

Département
Maîtrise des Risques Industriels et
Environnementaux Filière : QHSE-GRI

*Mémoire de Projet de Fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en
QHSE-GRI*

**Maîtrise des risques liés aux gaz de microtechnologie :
Conception d'un référentiel de stockage, Création d'une
plateforme d'audit en ligne "AUDITORIUM" et optimisation
du changement de bouteilles via l'application SafeGaz 1.0**

Réalisé par : Lina Chabha SIAMER & Chahrazed TALBI

Sous la direction de :

Mme. S. BENTTAALLA- KACED
M. M. SENOUCI-BEREKSI
Mme. L. MENASRI

Maitre de conférences B à l'ENP
Maitre de conférences B à l'ENP
Responsable HSE de la PTM au CDTA

Présenté et soutenu publiquement le 22-06-2025, devant le jury composé de :

M M. BOUBAKEUR	Président	Maitre de conférences A à l'ENP
Mme. S. BENTTAALLA- KACED	Encadrante	Maitre de conférences B à l'ENP
M. M. SENOUCI-BEREKSI	Encadrant	Maitre de conférences B à l'ENP
M M. BOUSBAI	Examineur	Maitre de conférences A à l'ENP
M A. BENMOKHTAR	Examineur	Maître de conférences A à l'ENP

Département
Maîtrise des Risques Industriels et
Environnementaux Filière : QHSE-GRI

*Mémoire de Projet de Fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en
QHSE-GRI*

**Maîtrise des risques liés aux gaz de microtechnologie :
Conception d'un référentiel de stockage, Création d'une
plateforme d'audit en ligne "AUDITORIUM" et optimisation
du changement de bouteilles via l'application SafeGaz 1.0**

Réalisé par : Lina Chabha SIAMER & Chahrazed TALBI

Sous la direction de :

Mme. S. BENTTAALLA- KACED
M. M. SENOUCI-BEREKSI
Mme. L. MENASRI

Maitre de conférences B à l'ENP
Maitre de conférences B à l'ENP
Responsable HSE de la PTM au CDTA

Présenté et soutenu publiquement le 22-06-2025, devant le jury composé de :

M M. BOUBAKEUR	Président	Maitre de conférences A à l'ENP
Mme. S. BENTTAALLA- KACED	Encadrante	Maitre de conférences B à l'ENP
M. M. SENOUCI-BEREKSI	Encadrant	Maitre de conférences B à l'ENP
M M. BOUSBAI	Examineur	Maitre de conférences A à l'ENP
M A. BENMOKHTAR	Examineur	Maître de conférences A à l'ENP

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner toute notre gratitude.

En premier lieu, nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à Mme. Souad BENTAALLA et M. Malik SENOUCI-BEREKSI, pour avoir accepté de nous encadrer et de nous guider dans la rédaction de ce mémoire. Leur soutien, compétences et clairvoyance nous ont été d'une aide inestimable.

En second lieu, nous remercions Madame MENASRI responsable HSE de la plateforme microtechnologiques du CDTA, notre maître de stage, pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de son expertise au quotidien. Nous remercions également Monsieur MEKHALDI et Monsieur BOULALOUA pour leurs conseils et leur esprit d'équipe, qui nous ont beaucoup aidé lors de notre pratique. Nous tenons aussi à remercier Madame KEDARI pour son soutien, ses conseils et son aide précieuse.

Enfin, nous tenons à remercier les membres du Jury, Monsieur Amin Benmokhtar, Monsieur M'hamed Bousbai et Monsieur Mohamed Boubakeur pour leur présence, leurs enseignements et leurs professionnalismes ainsi que pour leur lecture attentive du mémoire et pour les remarques qu'ils nous adresseront lors de notre soutenance afin d'améliorer notre travail.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail en témoignage de respect, de reconnaissance et de
profonde gratitude*

*À ma chère mère, dont l'amour m'enveloppe, la bienveillance m'éclaire et la
présence constante a toujours été une source inépuisable de force et de
motivation face aux épreuves.*

*À mon cher père, ce travail incarne l'aboutissement du soutien indéfectible et
des encouragements que tu m'as toujours offert tout au long de mon parcours
scolaire.*

*À mes chères sœurs, qui ont partagé avec moi chaque instant d'émotion durant
cette aventure, et dont le soutien affectueux m'a été précieux du début à la fin.*

*À tous mes amis, et plus particulièrement à Amine, Mouna, Imene, Lotfi, ainsi
qu'à ma chère binôme Lina, pour leur présence, leur confiance et leurs
encouragements constants.*

Chahrazed TALBI

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui ont, d'une manière ou d'une autre, marqué mon chemin et rendu ce parcours plus riche, plus humain et plus beau.

À mes parents, avec une infinie gratitude, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leur soutien sans faille. Leur présence à mes côtés a été ma force et mon repère à chaque étape.

À mon frère et ma sœur, pour leur affection et présence fidèle, qui m'ont portée dans les moments de doute comme dans les instants de joie.

À mes tantes et mes oncles, pour leur gentillesse, leur générosité et leurs encouragements, qui m'ont toujours accompagnée avec bienveillance.

À mes chers amis, qui se reconnaîtront, et tout particulièrement à ma précieuse binôme, pour leur écoute, leur complicité et leur présence à chaque étape de cette aventure humaine inoubliable.

Lina Chabha SIAMER

الملخص

يتناول مشروع نهاية الدراسة هذا تحسين إدارة الغازات الصناعية في الغرفة البيضاء على مستوى مركز تطوير التكنولوجيات المتقدمة (CDTA)، مع التركيز على التخزين الهوائي وإجراءات تغيير القارورات. ومن خلال أدوات تحليل المخاطر (EvRP)، (M5)، (AMDEC)، تم تحديد الأعطال الحالية وترتيبها حسب الأولوية، مما أدى إلى مقارنة متعددة المعايير للحلول التقنية المقترحة. يندرج هذا العمل أيضًا ضمن مسعى للابتكار من خلال إنشاء الموقع الإلكتروني **AUDITORIUM** المخصص للتدقيق والتكوين، وتطوير التطبيق **SafeGaz 1.0** لتتبع عمليات تغيير الغازات وضمان أمانها. كما تم إعداد مرجعية تنظيمية تأخذ بعين الاعتبار متطلبات المعايير الدولية مثل ISO و SGH و INRS، إلى جانب التشريعات الجزائرية.

الكلمات المفتاحية : AHP ، ISO 11625 ، ISO 14644 ، SGH ، INRS ED6369 ، EvRP ، AMDEC ، إيشيكوا.

Abstract

This final year project focuses on improving the management of industrial gases in the cleanroom of the CDTA, with particular emphasis on aerial storage and gas cylinder change procedures. Using risk analysis tools (EvRP, 5M, FMEA), current malfunctions were identified and prioritized, leading to a multicriteria comparison of technical solutions. The project also integrates an innovation dimension through the creation of the **AUDITORIUM** website, dedicated to audits and training, as well as the development of the **SafeGaz 1.0** application to secure and trace gas change operations. A regulatory reference framework was also established, incorporating ISO, GHS, INRS standards, and Algerian legislation.

Keywords: AHP, ISO 11625:2007, ISO 14644, GHS, INRS ED6369, EvRP, FMECA, Ishikawa,

Résumé

Ce projet de fin d'étude porte sur l'amélioration de la gestion des gaz industriels en salle blanche au CDTA, en se concentrant sur le stockage aérien et les procédures de changement de bouteilles. À travers des outils d'analyse des risques (EvRP, 5M, AMDEC), les dysfonctionnements actuels ont été identifiés et hiérarchisés, menant à une comparaison multicritère des solutions techniques. Ce travail s'inscrit également dans une démarche d'innovation par la création du site web **AUDITORIUM**, dédié à l'audit et à la formation, ainsi que le développement de l'application **SafeGaz 1.0**, pour tracer et sécuriser les changements de gaz. Un référentiel réglementaire a enfin été élaboré, intégrant les exigences des normes ISO, SGH, INRS et la réglementation algérienne.

Mots clés : AHP, ISO 11625, ISO 14644, SGH, INRS ED6369, EvRP, AMDEC, Ishikawa.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction Générale	11
1 Contexte général de l'étude et méthodologie suivie	13
1.1 Introduction :	14
1.2 Présentation du centre de Développement Des Technologies Avancées :	14
1.3 Présentation de la salle blanche :	15
1.4 Description des process de fabrication en salle blanche :	16
1.5 Méthodologie :	18
1.6 Conclusion :	20
2 Analyse des risques liés aux gaz industriel : Application de l'EVRP & AMDEC	21
2.1 Introduction :	22
2.2 Etat des lieux du stockage et la gestion des gaz :	22
2.2.1 Organisation du stockage des gaz :	22
2.2.2 Caractéristiques des gaz stockés :	23
2.2.3 Fréquence et conditions de remplacement des bouteilles de gaz :	24
2.2.4 Mesures de sécurité existantes :	24
2.3 Identification des causes des dysfonctionnement :	25
2.3.1 Identification et hiérarchisation des causes :	25
2.3.2 Construction des diagrammes :	31
2.3.3 Audit qualité fournisseurs :	41
2.3.4 Résultats de l'audit :	41
2.4 Evaluation des risques :	42
2.4.1 Méthodologie utilisée :	42
2.4.2 Résultats et points critiques :	44
2.5 Analyse des risques du processus de changement de bouteilles de gaz à l'aide de la méthode AMDEC :	47
2.5.1 Méthodologie suivie :	48
2.5.2 Résultats de l'analyse :	49
2.6 Conclusion.....	50
3 Proposition de Solution Techniques & Organisationnelles	51
3.1 Introduction :	52
3.2 Proposition de solutions aux problèmes du CDTA :	52
3.2.1 Stockage souterrain :	52

3.2.2 Stockage aérien :	52
3.2.3 Application :	52
3.3 Etude et présentation des solutions :	53
3.3.1 contexte et objectifs :	53
3.3.1.1 Description de la méthode AHP :	54
3.3.1.2 Choix des critères :	55
3.3.1.3 Mise en place de la méthode AHP :	56
3.3.2 Référentiel technique pour la mise en place du stockage aérien :	62
Synthèse du référentiel HSE pour le stockage aérien des gaz sous pression et produits dangereux au CDTA :	62
3.3.2.1 Cadre réglementaire, normatif et objectif général	63
3.3.2.2 Classification et typologie des gaz (fondement du zonage)	63
3.3.2.3 Organisation physique du stockage aérien	64
3.3.2.4 Intégration environnementale	64
3.3.2.5 Raccordement et sécurité du réseau de distribution	64
3.3.2.6 Mesures de protection, de prévention et de suivi	65
3.3.3 Mise en place d'un outil numérique et supervision pour le changement de gaz :	66
3.3.3.1 Objectif de l'application :	66
3.3.3.2 Fonctionnalités de l'application :	67
3.3.3.3 Surveillance vidéo des zones sensibles :	68
3.4 Conclusion	69
4 Développement d'une plateforme numérique d'audit	71
4.1 Introduction :	72
4.2 Origine de l'idée et problématique constatée :	72
4.3 Présentation du site web :	73
4.4 Fonctionnalités principales du site :	74
4.4.1 Page d'accueil :	74
4.4.2 Interface utilisateur post-connexion :	75
4.5 Analyse stratégique et modèle économique :	78
4.5.1 Hypothèse de coût de réalisation du site	79
4.6 Cas d'étude : simulation d'un audit de stockage :	82
4.7 Conclusion :	83
Conclusion Générale	84
Bibliographie	86
Annexes	89

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Tableau récapitulatif des procédés en salle blanche et des substances associées	16
Tableau 1.2 : Correspondance entre les classes de propreté des salles blanches et la concentration de particules	18
Tableau 2.1 : Inventaire des bouteilles de gaz	23
Tableau 2.2 : Echelle de fréquence (F)	26
Tableau 2.3 : Echelle de gravité (G)	26
Tableau 2.4 : Echelle de Maîtrise (M).....	26
Tableau 2.5 : Interprétation de la criticité.....	26
Tableau 2.6 : Hiérarchisation des causes.....	27
Tableau 2.7 : classification des causes selon les cinq familles	29
Tableau 2.8 : Echelle du niveau de gravité de l'EVRP	42
Tableau 2.9 : Echelle du niveau d'occurrence (probabilité) de l'EVRP	43
Tableau 2.10 : matrice de criticité de l'EVRP	43
Tableau 2.11 : Echantillon de l'EVRP appliqué à la salle blanche	45
Tableau 2.12 : Echantillon de l'EVRP appliqué au stockage des gaz.....	47
Tableau 2.13 : Echantillon de l'EVRP appliqué au changement de bouteilles de gaz	47
Tableau 2.14 : Echelle du niveau de gravité des effets	48
Tableau 2.15 : Echelle du niveau de fréquence des effets.....	48
Tableau 2.16 : Echelle du niveau de capacité de détection de la défaillance	48
Tableau 2.17 : Echelle du niveau de criticité.....	49
Tableau 2.18 : Echantillon de l'AMDEC machine	49
Tableau 3.1 : Matrice de comparaison et calcul de son vecteur.....	54
Tableau 3.2 : Calcul des poids de chaque critère	58
Tableau 3.3 : Somme des colonnes de la matrice	59
Tableau 3.4 : Choix de la solution	60
Tableau 3.5 : Justification des note attribuées aux critères.....	61
Tableau 4.1 : Analyse SWOT Algérie.....	72
Tableau 4.2 : Analyse SWOT Internationale	73
Tableau 4.3 : Répartitions des montants et des postes de travail	79
Tableau 4.4 : Projection financière sur 3 ans.....	79
Tableau 4.5 : Business Model Canvas de la start up AUDITORIUM	81

Liste des figures

Figure 1.1 : Position géographique du CDTA.....	14
Figure 1.2 : Schématisation de la salle blanche du CDTA.....	15
Figure 1.3 : organigramme de la méthodologie suivie.....	19
Figure 2.1 : Chambres de stockage des bouteilles de gaz	23
Figure 2.2 : diagramme Ishikawa de la procédure de changement de bouteille non structurée / compliquée	32
Figure 2.3 : diagramme Ishikawa de l'absence d'évaluation du processus.....	34
Figure 2.4 : diagramme Ishikawa des conditions de stockage inadéquates.....	36
Figure 2.5 : diagramme Ishikawa du fournisseur de bouteilles de gaz	38
Figure 2.6 : Etapes de préparation avant l'entrée en salle blanche	46
Figure 3.1 : Etat actuel du stockage des bouteilles de gaz	53
Figure 3.2 : Organigramme des critères et solutions.....	57
Figure 3.3 : Interface de l'application Safegaz 1.0	67
Figure 3.4 : Caméras ATEX	69
Figure 4.1 : page d'accueil du site AUDITORIUM	75
Figure 4.2 : Tableau de bord personnalisé	75
Figure 4.3 : Fenêtre listes des checklists d'audit	76
Figure 4.4 : Exemple de checklist.....	76
Figure 4.5 : Guide pratique de l'audit.....	77
Figure 4.6 : Formulaire demande d'audit.....	77
Figure 4.7 : Glossaire des termes techniques	78
Figure 4.8 : Projection financière d'AUDITORIUM sur 3 ans.....	80
Figure 4.9 : réalisation de l'audit a travers le site AUDITORIUM.....	82
Figure 4.10 : fin de procédure de l'audit.....	82
Figure 4.11 : PV de l'audit	83

Liste des abréviations :

EVRP : Evaluation des Risques Professionnels

AMDEC : Analyse des Mode de Défaillances, leurs Effets et leurs Criticités

AHP : Analytic Hierarchy Process

ISO : International Organization for Standardization

CDTA : Centre de Développement des Technologies Avancées

NFPA : National Fire Protection Association

PTM : Plateforme de Microtechnologie

ATEX : Atmosphère Explosive

EPI : Equipements de Protection Individuelle

PII : Plan Interne d'Intervention

PPI : Plan Particulier d'Intervention

SWOT : Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats

Introduction Générale

Les environnements propres et contrôlés ont vu le jour dans le domaine médical, sous l'impulsion de pionniers comme Louis Pasteur et Joseph Lister, ils ont mis en évidence l'importance de limiter la contamination pour garantir des conditions d'hygiène optimales. Les pratiques introduites par Lister, telles que la stérilisation des instruments et la désinfection de l'air, ont jeté les bases du concept moderne de salle blanche [1]. Ce modèle s'est progressivement imposé dans de nombreux secteurs industriels (microélectronique, aérospatial, chimie fine) où le contrôle de la contamination est essentiel pour assurer la qualité, la sécurité et la fiabilité des produits.

