installations. Les rayonnements thermiques peuvent causer des dommages jusqu'à 100 m, tandis que les effets d'explosion peuvent impacter des structures jusqu'à 165 m dans les conditions météorologiques les plus dispersives (5/D). Le flash fire constitue une menace supplémentaire avec une propagation potentielle jusqu'à 150 m.

Par conséquent, tout positionnement du collecteur à moins de 170 m des bacs de stockage ou des unités de traitement serait inacceptable en termes de sécurité industrielle, sauf en présence de mesures de protection spécifiques (confinement, murs de déviation, orientation contrôlée des rejets). En conséquence, cet emplacement ne peut être retenu pour l'installation du collecteur. Il est donc nécessaire de réévaluer un second emplacement alternatif, offrant des distances de sécurité plus importantes par rapport aux unités critiques et permettant de réduire de manière significative les risques d'effets dominos

Etude du Deuxième test (2eme emplacement)

Dans ce second scénario, les enseignements tirés de l'analyse précédente ont été pris en compte. Le collecteur a été repositionné à une distance plus sécurisée, à l'écart des trains de traitement ainsi que des canalisations et de la ligne commune de GNLT. Ce choix a été motivé par des considérations de sécurité, notamment afin de limiter les risques d'effets dominos. Une attention particulière a également été portée à la protection des bacs de stockage, en veillant à ce que leur exposition potentielle aux effets thermiques ou de surpression soit significativement réduite

Interprétation du Scénario 1 – Rupture totale du collecteur

La **rupture totale du collecteur** représente le scénario accidentel le plus critique envisagé dans cette étude, bien que sa probabilité soit faible. Il permet cependant d'évaluer les **conséquences maximales** d'un événement majeur sur les installations.

Caractéristiques de la défaillance :

- **Température du rejet** : -135,8 °C
- **Vitesse du jet** : très élevée (~174,7 m/s)
- **Libération rapide de masse gazeuse**, sans fraction liquide
- Pas de valeur explicite de débit instantané, mais scénario à fort impact basé sur l'énergie totale dégagée.

Effets thermiques — Boule de feu (Fireball)

__Tab. 4.12 :__ Résultat PHAST - en cas de boule de feu (2ème emplacement)

Condition météo	Diamètre boule de feu	Distance à 8 kW/m²	Distance à 32 kW/m²	Distance à 44 kW/m²
1.5/F	72,8 m	208,8 m	104,5 m	88,2 m
5/D	72,8 m	197,8 m	99,6 m	84,0 m