Si les salles blanches sont aujourd'hui bien implantées dans les pays industrialisés, leur développement connaît également un essor croissant en Afrique, porté par les besoins en électronique, en pharmacie et en technologies avancées. L'Algérie, en particulier, s'est engagée dans cette dynamique à travers la mise en place d'infrastructures stratégiques de haute technologie.

Parmi ces réalisations, la plateforme technologique de microfabrication du CDTA se distingue comme une initiative pionnière : il s'agit de la seule salle blanche dédiée à la microtechnologie en Afrique. Ce positionnement unique place le CDTA au cœur de l'innovation technologique sur le continent africain, et souligne l'importance de maîtriser les environnements ultra-contrôlés et les risques associés à l'usage de substances chimiques et gazeuses, dans un contexte où les exigences en matière de qualité, sécurité et conformité sont particulièrement élevées.

L'utilisation de gaz comme le silane (SiH_4), l'ammoniac (NH_3), le chlore (Cl_2) ou le fluor (F_2) en salle blanche nécessite un contrôle rigoureux pour optimiser une sécurité maximum et sans failles. Inflammables, toxiques ou corrosifs, ces gaz exigent des conditions de stockage et de manipulation particulièrement strictes, en raison de la sensibilité des procédés technologiques et de la nécessité de protéger les opérateurs. Une fuite ou une erreur peut entraîner des conséquences graves, tant sur le plan humain que matériel. A l'international, les accidents ne sont pas rares ; en 2019 au Texas, une fuite de gaz a provoqué une explosion ayant causé 3 morts et plus de 20 blessés [2]. Ces chiffres rappellent l'importance d'une gestion minutieuse et préventive des risques liés aux gaz dans les environnements contrôlés.

L'utilisation de gaz microtechnologiques (toxiques, inflammables, corrosifs ou explosifs) dans les procédés effectués au niveau de la salle blanche du CDTA, constitue une phase critique en matière de sécurité, de conformité réglementaire et de continuité des procédés. Le stockage actuel des bouteilles de gaz en sous-sol, associé à un processus de changement manuel et peu tracé, présente plusieurs vulnérabilités.

Face à ces constats, la problématique centrale posée par ce travail est la suivante :

- Comment sécuriser le stockage des gaz de microtechnologie utilisés en salle blanche face aux risques identifiés au CDTA ?
- De quelle manière peut-on optimiser le processus de changement des bouteilles de gaz pour réduire les erreurs et les incidents ?
- Quels outils numériques peuvent être intégrés pour assurer la traçabilité, la supervision des opérations et faciliter l'audit réglementaire ?

Ce travail est structuré en quatre chapitres. Le premier présente le CDTA, la salle blanche et le cadre méthodologique. Le second est consacré à l'analyse des risques liés aux gaz, à travers une EVRP et des AMDEC. Le troisième propose des solutions techniques et numériques, validées par une méthode multicritère. Enfin, le quatrième chapitre valorise le projet à travers le développement d'une startup et d'un site web dédié aux audits en environnements contrôlés.

Chapitre 1

Contexte Générale de l'Etude & Méthodologie suivie

1.1 Introduction :

Ce chapitre constitue un ensemble d'outils méthodologiques essentiels à la conduite de notre étude. Il débute par une mise en contexte générale, en abordant d'abord une présentation du Centre de Développement Technologique Avancé (CDTA), de la salle blanche désignée par le personnel du CDTA comme la « Plateforme Technologique », les procédés microtechnologiques mis en œuvre au sein de cette salle pour la production, et pour finir, nous présenterons la méthodologie adoptée pour l'analyse des risques associés à la manipulation des gaz toxiques.

1.2 Présentation du centre de Développement Des Technologies Avancées :

Le Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA) situé à Baba Hassen (Figure 1.1), est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST) créé initialement en 1982, dont la mission principale est de mener des actions de recherche scientifique, d'innovation technologique, de valorisation des résultats et de formation dans divers domaines stratégiques. Ces domaines incluent notamment les sciences et technologies de l'information, les technologies industrielles et la robotique, les procédés de dépôt et de traitement des matériaux, ainsi que les applications des technologies laser. En 2012, son rôle s'est renforcé avec la création, par décret exécutif n° 12-316, du Centre de Recherche en Technologie des Semi-conducteurs pour l'Énergétique (CRTSE). À ce titre, le CDTA constitue un pôle de référence pour l'appropriation, la maîtrise et la diffusion des technologies avancées en Algérie et sur le continent africain [3].



Figure 1.1 : Position géographique du CDTA [4].

L'établissement du CDTA (Figure 1.1) est situé à l'entrée de la commune de Baba Hassen. Il est délimité au nord par la commune d'El Achour, à l'est par Saoula, au sud par Douera et Khraicia, et à l'ouest par la commune de Douera.

1.3 Présentation de la salle blanche :

Une salle blanche est un environnement contrôlé conçu de manière à limiter la concentration de particules en suspension dans l'air, tout en réduisant au maximum l'introduction, la génération et l'accumulation de ces particules à l'intérieur. Elle est également conçue pour assurer le contrôle rigoureux d'autres paramètres environnementaux essentiels tels que la température, l'humidité et la pression, en fonction des exigences spécifiques des procédés qui y sont réalisés [3].

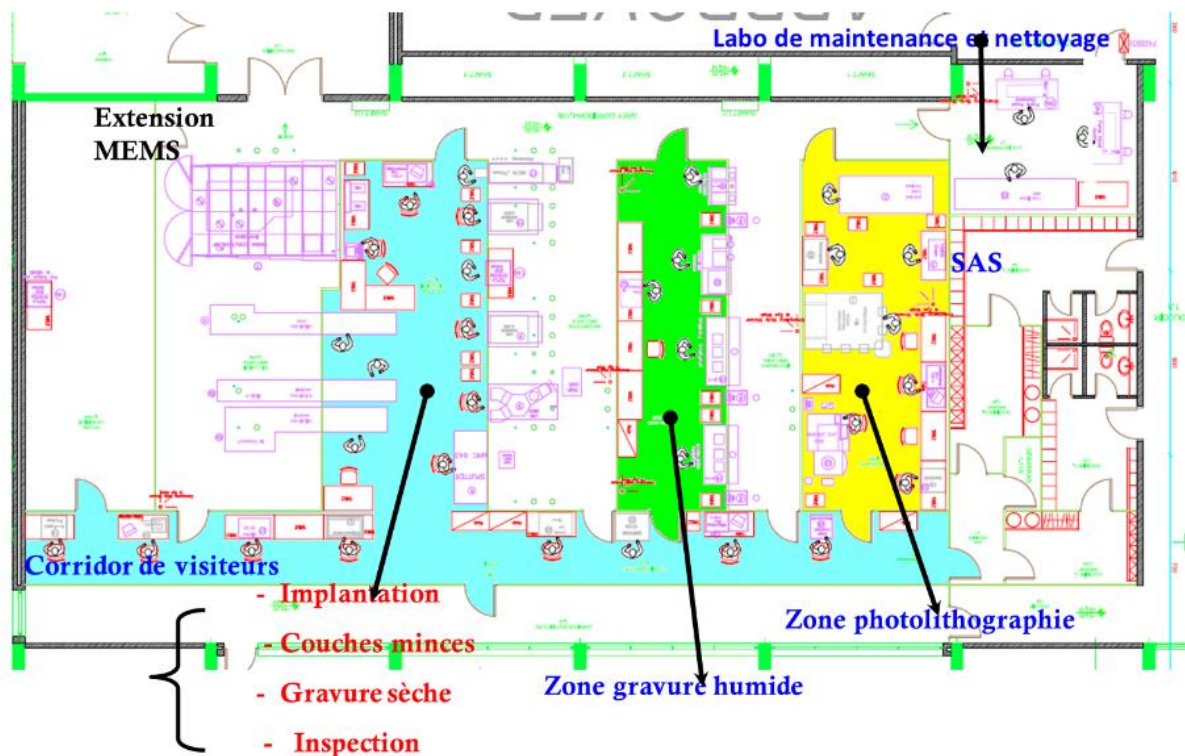


Figure 1.2 : Schématisation de la salle blanche du CDTA [7]

La plateforme technologique (Figure 1.2) d'une superficie de 470 m², est le cadre de fabrication de prototypes, d'expérimentation, de démonstration, de recherche appliquée, d'assistance technique et de conseil au profit des entreprises économiques. Elle a pour mission la mutualisation des moyens communs en matière de compétence et d'équipement des établissements d'enseignement supérieur et de recherche scientifique, des agences de recherche

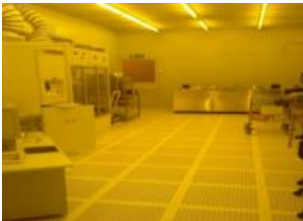
et des entreprises économiques. En outre, elle offre un accès à l'utilisation des équipements pour la fabrication et l'analyse, ainsi que des services de formation du personnel et un soutien scientifique dans la réalisation de « visions nano-microélectronique » [7].

1.4 Description des process de fabrication en salle blanche :

La fabrication de dispositifs microtechnologiques au sein de la salle blanche suit une série d'étapes strictement contrôlées (Tableau 1.1), chacune jouant un rôle déterminant dans l'obtention de structures à l'échelle micrométrique. Le processus débute par : (i) la photolithographie, qui consiste à transférer des motifs sur une plaque de silicium à l'aide d'un système de projection optique (UV Stepper) et d'un ensemble de modules de dépôt et de développement de résines photosensibles (coat & develop track). (ii) Ensuite, la gravure humide est réalisée à l'aide de solutions chimiques spécifiques permettant de dissoudre sélectivement certains matériaux, suivie de nettoyages minutieux afin d'éliminer tout résidu indésirable. (iii) La gravure sèche, quant à elle, utilise des plasmas réactifs pour structurer des couches métalliques, de polysilicium ou d'oxydes avec une précision accrue. Les étapes d'implantation ionique (à courant moyen) et de diffusion thermique (réalisée dans des fours horizontaux à quatre étages) permettent ensuite de modifier les propriétés électriques du silicium par introduction et activation de dopants. (iv) Le processus se poursuit avec le dépôt de métaux par pulvérisation cathodique (PVD), indispensable à la formation des interconnexions, ainsi que le dépôt de films minces d'oxydes et de nitrures servant d'isolants ou de couches fonctionnelles. Enfin, (v) des étapes de métrologie, d'inspection et de test sont effectuées pour vérifier la conformité des structures obtenues, avant de passer à la découpe des plaquettes (dicing) et (vi) à leur encapsulation, qui assurent la protection mécanique et environnementale des dispositifs finis.

Tableau 1.1 : Tableau récapitulatif des procédés en salle blanche et des substances associées.

Zone	Process	Photo de la zone	Produits chimiques utilisés	Gaz utilisés	Liste des équipements
Gravure humide	Nettoyage des substrats, gravure humide		HF, HNO ₄ , HCL, HSO ₄ , NH ₄ OH, aluminum	/	Hotte aspirante, SAT, SST, Spin rinse dryers

Photolithographie	Étirement de la résine, insolation UV, développement		Résine photosensible, Remover, RER500, HMDS, Acétone	/	GCA DWS8000, SVG 8800, HMDS oven
Dépôt physique	Dépôt de Al, TiN, Ti, SiO ₂ , SiON		/	NH ₃ , B ₂ H ₆ , SiH ₂ Cl ₂ , CF ₆ , N ₂ , N ₂ O, O ₂ , PH ₃ , SiH ₄ , Ar	Delta Trikon PECVD, MRC PVD
Implanteur	Implantation Bore, Phosphore		/	BF ₃ , PH ₃ , AsH ₃	Varian E220
Gravure sèche	Gravure physique par bombardement ionique		/	Cl ₂ , C ₂ F ₆ , CF ₄ , CHF ₃ , HBr, O ₂ , He, Ar, BCl ₃ , SF ₆	Lam 9600, 4500, 4400, Tepla 300
Diffusion (fours)	Oxydation du silicium		/	N ₂ , O ₂ , DCE, H ₂ , PH ₃ , TEOS, TMB	Four d'oxydation
Nettoyage tubes quartz	Nettoyage tubes en quartz	/	HF, HNO ₃	/	/

Il est important de noter que les étapes ne se suivent pas nécessairement dans l'ordre indiqué. Chaque zone correspond à une opération spécifique, et leur enchaînement dépend du type de produit à fabriquer, de la technologie utilisée et du procédé adopté. Ainsi, certaines étapes peuvent être répétées, omises ou réorganisées selon les besoins du procédé de microfabrication.

Chaque zone de la salle blanche est classée en termes de nombre de particule dans un volume spécifique suivant les exigences de la norme ISO 14644, ce qui nous donne la classification suivante :

- Zone de la lithographie classe 10 ;
- Zone de gravure humide classe 100 ;
- Zone de gravure sèche et de dépôts de couches minces classe 100 ;
- Zone d'implantation et de diffusion classe 100.

Tableau 1.2 : Correspondance entre les classes de propreté des salles blanches et la concentration de particules

Classes des zones	Particules $\geq 0,5 \mu\text{m}$ (particules/m ³)
Classe 10	352
Classe 100	3520
Classe 1000	35200

Le tableau (Tableau 1.2) présente la correspondance entre les classes de salles blanches et la concentration maximale de particules de 0,5 μm par mètre cube, montrant que plus la classe est basse, plus l'air est pur.

1.5 Méthodologie :

Dans le cadre de la bonne exécution de notre projet, la méthodologie adoptée repose sur une démarche structurée, combinant des outils classiques d'évaluation des risques à des approches innovantes, afin de proposer des solutions concrètes et adaptées à l'environnement sensible de la salle blanche.

Ainsi la démarche suivie s'articule autour de quatre étapes principales illustrées par l'organigramme suivant :

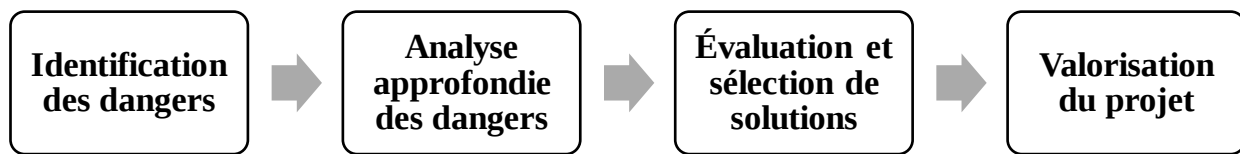


Figure 1.3 : organigramme de la méthodologie suivie.

1. **Identification des dangers** : elle constitue la première étape de toute approche de prévention. À travers une Évaluation des Risques Professionnels (EVRP), les postes de travail en salle blanche et le stockage ont été étudiés afin d'identifier les dangers associés aux produits chimiques, aux gaz utilisés, ainsi qu'aux procédés de manipulation et de maintenance des équipements.
2. **Analyse approfondie des dangers** : après l'identification des dangers, deux analyses Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) ont été menées :
 - Une **AMDEC machine**, centrée sur les composants techniques intervenant dans le processus de changement de bouteilles (tuyauterie, vannes, détendeurs, etc.).
 - Une **AMDEC processus**, visant à examiner l'ensemble de la procédure de changement de bouteille, du transport à l'installation, en passant par les vérifications de sécurité.
3. **Évaluation et sélection de solutions** : deux types de solutions ont été envisagées pour réduire les risques :
 - Une analyse multicritère Analytic Hierarchy Process (AHP) a été appliquée pour comparer différentes solutions de stockage de bouteilles de gaz, notamment le stockage aérien en niche ventilée et le stockage souterrain.
 - Étude de faisabilité de la solution sélectionnée.
 - Le développement d'une application numérique destinée à guider l'utilisateur étape par étape durant le changement de bouteilles, avec notifications de sécurité, checklist dynamique et enregistrement des interventions.
4. **Valorisation du projet** : une ouverture vers la valorisation de ces travaux a été envisagée à travers le développement d'un site web dédié à l'audit de sécurité industrielle en ligne. Ce site, à vocation entrepreneuriale, permettrait aux entreprises de réaliser des autodiagnostic

sur leurs pratiques de sécurité dans des environnements sensibles comme les salles blanches.

Les données utilisées dans cette étude proviennent de plusieurs sources, on peut citer :

- Les documents internes du CDTA : plusieurs documents ont été fournis par le CDTA notamment une étude de danger, fiches de données de sécurité (FDS) des gaz et produits chimiques utilisés, audit environnement et différents plans de l'installation.
- Observations sur site : visites régulières en salle blanche pour une bonne compréhension des processus de production et les différentes étapes et zones de stockage des bouteilles.
- Entretiens avec le personnel technique : échanges avec les opérateurs, responsables sécurité, ingénieurs et techniciens en charge de la maintenance et de la gestion des gaz.
- Normes et recommandations : différents référentiels normatifs ont été utilisés tel que la norme ISO 14644 pour la classification des salles blanches, la norme ISO 11625 pour le stockage des produits dangereux, mais aussi les guides INRS, NFPA, ainsi que des études de cas d'autres centres de recherche ou entreprises similaires et les réglementations en vigueur.

La méthodologie adoptée allie des outils d'analyse classiques à des approches innovantes, favorisant une compréhension complète des risques. Elle repose sur l'observation de terrain, l'échange avec les acteurs concernés et l'appui sur des normes reconnues. Cette démarche structurée permet d'identifier, d'évaluer et de traiter les dangers de manière efficace. Elle répond ainsi à la problématique centrale de ce travail : comment améliorer la gestion des risques liés aux gaz en salle blanche, en repensant le stockage, en optimisant les procédures de changement et en intégrant des outils numériques de traçabilité et de supervision ?

1.6 Conclusion :

Ce premier chapitre a posé les bases de notre étude en présentant le contexte institutionnel du CDTA, les caractéristiques techniques de la salle blanche, ainsi que les procédés microtechnologiques qui y sont mis en œuvre. Il a permis de comprendre l'environnement complexe dans lequel s'inscrit la problématique de la sécurité, notamment face à l'utilisation de gaz et de substances chimiques sensibles.

Chapitre 2

Analyse des risques liés aux gaz industriels : Application des Méthodes EVRP & AMDEC

2.1 Introduction :

Afin d'évaluer les risques liés à l'activité de changement de bouteilles de gaz dans les salles blanches du CDTA, une double approche méthodologique a été adoptée :

Dans un premier temps, une Évaluation des Risques Professionnels (EVRP) a été menée afin de dresser un état global des dangers présents dans les environnements concernés, en lien avec les postes de travail, les produits manipulés et les équipements utilisés. Cette analyse a permis de mettre en évidence plusieurs zones à risque élevé, notamment liées au stockage souterrain et aux manipulations manuelles lors du changement de bouteilles.

Dans un second temps, une AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) a été réalisée pour approfondir l'analyse sur les processus critiques identifiés par l'EVRP.

2.2 Etat des lieux du stockage et la gestion des gaz :

Dans le cadre des activités menées en salle blanche au CDTA, de nombreux gaz sont utilisés pour les procédés de dépôt, de gravure, d'implantation ionique ou encore de nettoyage. Ces gaz présentent des caractéristiques variées : certains sont inertes, d'autres toxiques, corrosifs, inflammables ou même explosifs.

2.2.1 Organisation du stockage des gaz :

Le stockage des bouteilles de gaz est actuellement situé au sous-sol du bâtiment, dans trois salles distinctes réparties selon la nature des gaz :

- Salle 1 : Gaz inflammables,
- Salle 2 : Gaz toxiques et corrosifs,
- Salle 3 : Gaz inertes.

La figure suivante schématise (Figure 2.1) les salles de stockage des bouteilles de gaz situées au sous-sol du bâtiment :

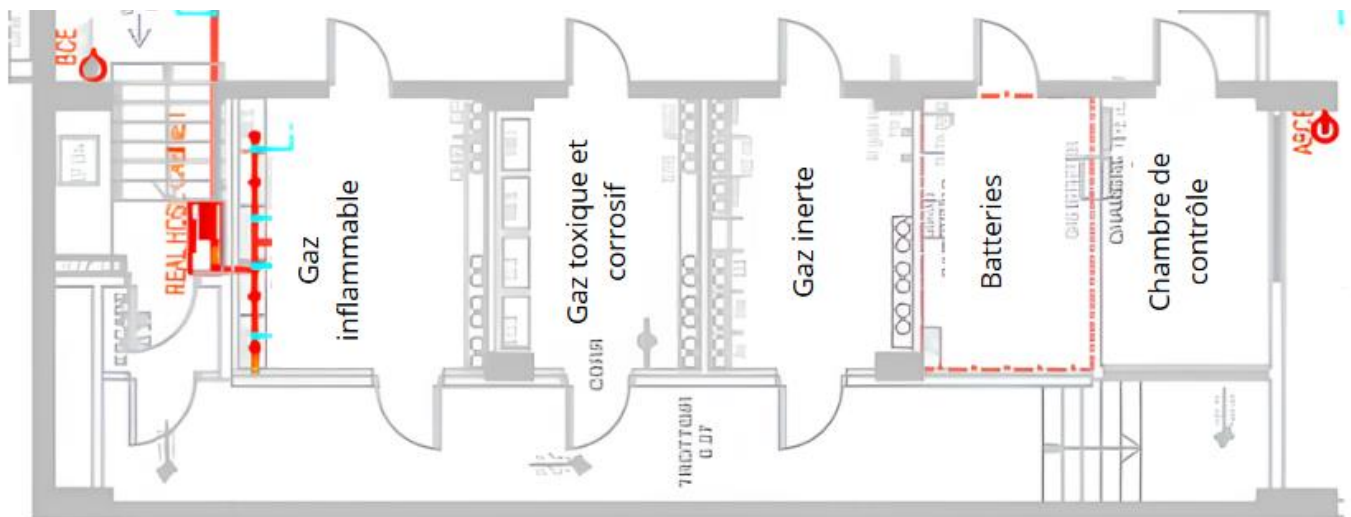


Figure 2.1 : Chambres de stockage des bouteilles de gaz [7]

À l'extérieur du bâtiment, une zone dédiée permet le stockage des gaz explosifs, notamment le silane (SiH_4) et l'hydrogène (H_2), conformément aux exigences de sécurité renforcées selon la Directive ATEX 1999/92/CE.

Les bouteilles sont placées à l'étage immédiatement en dessous des salles blanches, et les gaz sont acheminés vers les équipements via un réseau de canalisations sécurisé.

2.2.2 Caractéristiques des gaz stockés :

Le tableau ci-dessous synthétise les gaz utilisés, leurs quantités et leurs principaux dangers :

Tableau 2.1 : Inventaire des bouteilles de gaz.

Nom du gaz	Symbole	Quantité (nombre de bouteilles)	Caractéristique de la bouteille	Caractéristique du gaz
Hélium	He	5	Rechargeable	Inertes
Oxygène	O_2	11		
Argon	Ar	8		
Azote	N_2	7		
Hydrogène bromide	HBr	4	Jetable	Toxiques et corrosifs
Chlorine	Cl_2	4		
Trichlorure de bore	BCl_3	4		
Hexafluorure de soufre	SF_6	5		
Protoxyde d'azote	N_2O	4		
Dichlorosilane	SiH_2Cl_2	6		
Ammoniac	NH_3	4		Inflammables

Phosphine	PH ₃	4		Explosifs
Trifluorométhane	CHF ₃	6		
Tétra Fluor méthane	CF ₄	2		
Nitrogène hydrogène	N ₂ H ₂	4		
Silane	SiH ₄	8		
Hydrogène	H ₂	12	Rechargeable	

Le tableau (Tableau 2.1) met en évidence la diversité des gaz utilisés au sein du CDTA, incluant des gaz inertes, toxiques, corrosifs, inflammables et explosifs, avec des quantités significatives pour certains comme l'hydrogène (12 bouteilles) ou le silane (8 bouteilles). Cette hétérogénéité renforce la nécessité d'un stockage rigoureusement sectorisé et conforme aux normes de sécurité, notamment ATEX. L'utilisation de bouteilles jetables pour des gaz dangereux comme le HBr souligne également l'importance d'une traçabilité précise et d'une gestion adaptée des déchets. Une clarification des caractéristiques manquantes reste essentielle pour une évaluation complète des risques.

2.2.3 Fréquence et conditions de remplacement des bouteilles de gaz :

Les bouteilles de gaz sont remplacées environ deux fois par an, selon l'état d'utilisation. Le remplacement est réalisé par du personnel qualifié, dans des conditions strictes de sécurité, suivant des étapes précises représentées dans le tableau en annexe.

2.2.4 Mesures de sécurité existantes :

Plusieurs mesures de prévention sont mises en place pour garantir la sécurité de l'installation afin d'avoir un stockage conforme aux normes de sécurité :

- Capteurs de fuite : chaque gaz critique est associé à un détecteur régulièrement vérifié et remplacé.
- Ventilation : un système de ventilation adapté assure le renouvellement de l'air dans les salles de stockage.
- Portes de secours et sorties d'urgence sont disponibles dans les zones sensibles.
- Procédures internes : le changement de bouteille suit un protocole validé par un bureau d'étude, bien que non assisté numériquement à ce jour.

Ces mesures permettent d'éviter les incidents liés au stockage.

Malgré les précautions mises en place, l'analyse des dangers montre que le stockage actuel présente certaines limites, notamment du fait de sa localisation en sous-sol, de la nature des gaz,

et de l'absence d'outils numériques d'assistance lors des manipulations. Ces éléments justifient la réalisation d'une analyse approfondie des risques, présentée dans les sections suivantes.

2.3 Identification des causes des dysfonctionnement :

Le dysfonctionnement que rencontre le CDTA vis-à-vis de la plateforme microtechnologiques ont été identifiés de manière progressive au cours de plusieurs visites sur site, complétées par des séances de brainstorming avec l'équipe de recherche et les agents HSE.

Les dysfonctionnements qui ont été identifiés sont listés ci-dessous :

- Dysfonctionnement 1 : procédure de changement de bouteilles non-structurée / compliquée.
- Dysfonctionnement 2 : Conditions inadéquates du stockage souterrain.
- Dysfonctionnement 3 : Problèmes liés au fournisseur de bouteilles de gaz.
- Dysfonctionnement 4 : Absence d'évaluation du processus.

Afin de recenser les causes de chaque problème, la méthode la plus adéquate est le diagramme Ishikawa.

Cette méthode repose sur plusieurs étapes visant à identifier et classer les facteurs influents selon cinq grandes familles (Méthode, Main-d'œuvre, Milieu, Matière, Matériel), qui sont ensuite représentées sous forme d'un diagramme en arêtes de poisson, également appelé diagramme "cause-effet" [6].

2.3.1 Identification et hiérarchisation des causes :

Nous avons identifié les causes liées à chaque problème et ce à l'issue d'un Brainstorming avec plusieurs personnes venant de différents services aux compétences complémentaires.

Concernant la hiérarchisation (annexe) des problèmes, son objectif est de déterminer les causes les plus critiques afin de concentrer les efforts d'amélioration sur les leviers les plus impactants.

À l'issue du résultat de la criticité, il nous a été possible de hiérarchiser les causes de chaque problème de la plus critique à la plus faible. Les résultats de la hiérarchisation sont représentés dans un tableau en annexe.

Trois critères ont été retenus, fréquemment utilisés dans les démarches d'analyse de risque et d'amélioration continue :

- **Fréquence (F)** : la probabilité d'occurrence ou de récurrence de la cause dans le système analysé.

Tableau 2.2 : Echelle de fréquence (F)

Valeur	Description
1	Très rare (moins d'une fois par an)
2	Rare (1 à 2 fois par an)
3	Occasionnelle (1 fois par trimestre)
4	Fréquente (chaque mois ou chaque semaine)
5	Très fréquente (quotidienne ou permanente)

- **Gravité (G)** : le niveau d'impact ou de conséquence de la cause sur la sécurité, la qualité ou la performance du processus.

Tableau 2.3 : Echelle de gravité (G)

Valeur	Description
1	Sans gravité / Négligeable
2	Peu grave (désagrément mineur, pas de blessure)
3	Moyennement grave (blessure simple, incident gérable)
4	Grave (arrêt de travail, mise en danger)
5	Très grave (danger de mort, impact réglementaire/éthique fort)

- **Non-Maîtrise (M)** : le niveau de contrôle actuel de la cause. Une cause non maîtrisée est plus critique car elle échappe au pilotage opérationnel.

Tableau 2.4 : Echelle de Maîtrise (M)

Valeur	Description
1	Parfaitement maîtrisé (procédures et contrôles efficaces)
2	Bien maîtrisé
3	Moyennement maîtrisé
4	Faiblement maîtrisé
5	Non maîtrisé (aucun moyen de prévention ou contrôle)

Calcul de la criticité (C)

$$\text{Criticité (C)} = \text{Fréquence (F)} \times \text{Gravité (G)} \times \text{Maîtrise (M)} \quad (3.1)$$

Tableau 2.5 : Interprétation de la criticité

Criticité	Interprétation	Priorité d'Action
≥ 80	Cause critique : fréquente, grave et peu maîtrisée	Prioritaire à traiter
45 – 79	Cause importante : à surveiller et corriger à moyen terme	Haute priorité
35 – 44	Cause modérée : impact réel mais maîtrisable	Moyenne priorité
< 35	Cause faible : faible impact ou déjà bien contrôlée	Faible priorité

L'analyse des causes se fait en attribuant à chaque cause un niveau de fréquence, un niveau de gravité et un niveau de maîtrise, suite auquel on calculera la criticité.