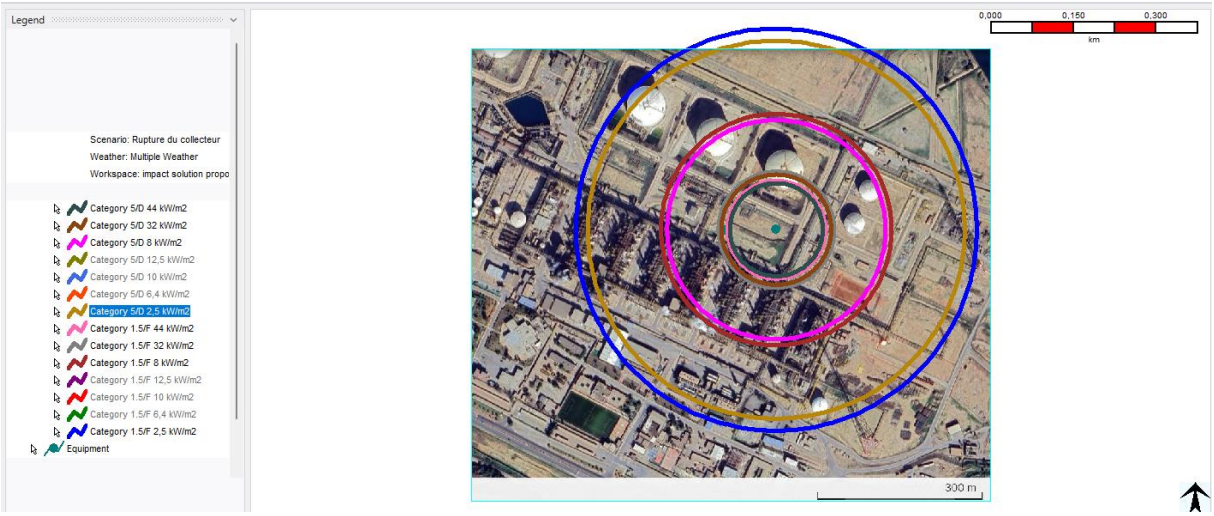


__Fig. 4.7 :__ Distances maximales en cas de boule de feu (2ème emplacement)

Interprétation

- La **boule de feu** génère des rayonnements thermiques sévères bien **au-delà de 100 m**, touchant potentiellement les unités voisines.
- Tout équipement non protégé dans ce rayon est **à risque élevé d'endommagement thermique**.
- **Selon les résultats issus du module GIS de PHAST** Toutes les installations situées à l'intérieur du cercle **rouge** foncé (correspondant au seuil de 8 kW/m² sous conditions

météorologiques 1.5/F) ainsi que du cercle **rose** (même seuil sous 5/D) sont exposées à des dommages potentiels, conformément aux seuils de dégradation des installations non protégées.

Par ailleurs, les équipements protégés opérant à pression atmosphérique ou sous pression se trouvent à risque dès lors qu'ils sont localisés à l'intérieur des cercles **beige** et **rose clair**, représentant respectivement les seuils de 32 kW/m² et 44 kW/m². L'analyse montre que, dans le cas de la rupture du collecteur, le risque de dégradation pour la majorité des installations reste limité. Toutefois, une attention particulière doit être portée à la zone du dernier bac de stockage, situé à proximité des bacs de gazoline, où certaines structures pourraient être partiellement impactées par les effets thermiques

Effets de surpression — Explosion

Rapport PHAST

La figure 4.8 illustre la variation de l'onde de surpression en fonction de la distance. L'axe des abscisses (x) représente la distance à partir du point de l'explosion, tandis que l'axe des ordonnées traduit l'intensité de la surpression. Ce graphique permet de visualiser l'atténuation progressive de l'onde avec l'éloignement, et d'identifier les zones dans lesquelles les structures pourraient subir des dommages en fonction des seuils de surpression définis.