A l'issue du résultat de la criticité, il nous a été possible de hiérarchiser les causes (tableau 2.6) de chaque problème de la plus critique à la plus faible.

Tableau 2.6 : Hiérarchisation des causes

L'effet	Cause	Fréquence (F)	Gravité (G)	Maîtrise (M)	Criticité= F × G × M
Procédure de changement de bouteilles non-structurée / compliquée	Aucune digitalisation de la procédure	5	4	5	100
	Absence de check-lists et de workflows	4	5	4	80
	Absence de remontée d'incidents ou non-conformités	4	5	3	60
	Utilisation excessive de supports papier	4	4	3	48
	Accès difficile à l'information en situation réelle	4	4	3	48
	Instructions obsolètes	3	4	3	36
	Pas de validation ou d'audit régulier de la procédure	3	4	3	36
	Aucune mesure d'efficacité ou de respect de la procédure	3	4	3	36
	Pas d'audit ou de suivi régulier	3	4	3	36
	Aucun indicateur de performance sur la gestion des gaz	3	4	3	36
	Zones de stockage surchargées ou désorganisées	3	4	3	36
	Outils informatiques non accessibles aux opérateurs	3	3	3	27
	Résistance au changement (passage au numérique)	4	3	2	24
Conditions inadéquates du stockage souterrain.	Procédures de stockage insuffisantes, et inadaptées.	5	4	4	80
	Bouteilles vides différenciées par une petite étiquette écrite à la main.	4	4	4	64
	Surcharge des locaux.	4	4	4	64
	Négligence ou non-respect des procédures de contrôle du stockage.	3	4	4	48
	Présence de bouteilles de gaz vides à l'intérieur des locaux de stockage.	5	3	2	30
Problèmes liés au fournisseur de bouteilles de gaz.	Dépendance aux fournisseurs étrangers sans cadre légal de contrôle ou de conformité.	5	5	4	100
	Absence de texte juridique sur le stockage, la sécurité, la pureté et la traçabilité de ces gaz	5	5	4	100
	Aucune réglementation nationale en Algérie encadrant les gaz utilisés dans les procédés de microtechnologie	5	5	4	100
	Absence de procédures normalisées pour la réception, le stockage et l'utilisation de gaz de microtechnologie	5	5	4	100
	Pas de documentation officielle sur les conditions de manipulation	5	4	4	80
	Étiquetage des bouteilles erroné	4	5	4	80
	Personnel non formé à l'évaluation de la conformité des bouteilles livrées	4	5	4	80

	Absence de suivi ou de contrôle qualité effectué par le personnel chargé de la réception	4	5	4	80
	Difficultés de communication entre les responsables techniques et les fournisseurs étrangers.	4	4	3	48
	Le CDTA reste le seul utilisateur en Algérie et en Afrique, rendant la normalisation difficile	4	4	3	48
	Manque d'équipements de vérification (manomètres, dispositifs de test, etc.) au moment de la livraison	4	4	3	48
	Pas de contrat spécifiant les exigences techniques et de sécurité	4	4	3	48
	Absence de procédure claire pour la sélection et l'évaluation des fournisseurs	3	4	3	36
	Pas de récupération des bouteilles de gaz	3	4	3	36
Absence d'évaluation du processus	Aucun personnel dédié au management HSE ou à l'évaluation des processus à l'échelle de l'établissement	5	5	4	100
	Aucune procédure documentée ou méthode d'évaluation appliquée (ni audits internes, ni indicateurs de performance)	5	5	4	100
	Manque de formation du personnel aux pratiques d'audit, d'évaluation des risques, ou d'analyse de performance	4	5	4	80
	Absence de responsable qualité ou de cellule qualité pour piloter ces démarches	4	5	4	80
	Utilisation de gaz sensibles sans contrôle de qualité, ni suivi de performance des produits (pureté, stabilité)	4	5	4	80
	Aucun outil informatique ou matériel (capteurs, indicateurs, tableaux de bord) mis en place pour suivre les performances des processus	5	4	3	60
	Pas de démarche de management qualité (ISO 9001) ou sécurité (ISO 45001) pour structurer l'évaluation	5	4	3	60
	Seule la salle blanche bénéficie d'un encadrement formel, ce qui isole le reste des pratiques HSE	4	4	3	48
	Les rares équipements critiques sont suivis de manière manuelle, non formalisée	4	4	3	48
	Absence de planification ou de retour systématique sur les incidents ou dysfonctionnements	4	4	3	48
	Le CDTA fonctionne sans pression extérieure (clients, régulateurs, certificateurs), ce qui limite la motivation à évaluer et améliorer	4	3	2	24

Une fois les causes identifiées et évaluées puis hiérarchisées, nous avons procédé à leur classification (tableau 2.2) selon les 5 grandes familles du diagramme Ishikawa :

Tableau 2.7 : classification des causes selon les cinq familles

Problème (effet)	Classification des causes
Procédure de changement de bouteilles non-structurée / compliquée.	Méthodes : • Absence de check-lists et de workflows • Instructions obsolètes • Pas de validation ou d’audit régulier de la procédure Matériel : • Aucune digitalisation de la procédure • Utilisation excessive de supports papier (perdus, non mis à jour) • Outils informatiques non accessibles aux opérateurs Main-d’œuvre : • Résistance au changement (passage au numérique) Matière : • Aucune mesure d’efficacité ou de respect de la procédure • Pas d’audit ou de suivi régulier • Absence de remontée d’incidents ou non-conformités • Aucun indicateur de performance sur la gestion des gaz Milieu : • Zones de stockage surchargées ou désorganisées • Accès difficile à l’information en situation réelle
Conditions inadéquates du stockage souterrain.	Main-d’œuvre : • Négligence ou non-respect des procédures de contrôle du stockage. Méthode : • Procédures de stockage insuffisantes et inadaptées. Matériel : • Bouteilles vides différenciées par une petite étiquette écrite à la main, ce qui rend leur identification difficile. Milieu (Environnement) : • Surcharge des locaux, entraînant un environnement de stockage inadapté ou mal géré. Matière : • Présence de bouteilles de gaz vides à l’intérieur des locaux de stockage, signe d’une mauvaise gestion des contenants vides ou des déchets.
Problèmes liés au fournisseur de bouteilles de gaz.	Main-d’œuvre : • Personnel non formé à l’évaluation de la conformité des bouteilles livrées. • Absence de suivi ou de contrôle qualité effectué par le personnel chargé de la réception. • Difficultés de communication entre les responsables techniques et les fournisseurs étrangers. Méthode : • Absence de procédure claire pour la sélection et l’évaluation des fournisseurs. • Pas de contrat spécifiant les exigences techniques et de sécurité.

	• Absence de procédures normalisées pour la réception, le stockage et l'utilisation de gaz de microtechnologie. • Pas de documentation officielle sur les conditions de manipulation. Matériel : • Manque d'équipements de vérification (manomètres, dispositifs de test, etc.) au moment de la livraison. • Étiquetage des bouteilles erroné. Matière : • Pas de récupération des bouteilles de gaz. • Absence de réglementation nationale en Algérie encadrant les gaz utilisés dans les procédés de microtechnologie. • Absence de texte juridique sur le stockage, la sécurité, la pureté et la traçabilité de ces gaz. Milieu (Environnement) : • Le CDTA reste le seul utilisateur en Algérie et en Afrique, rendant la normalisation difficile. • Dépendance aux fournisseurs étrangers sans cadre légal de contrôle ou de conformité.
Absence d'évaluation des processus	Main-d'œuvre : • Aucun personnel dédié au management HSE ou à l'évaluation des processus à l'échelle de l'établissement. • Seule la salle blanche bénéficie d'un encadrement formel, ce qui isole le reste des pratiques HSE. • Manque de formation du personnel aux pratiques d'audit, d'évaluation des risques, ou d'analyse de performance. • Absence de responsable qualité ou de cellule qualité pour piloter ces démarches. Méthode : • Aucune procédure documentée ou méthode d'évaluation appliquée (ni audits internes, ni indicateurs de performance). • Absence de planification ou de retour systématique sur les incidents ou dysfonctionnements. • Pas de démarche de management qualité (ISO 9001) ou sécurité (ISO 45001) pour structurer l'évaluation. Matériel : • Aucun outil informatique ou matériel (indicateurs, tableaux de bord) mis en place pour suivre les performances des processus. • Les rares équipements critiques sont suivis de manière manuelle, non formalisée. Matière : • Utilisation de gaz sensibles sans contrôle de qualité, ni suivi de performance des produits (pureté, stabilité). Milieu (Environnement) : • Le CDTA fonctionne sans pression extérieure (clients, régulateurs, certificateurs), ce qui limite la motivation à évaluer et améliorer. • Absence de texte juridique sur le stockage, la sécurité, la pureté et la traçabilité de ces gaz

2.3.2 Construction des diagrammes :

L'identification et la hiérarchisation des causes ont permis d'établir un diagramme pour chaque problème rencontré.

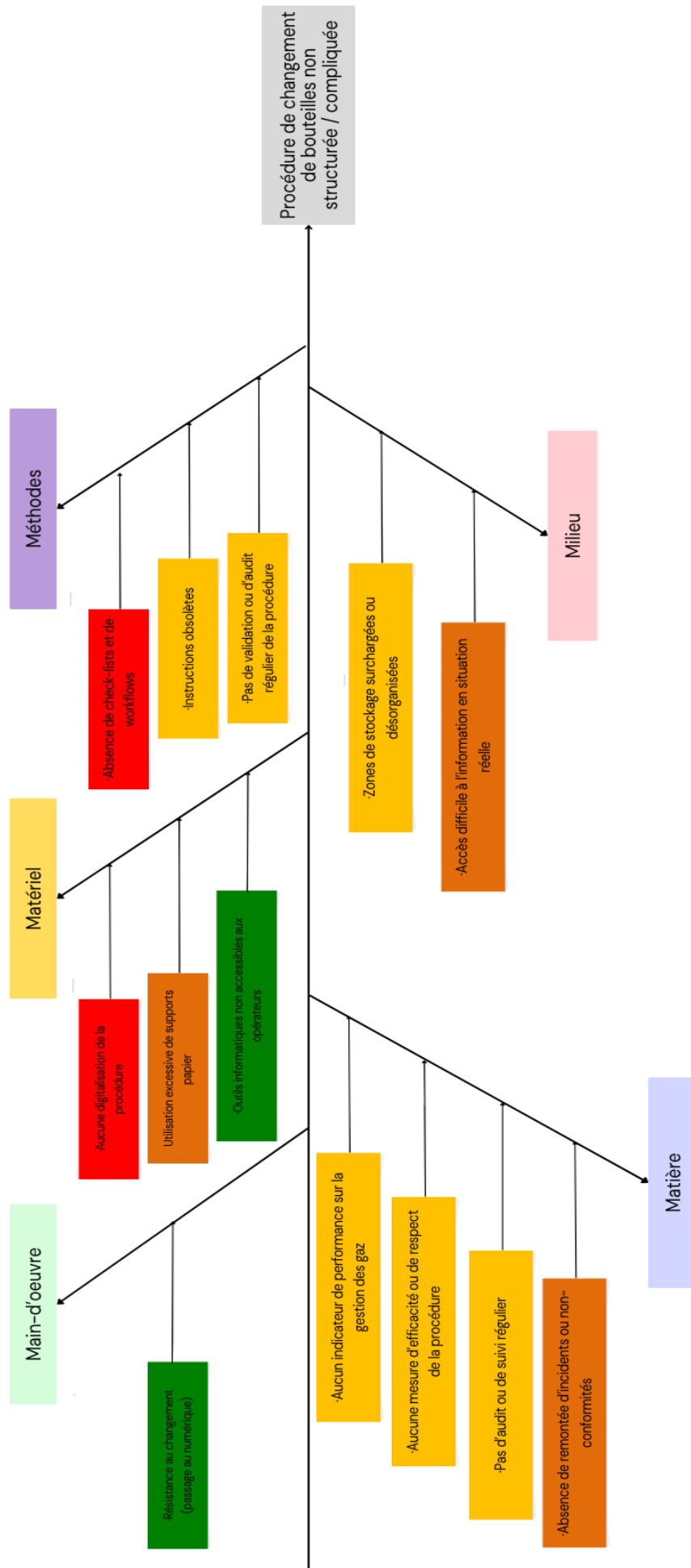


Figure 2.2 : diagramme Ishikawa de la procédure de changement de bouteille non structurée / compliquée

L'analyse par la méthode des 5M nous révèle que la procédure actuelle repose sur des pratiques empiriques, non standardisées, sans appui organisationnel ou technologique adapté. La complexité ressentie est due à l'absence de structure, d'outils, et de cadre de suivi. Elle combine :

- x Un manque de pilotage procédural : les documents ne sont ni vivants, ni intégrés dans une logique d'amélioration continue.
- x Un manque d'outillage numérique empêche la structuration, la traçabilité et la mise à jour en temps réel des étapes de la procédure.
- x Un accompagnement insuffisant lors du changement de bouteille.
- x L'absence de pilotage chiffré (audit, remontée d'incidents) renforce une gestion réactive plutôt que proactive, limitant l'amélioration continue.
- x Un environnement physique n'est pas adapté à une gestion efficace du changement de bouteilles (zones de stockage surchargées).

Les causes les plus critiques dont il est impératif de mettre en priorité lors de la recherche de solutions sont :

- X L'absence de digitalisation de la procédure ;
- X L'absence de check-list et de workflows lors de la procédure.

Nous avons prévu à la suite de cette analyse une révision complète de la procédure, incluant sa digitalisation, et la mise en place d'outils de pilotage (audits, check-lists), afin de garantir une gestion fiable, sécurisée et conforme du changement de bouteilles de gaz.

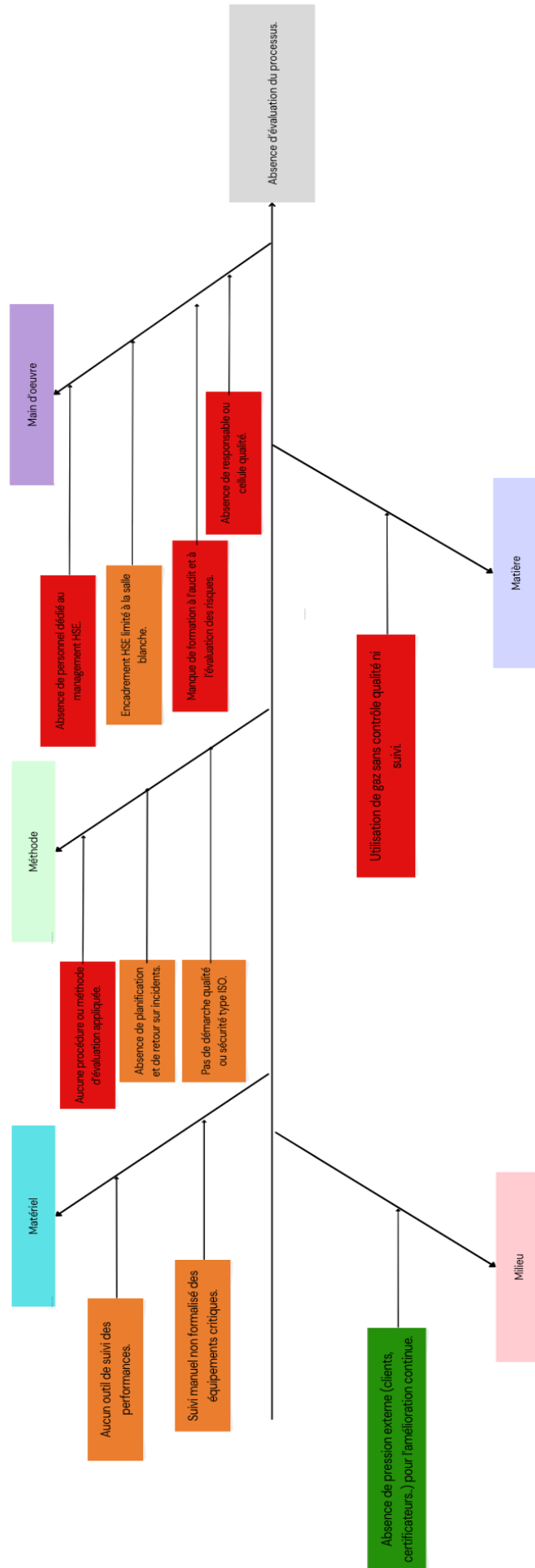


Figure 2.3 : diagramme Ishikawa de l'absence d'évaluation du processus

A partir du diagramme Ishikawa nous constatons une défaillance globale du système de management, marquée par l'inexistence d'un dispositif structuré d'évaluation, de pilotage et d'amélioration continue. Le problème résulte d'un défaut systémique dans la culture organisationnelle. Cette carence fragilise l'efficacité, la sécurité et la performance globale des activités du CDTA, en particulier celles liées à la manipulation de substances sensibles et empêche l'anticipation des risques et la maîtrise de la qualité.