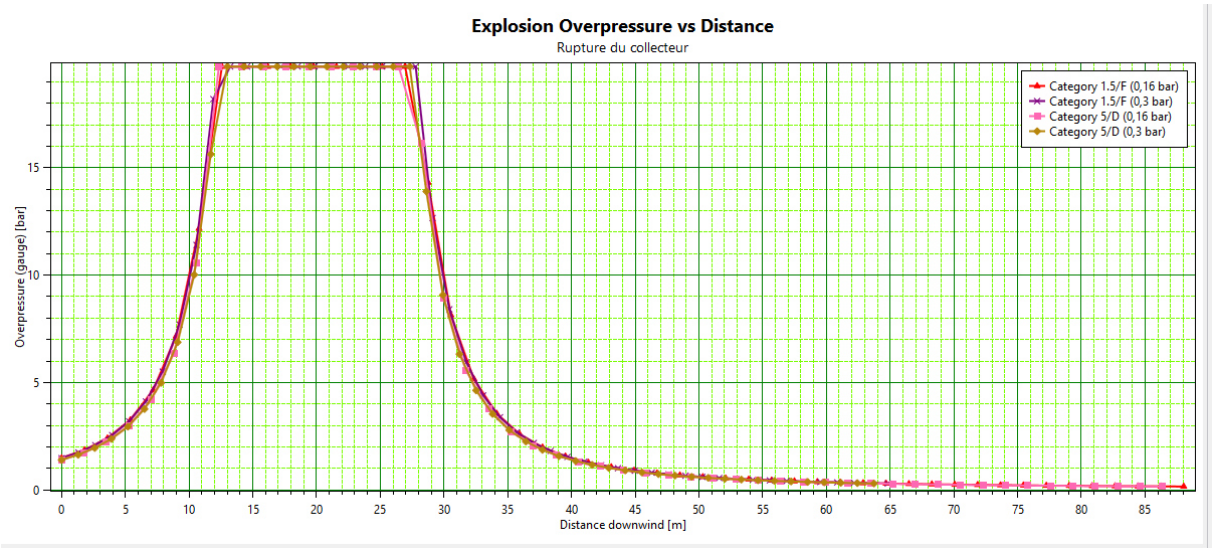


Fig. 4.8 : *Pression d'explosion en fonction de distance (2ème emplacement)*

Interprétation

- Le scénario engendre des **surpressions destructrices** jusqu'à **65 m** autour du point de rupture.
- Toute infrastructure critique (tuyauterie, racks, bacs) **à moins de 90 m** est exposée à un **risque d'endommagement majeur**.

Flash Fire — Inflammation du nuage dispersé

Tab. 4.13 : *Résultat PHAST - en cas d'inflammation du nuage dispersé (flash fire) (2ème emplacement)*

Condition	Distance LFL	Max Flash Fire Distance
1.5/F	18,97 m	24,65 m
5/D	20,16 m	28,95 m

Interprétation

- Le **nuage gazeux reste inflammable** sur une distance de **25 à 30 m**.
- Si une source d'ignition est présente dans cette zone, un **flash Fire peut apparaître**, générant des flammes soudaines.

Deuxième scénario: grande fuite de 100 mm

Ce scénario représente une situation réaliste dans un environnement industriel, notamment en phase de démarrage, de maintenance ou lors d'une défaillance partielle d'un collecteur. Bien que moins énergétique qu'une rupture totale, il présente des risques majeurs à cause de la durée du rejet, de la dispersion étendue du gaz et de la possibilité d'inflammation différée.

Caractéristiques de la fuite

Tab. 4.14 : *Résultat PHAST - en cas de grande fuite (2éme emplacement)*

Paramètre	Valeur
Débit de fuite	54,27 kg/s
Température du gaz	-70,65 °C
Vitesse d'éjection	718,31 m/s
Durée du rejet	36,51 secondes

Il s'agit d'un rejet rapide à très haute pression, avec un potentiel d'inflammation important

Effets thermiques — Jet Fire

Tab. 4.15 : *Résultat PHAST - en cas de jet enflammée (jet fire) (2ème emplacement)*

Météo	Longueur de flamme	8 kW/m² (dommages non protégés)	32 kW/m²	44 kW/m²
1.5/F	62,43 m	99,68 m	73,58 m	67,98 m
5/D	67,52 m	100,46 m	77,42 m	71,94 m

En prenant en compte les deux directions de vent caractéristiques de la zone de Bethioua - le sud-ouest et le nord-est, L'analyse spatiale à l'aide du module GIS de PHAST révèle des variations notables dans l'orientation et l'étendue des effets. La direction du vent influence directement la dispersion des gaz, l'étalement des zones de danger thermique et les zones d'impact potentiel en cas d'inflammation ou d'explosion. Les résultats obtenus permettent ainsi de visualiser précisément les zones critiques en fonction de ces conditions météorologiques dominantes.