Cette situation empêche :

- x La détection précoce des défaillances,
- x La standardisation des bonnes pratiques,
- x Et l'amélioration durable des procédés critiques.

Un plan d'action devrait inclure :

- ✓ Nommer un référent HSE/qualité, même à temps partiel, pour piloter la démarche ;
- ✓ Mettre en place un système de suivi simple mais régulier comme des audits internes légers ;
- ✓ Déployer progressivement une démarche qualité adaptée (type ISO 9001) en ciblant d'abord les processus à risque ;
- ✓ Créer une routine de retour sur incidents pour initier la culture de l'amélioration continue.

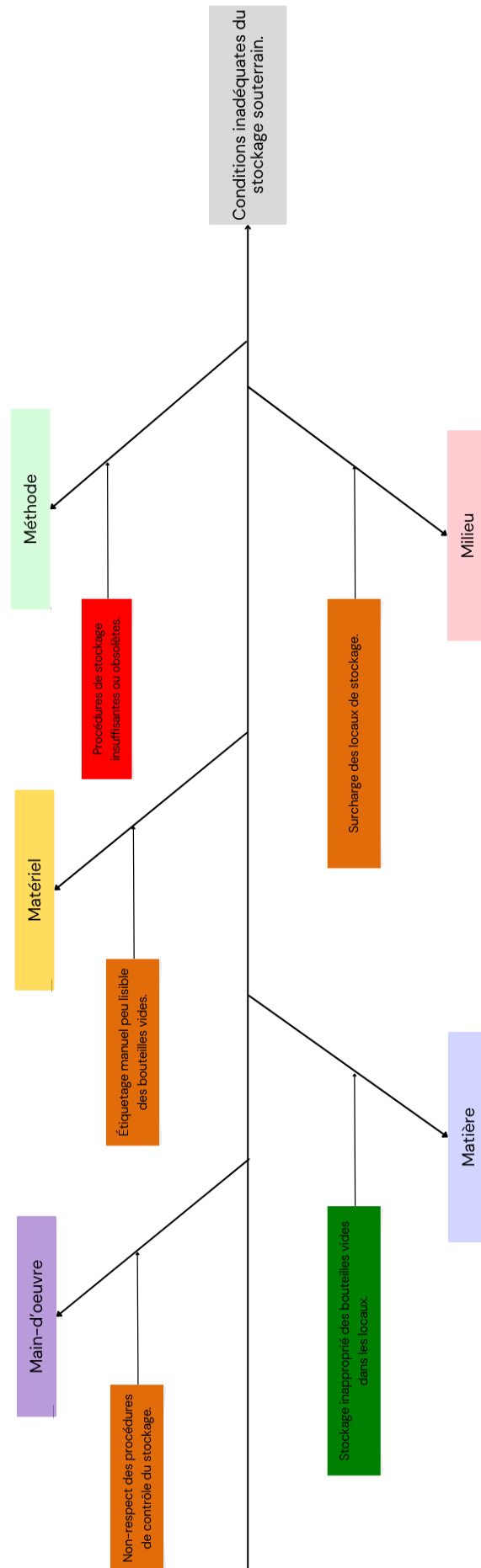


Figure 2.4 : diagramme Ishikawa des conditions de stockage inadéquates

Le problème du stockage souterrain inadéquat relève d'un manque de structuration globale du processus, depuis la réception jusqu'à l'évacuation des contenants. Il combine :

- Des procédures obsolètes et non-structurée,
- Des pratiques humaines non maîtrisées,
- Une logistique physique mal adaptée,
- Et un environnement contraint, aggravé par le manque de moyens de différenciation et d'identification.

A la suite de l'analyse du diagramme Ishikawa il est révélé que la cause principale et prioritaire à traiter est : procédures de stockages insuffisantes ou obsolètes.

Un plan d'actions correctives devrait inclure :

- L'amélioration des procédures de stockage et de tri et opter idéalement pour un stockage aérien,
- La formation ciblée du personnel,
- L'équipement en outils de traçabilité,
- Et un aménagement optimisé du stockage.

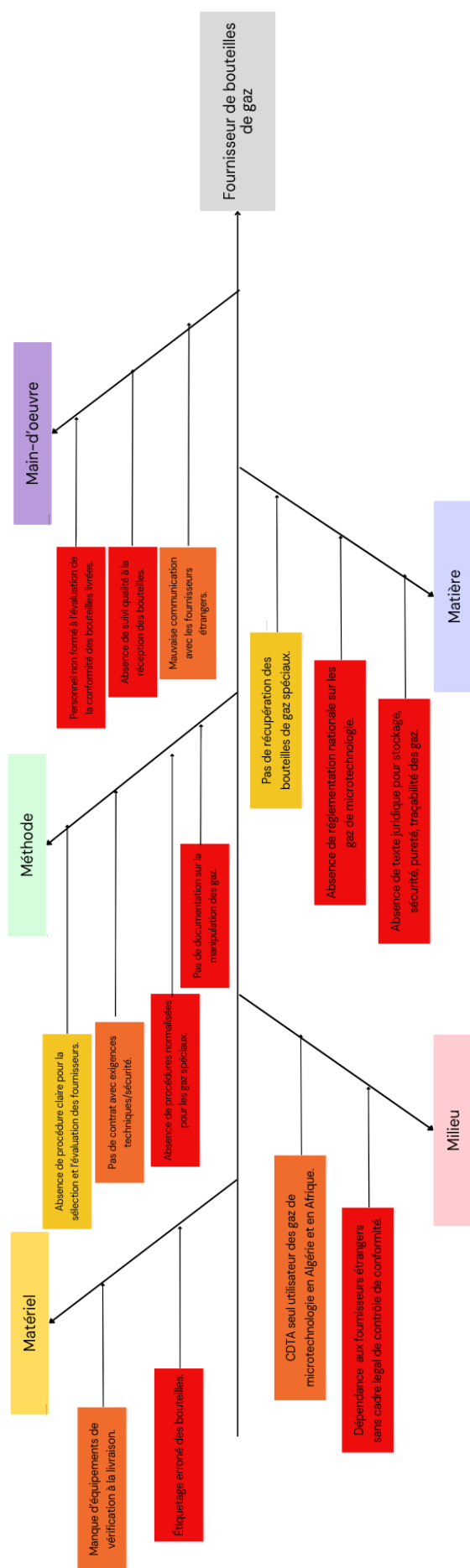


Figure 2.5 : diagramme Ishikawa du fournisseur de bouteilles de gaz

Suite à l'analyse des causes liées aux défaillances dans la gestion des fournisseurs de gaz, nous avons relevé une désorganisation à plusieurs niveaux, allant du manque de structuration interne aux lacunes réglementaires nationales. Ce problème est d'autant plus critique qu'il touche des substances sensibles utilisées en microtechnologie, domaine hautement exigeant. Ce triple déficit technique, organisationnel et réglementaire fragilise la chaîne d'approvisionnement et l'exploitation sécurisée des gaz.

À l'issue de la méthode des 5M nous constatons que le problème est structurel, stratégique et réglementaire. Il s'agit là :

- D'un manque de dispositif interne de sélection et de contrôle des fournisseurs,
- Combiné à l'absence de cadre réglementaire national sur les gaz de spécialité,
- Et à une position d'isolement technologique du CDTA sur le continent.

Discussion des résultats du diagramme :

Finalement, la méthode Ishikawa (Figure 2. 4,5,6) a permis d'arriver aux conclusions suivantes :

L'analyse des différents dysfonctionnements identifiés au niveau du CTDA, menée selon la méthode des 5M, a permis de mettre en évidence plusieurs causes profondes, souvent interconnectées, affectant la fiabilité, la sécurité et l'efficacité des processus liés à la gestion des gaz.

Le premier dysfonctionnement, relatif à une procédure de changement de bouteille non structurée, révèle une organisation empirique dépourvue de standardisation, d'outils de traçabilité et de pilotage opérationnel. L'absence de supports numériques, de check-lists et de dispositifs de retour d'expérience entrave la maîtrise du processus et limite toute amélioration continue. Notre but sera de remédier à ce problème à travers la création d'une application qui simplifiera l'exécution, la traçabilité et la sécurisation de la procédure.

Le deuxième problème, concernant les conditions inadaptées du stockage souterrain, résulte d'un manque de structuration des procédures de gestion physique, de pratiques humaines non formalisées et d'un espace de stockage inapproprié. Ce constat nous renvoie vers deux solutions : la réorganisation du stockage souterrain afin de le rendre plus performant, sécurisé et conforme ou réorienter l'organisation vers un stockage aérien comme le conseil la norme ISO 11625 :2015 (Bouteilles à Gaz) Sécurité et Manutention dans le chapitre 7. Pour ce faire, une méthode d'analyse multicritère sera utilisée afin d'évaluer objectivement les différentes solutions envisagées et de déterminer celle qui présente le meilleur compromis en termes de faisabilité, de sécurité, de coût et d'efficacité.

Le troisième dysfonctionnement met en évidence des lacunes critiques dans la gestion des fournisseurs de gaz, notamment l'absence de dispositifs internes formalisés de sélection, d'évaluation et de contrôle, un vide réglementaire au niveau national concernant les gaz de microtechnologie, ainsi qu'une position d'isolement technique de l'établissement sur le plan continental. Ces carences fragilisent la chaîne d'approvisionnement et compromettent la conformité et la sécurité des produits manipulés.

Enfin, l'absence d'un système structuré d'évaluation et de suivi des processus constitue un facteur limitant majeur. L'inexistence d'indicateurs de performance, de retours sur incidents ou d'audits internes freine la mise en place d'une culture qualité et d'une dynamique d'amélioration continue.

La solution envisagée vise à répondre simultanément aux deux problématiques identifiées : la gestion défaillante des fournisseurs de gaz et l'absence d'un système structuré d'évaluation des processus. Elle consiste en la mise en place d'un dispositif d'audit des fournisseurs, fondé sur les exigences de la norme ISO 9001 : 2015, ainsi qu'à l'instauration d'un suivi rigoureux du stockage des bouteilles de gaz, conforme aux recommandations de la norme ISO 11625 : 2007. Cette solution permettra d'évaluer la capacité des fournisseurs à satisfaire aux exigences de qualité et à l'établissement de garantir un stockage conforme et optimal des bouteilles de gaz, ainsi que de renforcer la traçabilité des approvisionnements et de structurer les relations fournisseurs autour de critères de performance clairs, mesurables et alignés sur les meilleures pratiques internationales.

De manière transversale, quatre axes prioritaires d'action émergent de notre analyse :

- ✓ La structuration et la formalisation des procédures critiques, avec intégration d'outils numériques adaptés à la traçabilité et à la standardisation ;
- ✓ L'optimisation des infrastructures de stockage de bouteilles de gaz conformes aux exigences réglementaires et fonctionnelles ;
- ✓ Mise en place d'un système intégré d'audit fournisseur et de suivi du stockage des gaz selon les normes ISO 9001 : 2015 et ISO 11625 : 2007.

Ces éléments constituent les fondations du plan d'action proposé dans la suite de notre mémoire et visent à renforcer la maîtrise globale des risques au sein du CDTA, pour s'assurer des résultats ; un audit fournisseur suivant la norme ISO 9001 : 2015 a été réalisé.

2.3.3 Audit qualité fournisseurs :

Dans le cadre de la démarche qualité ISO 9001 :2015 mises en œuvre au CDTA, un audit interne du processus HSE a été réalisé le 9 avril 2025, selon une approche combinant entretiens, revue documentaire et observations terrain.

2.3.4 Résultats de l'audit :

L'audit a mis en évidence plusieurs points forts, notamment une bonne connaissance des processus, une identification claire des entrées/sorties, et l'intégration des aspects liés à la qualité, aux délais et à l'environnement. Toutefois, plusieurs points sensibles et non-conformités ont également été relevés, affectant directement ou indirectement la sécurité liée au stockage des gaz.

Trois non-conformités majeures ont été identifiées. La plus critique (NC3) concerne l'absence de disposition managériale claire pour la gestion d'un lot important de bouteilles de gaz usagées stockées sans suivi structuré. Cela constitue un manquement aux exigences de maîtrise des biens appartenant à des tiers (clients ou fournisseurs), et expose l'établissement à des risques liés à l'identification, au stockage prolongé ou au non-respect des conditions de sécurité de ces contenants. D'autres non-conformités concernaient l'absence de documentation sur les dispositions SST dans les relations contractuelles avec les prestataires (NC2), et le manque d'évaluation formalisée des fournisseurs (NC1).

En réponse, plusieurs recommandations ont été émises. Parmi elles, la création d'une procédure spécifique de gestion des bouteilles de gaz vides, incluant leur identification, leur stockage sécurisé, leur retour au fournisseur ou leur élimination réglementaire. Cette mesure vise à renforcer la traçabilité, éviter les accumulations non maîtrisées, et réduire les risques liés aux gaz résiduels dans les contenants.

2.4 Evaluation des risques :

L'évaluation des Risques Professionnels (EVRP) est une étape cruciale dans la démarche de prévention au sein d'une entreprise, elle vise à identifier, analyser et évaluer les risques et dangers auxquels sont exposées les travailleurs. Cette méthode permet de mettre en place des mesures de prévention adaptées pour garantir un environnement de travail adéquat [7].

Elle a pour objectif de recenser, analyser et hiérarchiser les dangers présents dans l'environnement de la salle blanche du CDTA, en lien direct avec l'utilisation et la manipulation des gaz industriels.

2.4.1 Méthodologie utilisée :

L'EVRP a été réalisée en utilisant deux critères principaux [6] :

1. La gravité de la conséquence possible : Les niveaux de gravité sont définis par les conséquences des défaillances ou défauts de fonctionnement d'un sous-système ou d'un composant.