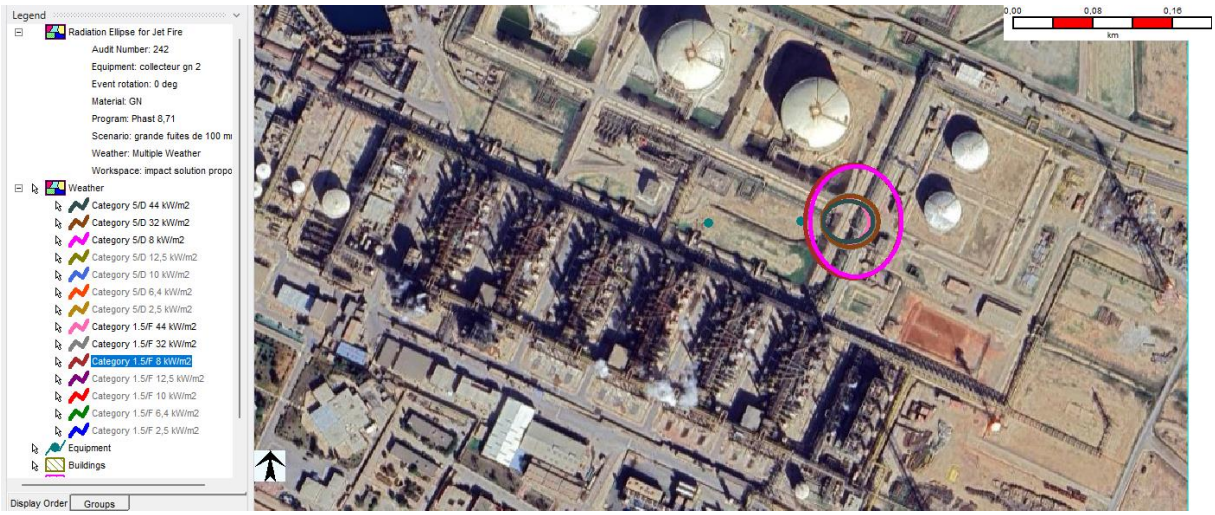


Fig. 4.9 : *Distances maximales en cas de jet enflammée (jet fire) (2ème emplacement)(north-est)*

Cas de vent inverse

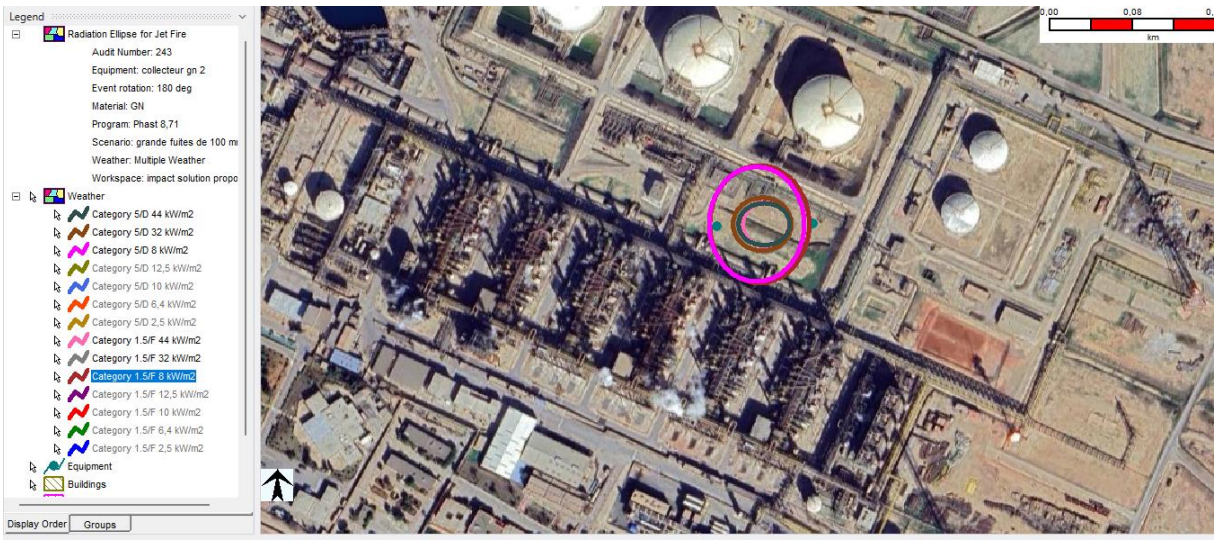


Fig. 4.10 : Distances maximales en cas de jet enflammée (jet fire) (2ème emplacement) (sud-west)

Interprétation :

- Les effets thermiques sont importants, avec une portée de danger supérieure à 100 m pour les équipements non protégés.
- Même les équipements sous pression protégés peuvent être endommagés jusqu'à ~72 m.
- Cependant, il est important de souligner qu'en tenant compte des deux directions dominantes du vent dans la zone de Bethioua (sud-ouest et nord-est), les résultats du module GIS de PHAST indiquent clairement que ni les trains de traitement, ni la fosse des pompes, ni les bacs de stockage ne sont exposés à un risque significatif en cas de fuite de 100 mm au niveau du collecteur. Les zones d'impact, qu'il s'agisse de rayonnement thermique, de surpression ou de dispersion inflammable, restent contenues dans un périmètre qui n'atteint pas ces installations critiques, et ce, quelle que soit l'orientation du vent. Cette observation confirme la pertinence de l'emplacement du collecteur envisagé dans ce deuxième scénario du point de vue de la sécurité des équipements stratégiques

Effets de surpression — Explosion

Pour les effets d'explosion liés à une très grande fuite de 100 m, l'explosion va être éloignée du collecteur puis elle fait le retour pour ce collecteur donc c'est le pire cas on peut voir c'est cas dans le GIS :

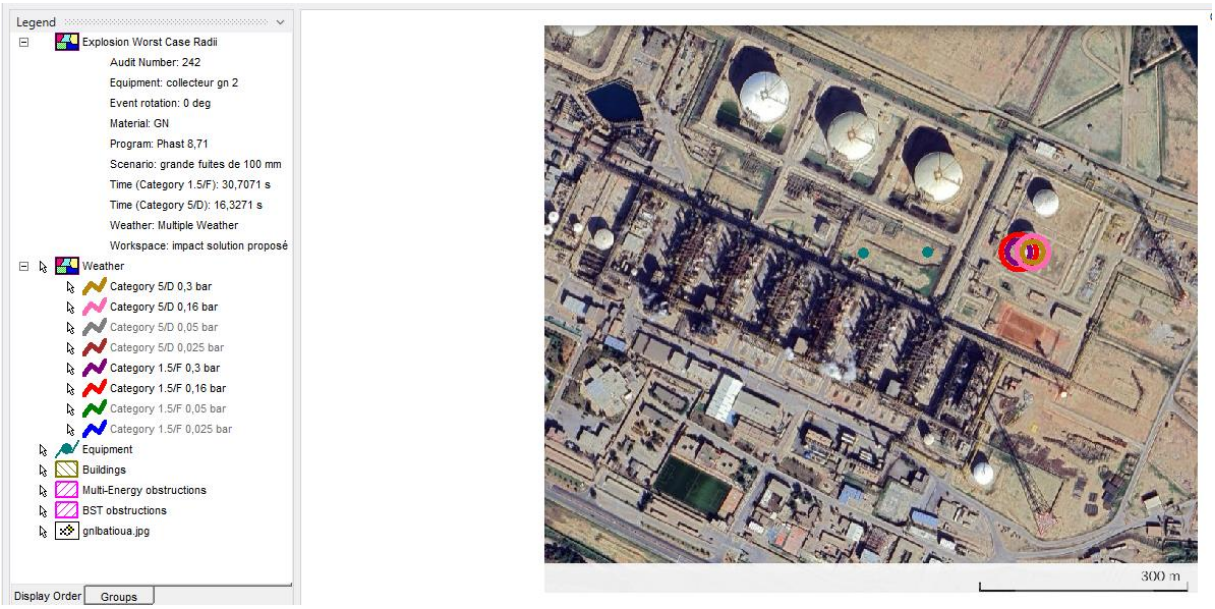


Fig. 4.11 : Distances maximales en cas de surpression (2ème emplacement)(north-est)