Tableau 2.8 : Echelle du niveau de gravité de l'EVRP

Gravité	Estimation de la gravité
4	Catastrophique : décès ou atteinte à l'environnement irréversible.
3	Critique : blessures graves ou invalidantes, atteinte critique à l'environnement nécessitant une dépollution lourde, dommages limités à l'établissement.
2	Peu nuisible : blessures légères, effet mineur sur l'environnement, dommages limités à l'équipement
1	Négligeable : pas de blessés, pas de dommages notables au système, pas d'atteinte à l'environnement, pas de perte de l'exploitation

2. La probabilité que la conséquence survienne : la probabilité traduit l'occurrence d'apparition d'un danger potentiel.

Tableau 2.9 : Echelle du niveau d'occurrence (probabilité) de l'EVRP

Fréquence	Estimation de la fréquence
4	Probable : Susceptible de se produire et constaté couramment dans l'accidentologie du groupe.
3	Occasionnel : Probabilité de défaillance peu fréquente ayant été constatée dans l'accidentologie du groupe.
2	Rare : Susceptible de se produire au cours de la durée de vie du projet et constaté dans l'accidentologie.
1	Improbable : Tellement improbable que l'on peut supposer qu'aucun cas ne se produira.

La criticité est alors obtenue par le produit des deux :

$$C = \text{Gravité} \times \text{Probabilité} \quad (2.1)$$

Ce qui nous donne la matrice suivante :

Tableau 2.10 : matrice de criticité de l'EVRP.

P \ G	1	2	3	4
1	1	2	3	4
2	2	4	6	8
3	3	6	9	12
4	4	8	12	16

La cotation finale permet de prioriser les risques :

- **1 à 3** : Risque faible (surveillance)
- **4 à 6** : Risque modéré (actions correctives à moyen terme)
- **8 à 16** : Risque élevé (actions immédiates nécessaires)

Les données ont été collectées à partir des observations sur site, des procédures internes, et des échanges avec le personnel technique (opérateurs, responsables sécurité, maintenance).

2.4.2 Résultats et points critiques :

L'EVRP réalisée sur la salle blanche a révélé plusieurs risques critiques à ne pas négliger. Parmi les plus importants :

- Le risque chimique lié à l'usage de gaz dangereux (NH_3 , Cl_2 , PH_3 ...) atteignant une criticité jusqu'à 12,
- Le risque de variation des conditions ambiantes (humidité, température), pouvant compromettre les procédés,
- Le risque d'explosion ou d'incendie en cas de mauvaise manipulation des solvants ou de surpression.

Mais chacun de ces risques a été maîtrisé et des procédures ont été mises en place pour avoir un environnement sûr car selon la norme ISO 14644 : les salles blanches sont des environnements contrôlés.

Le tableau suivant représente un échantillon de l'EvRP appliquée sur chaque procédés de la salle blanche du CDTA :

Tableau 2.11 : Echantillon du tableau de l'EVRP appliqué à la salle blanche

Unité de travail	Phénomène dangereux	Nature du risque	Dommages/conséquences	P	G	C	Mesures existantes	P'	G'	C'	Actions de protection
Salle blanche	Surpression ou dépression anormale.	Physique	Déstabilisation des zones de confinement (Peut entraîner l'entrée d'air contaminé.).	2	4	8	Maintenance préventive régulière du système de traitement d'air. Présence d'alarmes	1	4	4	
	Variations brusques de température ou d'humidité.		Risque pour la stabilité des produits ou pour les équipements sensibles (condensation, corrosion).	3	3	9	Capteurs de température / humidité haute précision. Climatisation spécifique pour salle blanche. Contrôle permanent via logiciel de gestion environnementale.	1	3	3	
	Rayonnements non ionisants (Exposition aux UV dans les systèmes de décontamination.).		Risques oculaires ou cutanés pour le personnel.	2	3	6	Blindage UV des systèmes de décontamination (enceintes fermées, matériaux opaques). Équipements de protection individuelle (EPI). Formations du personnel aux risques liés aux UV.	1	2	2	
	Nuisances sonores.		Risques auditifs.	2	2	4	Port de protections auditives. Limitation du temps d'exposition dans les zones les plus bruyantes.	1	2	2	
	Contamination particulaire (Introduction de particules via le personnel, les équipements ou les matériaux.)		Produits défectueux, Pannes d'équipements, Rejets de lots, Altération des résultats expérimentaux.	2	4	8	Surveillance stricte sur le port de la combinaison spéciale salle blanche. Règlementation stricte sur l'habillement en salle blanche : -Porter obligatoirement la combinaison de la salle blanche	1	2	2	

Le tableau met en évidence que l'ensemble des phénomènes dangereux identifiés en salle blanche ont fait l'objet de mesures de maîtrise, à travers la mise en place d'actions de prévention et de protection appropriées. Dans cette logique, le CDTA a mis à la disposition des opérateurs les Fiches de Données de Sécurité (FDS) pour chaque substance utilisée, et leur a fourni les Équipements de Protection Individuelle et Collective (EPI/EPC) nécessaires. Parmi ces équipements, on retrouve notamment : des lunettes de protection, une visière, des gants, un tablier, ainsi qu'une combinaison spéciale adaptée aux risques rencontrés.

La figure (figure 2.6) illustre les différentes étapes de préparation que doivent suivre les opérateurs avant d'accéder à la salle blanche.

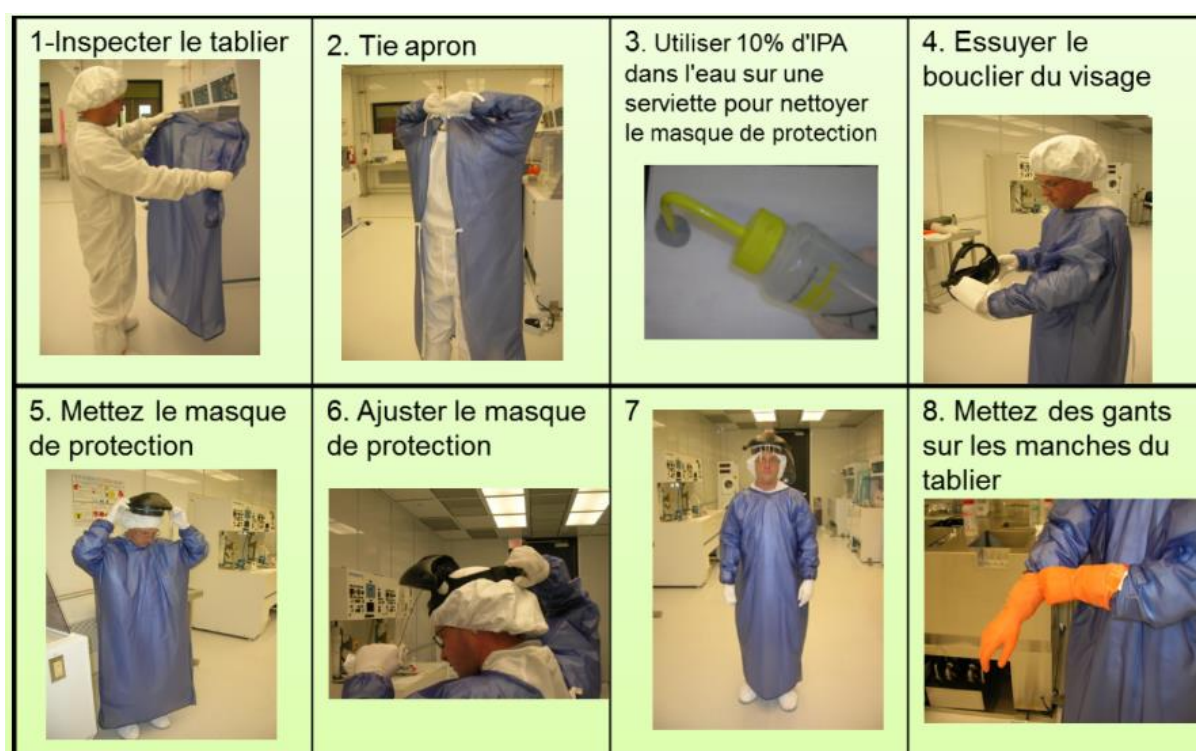


Figure 2.6 : Etapes de préparation avant l'entrée en salle blanche

Mais par ailleurs, le stockage des gaz présente plusieurs risques non maîtrisés ou peu de moyens ont été mis en place. En raison de leur criticité élevée, ces risques sont susceptibles de provoquer des conséquences graves, tant sur le plan humain que matériel, et requièrent une analyse plus approfondie et un traitement prioritaire.

Tableau 2.12 : Echantillon du tableau de l'EVRP appliqué au stockage des gaz.

Stockage de gaz inflammables	Départ de feu au contact d'une source d'allumage	Physique	Brûlures graves, Incendie	2	3	6
	Explosion du gaz sous pression si surchauffe ou rupture		Déflagration, effet de souffle, Blessures multiples, Destruction de locaux	2	4	8
	Rupture de robinet ou de la bouteille		Effet "missile", Dommages matériels et humains	3	3	9
	Fuite	Chimique	Effet "missile", Dommages matériels et humains Incendie	3	4	12
	Surchauffe des bouteilles et Augmentation de la pression		Projection de fragments métalliques, Blessure grave ou mortelle	2	4	8

L'EVRP a aussi révélé les failles du processus de changement de bouteilles de gaz qui présentent un risque de sécurité qui doit être examiné.

Tableau 2.13 : Echantillon du tableau de l'EVRP appliqué au changement de bouteilles de gaz.

Changement de bouteilles de gaz	Ouverture d'une vanne sans vérification pression résiduelle		Projection de gaz, Effet de souffle, Intoxication	2	4	8
	Gaz toxique/inflammable restant dans la ligne		Asphyxie, Brûlures, Incendie	2	3	6
	Fuite de gaz résiduel lors de la déconnexion		Irritation, Brûlures, Contamination	2	3	6

Le tableau complet de l'EvRP se trouve en annexe (annexe 01).

Ces résultats renforcent la nécessité d'approfondir certains scénarios critiques par des analyses ciblées, comme l'AMDEC sur le processus de changement de bouteille et le stockage des bouteilles.

2.5 Analyse des risques du processus de changement de bouteilles de gaz à l'aide de la méthode AMDEC :

L'Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) a pour objectif d'étudier en détail le processus de changement de bouteilles (les étapes de changement et les outils utilisés) au sein du CDTA. Cette analyse permet d'étudier la fiabilité des outils et vise à identifier les défaillances potentielles, leurs causes et leurs effets [10].

Cette approche approfondit les scénarios critiques et identifie les points sensibles nécessitant une action préventive ou corrective.

Deux AMDEC ont été menées :

- Une AMDEC machine, sur les équipements utilisés.
- Une AMDEC process, sur les différentes étapes de la manipulation des bouteilles.

2.5.1 Méthodologie suivie :

Les deux AMDEC ont été réalisées suivant les échelles suivantes :

1. Gravité des effets de défaillances :

Tableau 2.14 : Echelle du niveau de gravité des effets

Niveau	Valeur	Définition
Mineur	1	La défaillance arrête le composant mais pas l'installation qui consiste à fonctionner en mode dégradé.
Moyenne	2	La défaillance arrête l'équipement mais pas la production qui consiste à fonctionner en mode dégradé.
Majeur	3	La défaillance arrête la production et nécessite une intervention de maintenance.
Important	4	La défaillance arrête la production impliquant des problèmes graves pour les hommes ou l'installation

2. Fréquence des effets de défaillances :

Tableau 2.15 : Echelle du niveau de fréquence des effets

Niveau	Valeur	Définition
Exceptionnel	1	Pas de mémoire de participant
Rare	2	Cela est déjà arrivé 1 ou 2 fois
Fréquent	3	Cela est déjà arrivé plusieurs fois
Certain	4	Cela arrivera à coup sûr

3. Capacité de détection de la défaillance :

Tableau 2.16 : Echelle du niveau de capacité de détection de la défaillance

Niveau	Valeur	Définition
Evident	1	Détection certaine

Possible	2	Délectable par l'opérateur
Improbable	3	Difficilement détectables
Impossible	4	Indélectable

La criticité se calcul suivant la formule suivante :

$$Criticité = Fréquence \times Gravité \times Capacité de détection \quad (2.2)$$

Le tableau suivant permet de comprendre le niveau de criticité :

Tableau 2.17 : Echelle du niveau de criticité

Niveau de criticité	Actions correctives à engager
$1 \leq C < 10$ Criticité négligeable	Aucune modification de conception Maintenance corrective
$10 \leq C < 20$ Criticité moyenne	Amélioration des performances de l'élément Maintenance préventive systémique
$20 \leq C < 40$ Criticité élevée	Révision de la conception et choix des éléments Surveillance particulière, maintenance préventive conditionnelle
$40 \leq C < 64$ Criticité interdite	Remise en cause complète de la conception

2.5.2 Résultats de l'analyse :

L'analyse AMDEC machine (annexe 02) met en évidence les composants les plus critiques. Nous identifions que les joints (criticité jusqu'à 36) sont les composants les plus critiques comme le montre l'échantillon du tableau suivant :

Tableau 2.18 : Echantillon du tableau de l'AMDEC machine

Joints	Assurer l'étanchéité entre deux pièces mécaniques	Fuite	Usure Vieillessement, Dégradation Fatigue thermique, Manque de lubrification, Pression trop élevée Cycles répétitifs	Perte de confinement, Explosion ou incendie	3	4	3	36
		Serrage insuffisant des raccords	Erreur humaine lors de l'assemblage, Manque de formation,	Fuite de gaz lente à la jonction, Risque de fuite prolongée	2	4	4	32

L'analyse met aussi en évidence une forte criticité au niveau des vannes (ouvertes et fermées) avec des défaillances liées aux fuites, à la corrosion et aux défaillances de capteurs.

Par la suite, des actions de correction ont été proposer selon le niveau de criticité du mode de défaillance.

Quant à l'AMDEC procédé appliqué sur la procédure de changement de bouteilles de gaz (tableau complet en annexe), elle met en évidence que les défaillances les plus critiques sont liés à la chute de bouteilles, aux micro fuites au niveau des joints, et aux chocs lors de la manipulation, chacun avec un indice de criticité de 36. Ces défaillances présentent un danger élevé en termes d'explosion, de fuite de gaz, ou de blessures.

En second niveau de criticité ($C = 24$), on retrouve les défaillances dues à un robinet mal fermé, à une température élevée, ou à une proximité avec une source de chaleur représentant trois cas sur huit, soit 37% des scénarios étudiés.

2.6 Conclusion

En conclusion, l'utilisation combinée des outils EVRP, AMDEC, méthode des 5M et Ishikawa a permis d'identifier les principaux dysfonctionnements affectant la gestion des gaz industriels en salle blanche au CDTA. L'EVRP a mis en évidence les dangers présents dans l'environnement de travail, tandis que l'AMDEC a apporté une analyse détaillée des composants techniques critiques et des étapes du processus de changement de bouteilles. Cette double lecture a révélé des lacunes majeures : l'absence de procédure standardisée pour le changement, des conditions de stockage non conformes, et une gestion des fournisseurs insuffisamment encadrée.

Face à cela, des solutions concrètes ont été formulées : la conception d'une application numérique pour tracer et sécuriser les opérations de changement, le renforcement des procédures de gestion et d'audit des fournisseurs selon la norme ISO 9001 :2015, et l'élaboration d'un référentiel de stockage conforme à l'ISO 11625 :2007. Ces propositions s'inscrivent dans quatre axes prioritaires : la formalisation des procédures critiques, l'intégration d'outils numériques, l'optimisation des infrastructures de stockage, et la mise en place d'un dispositif structuré de suivi et d'évaluation.

Ce socle analytique, adossé à des normes reconnues et à des outils éprouvés, constitue une base solide pour améliorer la performance globale du CDTA et maîtriser durablement les risques liés aux gaz industriels.

Chapitre 3

Propositions de Solutions Techniques & Organisationnelles

3.1 Introduction :

À la suite de l'analyse des dangers liés à l'utilisation et au changement des bouteilles de gaz en salle blanche, plusieurs pistes d'amélioration ont été identifiées. Ce chapitre est dédié à la proposition de solutions techniques et organisationnelles visant à réduire les risques identifiés et à optimiser les pratiques en vigueur.

Les solutions proposées s'inscrivent dans une démarche globale de maîtrise des risques, fondée à la fois sur des outils d'aide à la décision (analyse multicritère) et sur une logique de simplification, sécurisation et traçabilité des interventions.

3.2 Proposition de solutions aux problèmes du CDTA :

Suite à l'évaluation des risques liés au stockage actuel des bouteilles de gaz, deux solutions d'amélioration ont été envisagées pour réduire les contraintes opérationnelles et sécuritaires, en particulier concernant les bouteilles vides. L'analyse a également mis en lumière un autre point critique : le processus de changement de bouteilles s'appuie aujourd'hui sur un tableau Excel peu structuré, sans traçabilité ni validation formelle des opérations.

3.2.1 Stockage souterrain :

La première solution consiste à construire un espace de stockage souterrain indépendant, de type bunker technique, destiné à recevoir l'ensemble des bouteilles de gaz – qu'elles soient pleines ou vides. Ce local serait totalement séparé des zones actuelles.

3.2.2 Stockage aérien :

La seconde solution envisagée repose sur la mise en place d'un stockage extérieur, sous forme de niches ventilées situées à proximité immédiate du bâtiment. Ce type d'installation, conforme aux normes ATEX et ISO, permettrait d'héberger les bouteilles de manière sécurisée tout en facilitant leur accès et leur remplacement.

3.2.3 Application :

En complément des solutions matérielles, une application interne de gestion du changement des bouteilles de gaz a été développée. Celle-ci permet de digitaliser l'ensemble du processus. Ce dispositif assure à la fois la traçabilité, la réduction des erreurs humaines, et une meilleure visibilité pour les responsables QHSE.

3.3 Etude et présentation des solutions :

L'analyse des risques a mis en évidence plusieurs faiblesses du système de stockage actuel, situé en sous-sol. Ce type de configuration présente des contraintes d'accessibilité, des risques en cas de fuite de gaz toxique, et une difficulté de mise en conformité en cas d'évolution des exigences réglementaires.

3.3.1 contexte et objectifs :

Actuellement, les bouteilles de gaz utilisées pour alimenter les équipements de la salle blanche sont stockées (Figure 3.1) dans des salles techniques situées à l'étage inférieur, directement en dessous de la salle blanche. Chaque salle contient :

- Des bouteilles vides,
- Des bouteilles pleines prêtes à être utilisées,
- Une cabine de distribution contenant une bouteille en cours d'utilisation, raccordée aux équipements via un réseau de canalisations haute pression.



Figure 3.1 : Etat actuel du stockage des bouteilles de gaz

Cette organisation présente l'avantage d'un raccordement rapide aux procédés via un réseau interne, mais elle engendre également plusieurs contraintes majeures :

- Manque d'espace dans les salles techniques,
- Risque d'accumulation de gaz en cas de fuite dans un espace confiné,
- Difficulté d'accès pour les opérations de remplacement,
- Risque croisé lié à la présence simultanée de bouteilles pleines, vides et en service.

Pour justifier le choix de la meilleure solution, une analyse multicritère Analytic Hierarchy Process (AHP) a été réalisée en se basant sur des critères de sécurité, de faisabilité et d'impact global.

3.3.1.1 Description de la méthode AHP :

L'analyse multicritère Analytic Hierarchy Process (AHP) créée par Saaty (1991), est une méthode d'analyse multicritères qui peut être utilisée dans la quantification des caractéristiques qualitatives, par le biais de sa pondération.

La méthode est basée sur la comparaison des différentes caractéristiques, deux par deux. À partir de la construction d'une matrice carrée, on évalue l'importance relative d'une caractéristique par rapport à une autre, en utilisant pour cela, une échelle adéquate. Une fois que la matrice de comparaison est remplie, on calcule la valeur propre de chacune et le vecteur propre lui correspondant. Le vecteur propre indique l'ordre de priorité ou la hiérarchie des caractéristiques étudiées. Ce résultat est important pour l'évaluation de la probabilité, puisqu'il sera utilisé pour indiquer l'importance relative de chaque critère opérant. La valeur propre est la mesure qui permettra d'évaluer la cohérence ou la qualité de la solution obtenue, représentant ainsi, un autre avantage de cette méthode [8].

Le tableau suivant représente la matrice carrée évolutive :

Tableau 3.1 : Matrice de comparaison et calcul de son vecteur

Critères	C_1	C_2	C_3	...	C_n	W_i
C_1	$1/\Sigma C_1$	$W_{21}/\Sigma C_2$	$W_{31}/\Sigma C_3$	...	$W_{n1}/\Sigma C_n$	$\Sigma C_1/n$
C_2	$W_{12}/\Sigma C_1$	$1/\Sigma C_2$	$W_{32}/\Sigma C_3$	...	$W_{n2}/\Sigma C_n$	$\Sigma C_2/n$
C_3	$W_{13}/\Sigma C_1$	$W_{23}/\Sigma C_2$	$1/\Sigma C_3$	...	$W_{n3}/\Sigma C_n$	$\Sigma C_3/n$
...	...	...	...	...	...	...
C_n	$W_{1n}/\Sigma C_1$	$W_{2n}/\Sigma C_2$	$W_{3n}/\Sigma C_3$	...	$1/\Sigma C_n$	$\Sigma C_n/n$
	ΣC_1	ΣC_2	ΣC_3	...	ΣC_n	

Afin de tester la cohérence de la réponse qui indique si les données ont un rapport logique entre elles, SAATY propose de suivre le procédé suivant :

$$\lambda_{\max} = A.w \quad (3.1)$$

Ou A est le vecteur propre normalisé utilisé pour quantifier et évaluer l'importance de chaque critère

$$A = [W_1/\Sigma W_i \quad W_2/\Sigma W_i \quad \dots \quad W_n/\Sigma W_i] \quad (3.2)$$

Et w est l'addition des colonnes de la matrice de comparaisons.

Cela nous permet de calculer l'indice de cohérence :

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3.3)$$

Et le ratio de cohérence :

$$CR = \frac{IC}{IR} \quad (3.4)$$

Avec IR indice aléatoire (Random Index) dépendant de n :

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
IR	0.0	0.0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

- Si **CR < 0.10** → la cohérence est acceptable
- Si **CR > 0.10** → la matrice n'est **pas cohérente**

Le poids ou le vecteur caractéristique est calculé suivant l'échelle de Saaty (en annexe) [9].

Une note est donc attribuée à chaque critère selon sa performance sur chaque critère, puis une note globale pondérée est calculée.

Ces degrés d'importance permettent par la suite de déterminer le poids de chaque critère en multipliant le poids de chaque critère par le poids de chaque alternative par rapport à chaque critère.

3.3.1.2 Choix des critères :

Pour remédier au problème de stockage, deux solutions ont été proposées : le stockage aérien en niche et le stockage souterrain en bunker.

Pour cela plusieurs critères ont été choisis afin de déterminer quelle solution est la plus adaptée ; les huit critères retenus pour évaluer les deux alternatives de stockage sont :

1. **Sécurité** : Certains gaz (comme le silane ou l'ammoniac) présentent des risques majeurs en cas de fuite. Il est essentiel d'évaluer comment chaque solution réduit le risque d'incendie ou d'explosion, surtout en milieu clos.
2. **Protection contre la corrosion** : Les bouteilles et les installations (vannes, conduites) peuvent se détériorer rapidement dans des environnements humides ou mal ventilés. Ce critère permet d'évaluer la durabilité de l'installation selon les conditions proposées.

3. **Accès et manipulation** : Les opérations de remplacement des bouteilles doivent être simples, rapides et sûres. Un accès difficile augmente le risque de mauvaise manipulation ou d'accident.
4. **Conformité réglementaire** : Les normes ATEX, ISO, et la réglementation locale imposent des conditions strictes de stockage et de ventilation. Ce critère évalue la capacité de chaque solution à être conforme sans adaptations majeures.
5. **Impact environnemental** : Un stockage mal ventilé ou mal localisé peut entraîner des risques de pollution, de nuisance sonore ou visuelle. Ce critère mesure le respect de l'environnement interne et externe.
6. **Coût d'installation** : Le coût initial est un facteur clé dans la mise en œuvre d'une solution. Il inclut les travaux (creusement, génie civil, ventilation), les équipements et les tests de validation.
7. **Maintenance** : Un système nécessitant une maintenance fréquente ou complexe peut être un fardeau opérationnel. Ce critère évalue la facilité d'entretien, l'accessibilité et la stabilité à long terme.
8. **Évolution** : Le projet doit anticiper la croissance des besoins (ajout de nouvelles bouteilles de gaz).

3.3.1.3 Mise en place de la méthode AHP :

La mise en place de la méthode débute par un diagramme hiérarchique appelé diagramme de décision ou arbre hiérarchique AHP. Ce schéma permet de visualiser clairement la structure du problème de décision.

Notre étude se base sur le choix de la solution la plus optimale pour le stockage de bouteilles de gaz, deux alternatives ont été proposer ; le stockage aérien et le stockage souterrain.

Nous pouvons voir à la Figure (figure 3.2), l'ensemble des relations explicites entre les critères et les solutions proposées :

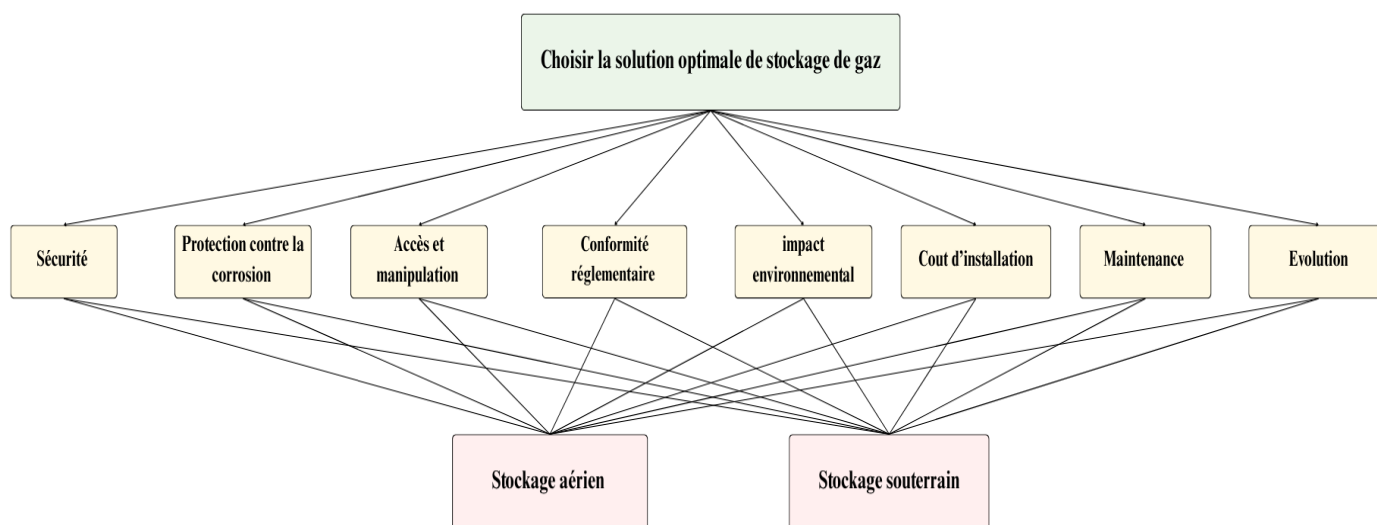


Figure 3.2 : Organigramme des critères et solutions.

Le tableau suivant représente la comparaison des critères et les notes attribuées selon le degré d'importance suivant l'échelle de Saaty (en annexe).

Cette comparaison a ensuite permis de calculer la moyenne géométrique associée à chaque critère, puis de déterminer leur poids relatif en divisant chaque moyenne par la somme des moyennes de l'ensemble des critères.

Tableau 3.2 : Calcul des poids de chaque critère

Critères	Sécurité	Protection contre la corrosion	Accès et manipulation	Conformité réglementaire	Impact environnemental	Coût d'installation	Maintenance	Évolution	Moyenne géométrique	Poids
Sécurité	1	3	5	3	2	3	5	7	3,14	0,29
Protection contre la corrosion	1/3	1	3	2	3	5	5	7	2,39	0,22
Accès et manipulation	1/5	1/3	1	1/3	1/5	3	2	5	0,77	0,07
Conformité réglementaire	1/3	1/2	3	1	1	4	3	7	1,59	0,15
Impact environnemental	1/2	1/3	5	1	1	3	5	5	1,67	0,15
Coût d'installation	1/3	1/5	1/3	1/4	1/3	1	2	3	0,56	0,05
Maintenance	1/5	1/5	1/2	1/3	1/5	1/2	1	3	0,45	0,04
Évolution	1/7	1/7	1/5	1/7	1/5	1/3	1/3	1	0,24	0,02
Somme	3,04	5,71	18,03	8,06	7,93	19,83	23,33	38,00	10,85	1,00

Les résultats du calcul (tableau 3.3) ont montré que la sécurité (0,29) et la protection contre la corrosion (0,22) sont les critères les plus influents dans le processus décisionnel, suivis de la conformité réglementaire et de l'impact environnemental (0,15 chacun).

Le tableau 3.3 a permis de tirer la matrice suivante :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 3 & 2 & 3 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1 & 3 & 2 & 3 & 5 & 5 & 7 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1/3 & 1/5 & 3 & 2 & 5 \\ 1/3 & 1/2 & 3 & 1 & 1 & 4 & 3 & 7 \\ 1/2 & 1/3 & 5 & 1 & 1 & 3 & 5 & 5 \\ 1/3 & 1/5 & 1/3 & 1/4 & 1/3 & 1 & 2 & 3 \\ 1/5 & 1/5 & 1/2 & 1/3 & 1/5 & 1/2 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

La normalisation de la matrice consiste à diviser chaque élément par la somme de sa colonne puis de calculer la moyenne de chaque ligne normalisée (ce sont les poids des critères).