Cas du vent inverse

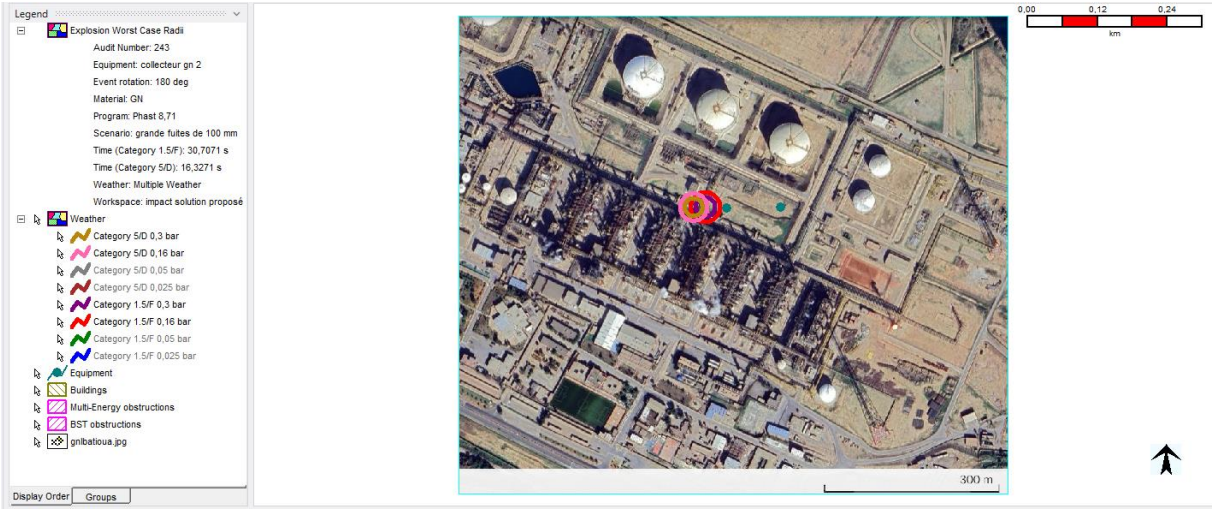


Fig. 4.12 : Distances maximales en cas de surpression (2ème emplacement) (sud-west)

Interprétation

- Le scénario entraîne des dommages structurels critiques jusqu'à 165 m du point de fuite.
- La portée des effets de surpression est plus étendue que celle d'une rupture totale, ce qui est remarquable.
- Il est important de noter que, même dans le pire des cas simulés, les trains de traitement demeurent hors des zones critiques définies par les seuils de surpression et de rayonnement thermique. Toutefois, la ligne commune de GNLT reste partiellement

exposée à certains effets, notamment en cas de fuite importante ou de rupture. Cette situation justifie la mise en place de mesures de protection complémentaires afin de réduire les risques résiduels. Il est notamment recommandé de :

- Réaliser une étude de dispersion de gaz ciblée, permettant de définir avec précision les emplacements optimaux pour l'installation de détecteurs de gaz inflammables
- Installer un système de coupure d'urgence (Emergency Shut Down Valve - ESDV) afin d'isoler rapidement la ligne en cas de détection d'une fuite ;
- Mettre en œuvre des protections passives (parois résistantes au feu, revêtements isolants, barrières physiques) dans les zones exposées, dans le but de réduire l'impact des effets thermiques (rayonnement) sur les équipements à proximité.

Ces mesures visent à renforcer la résilience de l'installation et à garantir un niveau de sécurité acceptable pour l'ensemble des unités opérationnelles connectées au collecteur

Remarques et observations

- La dispersion est plus étendue qu'en cas de rupture totale, en particulier dans des conditions 5/D.
- Les effets de surpression sont significatifs, dépassant parfois ceux du scénario de rupture totale.
- Le jet fire est très dangereux pour les structures non protégées situées à moins de 100 m.
- Le flash fire constitue un risque critique, car il peut impacter des zones éloignées du point de fuite, en particulier si des sources d'ignition sont présentes.

IV.5 Conclusion

L'analyse comparative des deux emplacements proposés pour l'implantation du collecteur met en évidence une nette supériorité du deuxième emplacement en matière de sécurité globale. En effet, le premier emplacement présente un risque important pour les trains de liquéfaction, notamment en cas de grande fuite ou de rupture totale du collecteur. Ces unités comportent plusieurs composants sensibles, souvent faiblement protégés, et peuvent donc subir des dommages critiques en cas d'effet thermique ou de surpression.

À l'inverse, le deuxième emplacement, plus éloigné des trains, permet de préserver ces équipements majeurs, même dans les scénarios accidentels les plus sévères. Toutefois, ce positionnement expose partiellement la ligne commune de sortie des trains, qui pourrait être

impactée en cas de propagation des effets. Il est donc recommandé de mettre en œuvre des mesures de protection spécifiques pour cette ligne (barrières physiques, vanne ESD, revêtement résistant à la chaleur).

Par ailleurs, bien que le risque sur les bacs de stockage ne soit pas totalement nul, celui-ci reste faible en raison des dispositifs de sécurité déjà en place (systèmes de protection passive, instrumentation, sécurité incendie), ce qui réduit considérablement le niveau de criticité.

En conclusion, le deuxième emplacement offre un compromis optimal entre sécurité, faisabilité technique et intégration opérationnelle. Les bénéfices en termes de réduction de torchage justifient pleinement les investissements nécessaires à la mise en œuvre de cette solution, en particulier dans une perspective de long terme et de fiabilité d'exploitation.

Conclusion générale

Dans un contexte marqué par des exigences croissantes en matière de performance énergétique, de sécurité industrielle et de réduction des émissions polluantes, le présent mémoire a permis d'apporter une contribution concrète à la problématique du torchage des gaz au sein du complexe GL2/z de Sonatrach.

Deux solutions techniques ont été étudiées pour limiter ou valoriser les gaz torchés, principalement lors des phases critiques d'exploitation telles que l'indisponibilité de la section de fractionnement ou le démarrage des trains de liquéfaction

La première solution, consistant à interconnecter les ballons tampons des trains via une ligne commune, permet de rediriger le GNT non fractionné vers un train en fonctionnement. Cette solution s'est révélée techniquement réalisable et économiquement rentable, bien que son impact sur la réduction globale du torchage reste modeste.

La deuxième solution, fondée sur l'implantation d'un collecteur central, vise à récupérer les gaz instables lors des démarrages et à les envoyer vers un autre train opérationnel. Les simulations PHAST ont permis de valider la faisabilité de cette implantation sur les plans sécuritaire et opérationnel, tout en respectant les seuils d'effets thermiques et de surpression.

Ces travaux s'inscrivent dans les orientations stratégiques de Sonatrach, qui vise le zéro torchage de routine à l'horizon 2030, en conformité avec le décret exécutif n°21-330 du 25 août 2021. Ils démontrent qu'avec des solutions adaptées, il est possible de transformer une contrainte environnementale en levier de performance industrielle.

Enfin, ces propositions pourraient être enrichies par des perspectives, notamment l'automatisation du système de récupération, l'intégration d'indicateurs de performance HSE, faire une étude de danger inverse sur le collecteur proposé ou encore l'élargissement de ces solutions à d'autres sites industriels similaires.

Bibliographie

[1] Géry Lecerf, « Réserves gazières mondiales ». Consulté le: 19 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.connaissancedesenergies.org/

[2] Kazi Tani Wahil, « Evaluation des risques liés à la dispersion d'un nuage de gaz en cas de défaillance de la torche basse pression au niveau de complexe GL2-Z », IAP, bethioua, avr. 2025.

[3] Brian McClendon, « Situation géographique du complexe GL2-Z ». Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://earth.google.com/

[4] « Banque mondiale. (2024). Global Gas Flaring Tracker Report 2024) ». Consulté le: 13 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: http

[5] SONATRACH, « Manuel opératoire Torches et brulot ». mars 1979.

[6] ADEME, « Torchage et dégazage dans les installations industrielles », 2017.

[7] « Bilan Matière des Solutions de GL2Z. »

[8] TECHNOEDIF ENGENHARIA, « ÉTUDE DE RÉCUPÉRATION TOTALE DES GAZ TORCHÉS AU NIVEAU DES COMPLEXES GNL », bethioua, 2647, 2023.

[9] SONATRACH, « Evaluation Economique des Solutions de GL2Z. » 2647.GL2Z-CN-0023-002, 2023.

[10] « IEC 61882 (2001). Hazard and Operability Studies (HAZOP) – Application Guide. International Electrotechnical Commission. »

[11] « SEUILS DE REFERENCE POUR LES EFFETS THERMIQUES et DE SURPRESSION ». 19 décembre 2004. Consulté le: 3 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://aida.ineris.fr/reglementation/arrete-221004-relatif-valeurs-reference-seuils-deffets-phenomenes-accidentels#:~:text=Valeurs%20de%20r%C3%A9f%C3%A9rence%20relatives%20aux%20seuils%20d'effets%20de%20surpression,une%20surpression%20de%2050%20mbar.

[12] « météo bethioua ». Consulté le: 28 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.meteoblue.com/fr/meteo/semaine/bettioua_alg%c3%a9rie_2503998