La somme des colonnes figure dans le tableau suivant :

Tableau 3.3 : Somme des colonnes de la matrice

Critères	Somme
Sécurité	3,04
Protection contre la corrosion	5,71
Accès et manipulation	18,03
Conformité réglementaire	8,06
Impact environnemental	7,93
Coût d'installation	19,83
Maintenance	23,33
Évolution	38,00

Chaque valeur est par la suite divisée par la somme de sa colonne ce qui nous donne la matrice normalisée suivante :

$$A_{norm} = \begin{bmatrix} 0.329 & 0.525 & 0.277 & 0.372 & 0.252 & 0.151 & 0.214 & 0.184 \\ 0.110 & 0.175 & 0.166 & 0.248 & 0.378 & 0.252 & 0.214 & 0.184 \\ 0.066 & 0.058 & 0.055 & 0.041 & 0.025 & 0.151 & 0.086 & 0.132 \\ 0.110 & 0.088 & 0.166 & 0.124 & 0.126 & 0.202 & 0.129 & 0.184 \\ 0.164 & 0.058 & 0.277 & 0.124 & 0.126 & 0.151 & 0.214 & 0.132 \\ 0.110 & 0.035 & 0.018 & 0.031 & 0.042 & 0.05 & 0.086 & 0.079 \\ 0.066 & 0.035 & 0.028 & 0.041 & 0.025 & 0.025 & 0.043 & 0.079 \\ 0.047 & 0.025 & 0.011 & 0.018 & 0.025 & 0.017 & 0.014 & 0.026 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

En utilisant ces poids, les deux solutions (stockage souterrain sécurisé et stockage aérien ventilé) ont ensuite été évaluées selon leur performance sur chacun des critères. Les notes

attribuées à chaque solution ont été pondérées par les poids AHP, et les scores finaux ont été calculés.

Le tableau suivant présente le résultat de l'étude :

Tableau 3.4 : Choix de la solution

Critères	Poids	Stockage aérien	Stockage souterrain
Sécurité	0,289	2,02	1,44
Protection contre la corrosion	0,220	1,31	0,65
Impact environnemental	0,155	0,46	0,77
Conformité réglementaire	0,147	0,58	0,44
Accès et manipulation	0,072	0,35	0,14
Coût d'installation	0,053	0,26	0,15
Maintenance	0,042	0,16	0,12
Évolution	0,023	0,11	0,04
Score	1	5,30	3,79

Les résultats (Tableau 3.4) montrent que la solution de stockage aérien obtient un score final de 7,21, contre 5,15 pour la solution souterraine. Ce résultat s'explique principalement par une meilleure performance du stockage aérien sur les critères prioritaires que sont la sécurité, l'accessibilité, la conformité réglementaire et la capacité d'évolution. En revanche, le stockage souterrain présente un avantage sur le plan du coût de l'installation et de l'intégration dans l'infrastructure existante.

Ainsi, l'analyse multicritère permet de conclure que la solution de stockage aérien ventilé constitue l'option la plus favorable au regard des objectifs de sécurité, de conformité et de durabilité. Les notes de chaque critère sont justifiées (**Tableau 3.5**) et étudiée selon une base réglementaire :

Tableau 3.5 : Justification des note attribuées aux critères

Critères	Solutions	Notes	Justifications
Sécurité	Stockage aérien	7	En cas de fuite ou de surpression, le gaz peut se disperser naturellement dans l'air, réduisant significativement les risques d'explosion ou d'asphyxie. Cette solution est préférée pour les gaz inflammables (ex. H ₂ , SiH ₄) car elle permet une meilleure dissipation thermique et une surveillance visuelle directe. Conforme aux recommandations NFPA 55 et ISO 11625.
	Stockage souterrain	5	Les gaz lourds (Cl ₂ , BCl ₃ , PH ₃) peuvent s'accumuler au sol et dans les volumes bas, augmentant les risques d'explosion, d'asphyxie et de difficultés d'évacuation. Ventilation mécanique obligatoire. Risques aggravés en cas de détection tardive d'une fuite (NFPA 91, ATEX zone 1).
Protection contre la corrosion	Stockage aérien	6	Exposition à la pluie et à l'humidité, mais possibilité d'utiliser des matériaux inoxydables ou galvanisés, peintures époxy et au besoin des niches étanches. Contrôle visuel facilité. Corrosion maîtrisable par conception et inspection régulière (ISO 14713).
	Stockage souterrain	3	L'humidité stagnante, les infiltrations et la condensation favorisent une corrosion rapide, surtout en l'absence de ventilation naturelle. Maintenance difficile. Risques élevés de défaillance des équipements de sécurité à cause de l'environnement confiné.
Accès et manipulation	Stockage aérien	5	Accès facile par transpalette ou chariot élévateur. Manipulations simplifiées, visibilité directe sur les équipements. Faible fatigue des opérateurs. Conforme aux recommandations ergonomiques (INRS ED 6103).
	Stockage souterrain	2	Accès plus difficile (escaliers, rampes, trappes), ventilation obligatoire pour toute intervention, charge mentale accrue pour l'opérateur, visibilité réduite, risques d'accidents ergonomiques.
Conformité réglementaire	Stockage aérien	4	Plus simple à mettre en conformité avec les exigences de l'INERIS, de l'ADR et des directives ATEX. Surveillance visuelle, ventilation naturelle et séparation facilitée entre gaz incompatibles (directive SEVESO, ISO 11625).
	Stockage souterrain	3	Contraintes supplémentaires (ATEX zone 1 obligatoire, ventilation forcée, détection automatique, double confinement). Plus de prescriptions réglementaires à respecter (notamment pour les gaz toxiques ou explosifs).
Impact environnemental	Stockage aérien	3	Légèrement plus d'impact visuel et sonore, mais consommation énergétique nulle (pas de

			ventilation). Sensible aux intempéries, mais faible empreinte carbone.
	Stockage souterrain	5	Meilleure isolation thermique et sonore. Toutefois, nécessite ventilation électrique, pompes de relevage et surveillance continue. Consommation énergétique plus élevée mais meilleure intégration dans l'environnement.
Coût d'installation	Stockage aérien	5	Infrastructure simple (dalle + niches + sécurité ATEX), installation rapide, entretien peu coûteux.
	Stockage souterrain	3	Travaux lourds : terrassement, dalle renforcée, étanchéité, ventilation, système de détection avancé. Coût de mise en conformité plus élevé.
Maintenance	Stockage aérien	4	Inspection visuelle directe facilitée, détection immédiate des défauts, intervention rapide. Facilité d'accès pour maintenance préventive et curative.
	Stockage souterrain	3	Conditions de travail difficiles (espace confiné, humidité), surveillance et accès complexes. Nécessite arrêt de fonctionnement plus long pour intervention.
Évolution (scalabilité ou extension)	Stockage aérien	5	Extension facile par ajout de modules (containers, niches), peu de contraintes structurelles. Adaptabilité rapide.
	Stockage souterrain	2	Extension très coûteuse voire impossible sans nouvelles structures. Complexité de génie civil, permis de construire, arrêt d'activité obligatoire.

3.3.2 Référentiel technique pour la mise en place du stockage aérien :

À la suite du choix de la solution de stockage aérien ventilé, validée par l'analyse multicritère, nous avons élaboré un référentiel de mise en œuvre du stockage aérien conforme à la réglementation algérienne et aux normes internationales au niveau du CDTA (voir Annexe 09).

Synthèse du référentiel HSE pour le stockage aérien des gaz sous pression et produits dangereux au CDTA :

Dans le cadre de l'élaboration d'un système de stockage aérien sécurisé des gaz industriels utilisés dans les activités de microtechnologie du CDTA, un référentiel HSE complet a été conçu. Il s'appuie sur une approche multidimensionnelle croisant les exigences réglementaires algériennes, les normes internationales et les bonnes pratiques d'ingénierie.

Ce référentiel vise à fournir un outil de référence opérationnel pour tous les acteurs impliqués dans la conception, l'inspection, l'exploitation ou la mise en conformité des installations de stockage de gaz au CDTA, et se décline autour de six grands axes :

3.3.2.1 Cadre réglementaire, normatif et objectif général

Le référentiel repose sur une sélection rigoureuse des textes législatifs et réglementaires algériens et intègre les standards techniques ISO, les guides de l'INRS, et les principes du Système Général Harmonisé (SGH). Le référentiel s'appuie sur les principaux textes algériens relatifs :

- Aux installations classées (Décret exécutif n° 07-144 du 19 mai 2007),
- À la gestion des déchets (Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 ; Décret n° 06-104 du 28 février 2006),
- À la sécurité industrielle (Décret n° 05-08 du 17 janvier 2005 ; Décret n° 09-335 du 20 octobre 2009),
- À l'environnement (Loi n° 03-10 du 19 juillet 2003),
- À la prévention des catastrophes (Loi n° 04-20 du 25 décembre 2004 ; Décret n° 25-63 du 28 janvier 2025).

Il mobilise également les normes techniques ISO (11625, 5145, 10298, 11114), le SGH de l'ONU, et les guides pratiques de l'INRS (ED 6369, ED 986, ED 6106...).(voir Bibliographie)

L'objectif est de :

- Garantir la sécurité du personnel, des installations et de l'environnement ;
- Prévenir les risques technologiques majeurs : incendie, explosion, intoxication, réaction chimique ;
- Assurer la conformité des ICPE et installations de stockage ;
- Structurer les responsabilités, procédures et outils à toutes les étapes du cycle de vie du stockage.

3.3.2.2 Classification et typologie des gaz (fondement du zonage)

Une classification détaillée des gaz est établie, sur la base de leur risque principal (inflammabilité, toxicité, corrosivité, oxydation, asphyxie), complétée par les pictogrammes SGH et les Fiches de Données de Sécurité (FDS).

Des tableaux synthétiques ont été construits pour :

- Identifier les risques dominants associés à chaque gaz présent au CDTA ;
- Croiser les informations réglementaires (SGH, décret 06-104) et techniques (réactivité, instabilité) ;

- Proposer un zonage structuré du stockage aérien, avec des consignes précises de séparation, de ventilation et de signalisation.

3.3.2.3 Organisation physique du stockage aérien

Le référentiel définit des critères techniques précis pour l'aménagement des aires de stockage :

- Ségrégation par famille (inertes, inflammables, oxydants, corrosifs, toxiques...) avec distances minimales ou cloisons coupe-feu;
- Stabilisation des bouteilles séparation des pleines et des vides ;
- Signalisation réglementaire selon la norme SGH;
- Prévention de la corrosion.

Des exigences spécifiques sont détaillées selon le type de gaz :

- Gaz inflammables : stockage ventilé, éloignement des sources d'ignition, équipements ATEX.
- Gaz oxydants : exclusion stricte des graisses, séparation des combustibles.
- Gaz toxiques et corrosifs : EPI renforcés, douche de sécurité, détection gaz, ventilation ciblée.
- Gaz inertes : prévention du risque d'asphyxie par zonage et détection d'oxygène.

3.3.2.4 Intégration environnementale

Une attention particulière est portée à la prévention des pollutions :

a) Rejets atmosphériques

- Contrôle des émissions de gaz ;
- Ventilation naturelle ou assistée selon les scénarios de confinement ;
- Suivi des polluants atmosphériques (NO₂, O₃, particules) selon le décret n°06-02.

b) Pollution du sol

- Surfaces étanches avec pente d'écoulement, cuvettes de rétention ;
- Contrôle des infiltrations et rejets liquides;
- Prévention par conception (revêtements, drainage).

c) Déchets dangereux

- Typologie : résidus de gaz, EPI souillés, absorbants usagés ;
- Gestion réglementaire traçabilité, élimination via prestataires agréés ;

3.3.2.5 Raccordement et sécurité du réseau de distribution

Une analyse technique est dédiée au raccordement sécurisé des bouteilles :

- Dispositifs de détrompage pour éviter les erreurs de connexion ;

- Régulation de la pression (détendeur, manomètre, soupape) ;
- Réseau en matériaux compatibles, mises à la terre, vannes de sectionnement ;
- Précautions lors de la manutention : capots, chariots sécurisés, interdiction de levage par robinet, respect des règles de charge physique

3.3.2.6 Mesures de protection, de prévention et de suivi

Conformément au Décret exécutif n° 05-08 (article 8), la sécurité repose sur un ensemble cohérent de mesures :

- Ventilation et aération : naturelle pour les zones ouvertes ; la ventilation mécanique est imposée si les études de dangers (ICPE) le justifient.
- Habilitation du personnel : exigée par l'arrêté du 8 juillet 2014, avec formation obligatoire à la manipulation des gaz et des EPI.
- Détection de gaz : dispositifs adaptés à la nature et à la densité des gaz (seuils de déclenchement : 10 % LIE pour l'alerte, 25 % pour l'évacuation).
- Équipements de Protection Individuelle (EPI) : adaptés aux risques (APR, gants, lunettes, vêtements ignifugés).
- Signalisation et information : conforme à la norme ISO 11625 et aux obligations de la Loi n° 24-04 (droit à l'information, formation à la sécurité).
- Maintenance et inspection : contrôles réguliers imposés par le Décret n° 05-08 (article 12).
- Mise à la terre et protection contre la foudre : normes NF C 15-100 et NF EN 62305 appliquées pour limiter les surtensions en stockage aérien.
- **Plans d'urgence :**
 - **PII** (Plan Interne d'Intervention), requis par les **décrets 09-335 et 25-63**, incluant procédures d'évacuation, rôles du personnel, consignes par type de gaz.
 - **PPI** (Plan Particulier d'Intervention), si les effets d'un accident dépassent le périmètre du site.

Cas d'application au CDTA

Le référentiel a été appliqué au site du CDTA, avec :

- Un inventaire complet des gaz présents, leur classification SGH et les risques associés ;

- Une analyse de compatibilité chimique croisant les données FDS et les réactions possibles ;
- Des plans de zonage de stockage et des fiches par catégorie de gaz ;
- Des recommandations pratiques sur la ventilation, les distances de sécurité, l'accès, la détection, la prévention de l'asphyxie, de la corrosion ou des effets dominos.

Dans une logique de prévention des risques et d'amélioration continue des performances industrielles, nous avons élaboré un référentiel HSE structuré, destiné à accompagner la conception et la mise en œuvre d'un stockage aérien sécurisé des gaz industriels au sein du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA).

Ce référentiel permet de répondre de manière concrète et structurée aux enjeux de sécurité, de conformité réglementaire et de performance opérationnelle.

Il constitue un outil de référence pour les ingénieurs, les exploitants et les responsables HSE, en leur fournissant des lignes directrices concrètes pour la conception des installations, l'organisation physique des zones de stockage, la classification des gaz, la gestion des incompatibilités, la prévention des accidents majeurs, et la protection de l'environnement.

Au-delà de son utilité immédiate pour le CDTA, ce référentiel peut également servir de modèle reproductible pour d'autres installations industrielles en Algérie, confrontées à des problématiques similaires. Il illustre la manière dont une démarche d'ingénierie QHSE peut transformer un cadre réglementaire complexe en une solution pratique, adaptée et durable.

3.3.3 Mise en place d'un outil numérique et supervision pour le changement de gaz :

L'analyse des risques réalisée dans le chapitre précédent a mis en évidence la vulnérabilité du processus de changement des bouteilles de gaz, notamment en raison de sa dépendance aux gestes opératoires, de l'absence de traçabilité numérique et du manque de visibilité à distance lors de l'exécution des tâches. En réponse à ces constats, deux leviers de sécurisation ont été identifiés et développés dans le cadre de cette étude :

- (i) la digitalisation du protocole de changement par le biais d'une application interne,
- (ii) l'installation de dispositifs de surveillance vidéo adaptés aux zones ATEX.

3.3.3.1 Objectif de l'application :

L'objectif de cette application est de numériser intégralement le processus de changement de bouteilles qui est actuellement manuelle sous forme de tableau Excel (annexe).

3.3.3.2 Fonctionnalités de l'application :

L'application SafeGaz 1.0 a été conçue pour guider les opérateurs dans le changement sécurisé des bouteilles de gaz. Elle propose un mode pas-à-pas, interactif, avec une interface intuitive permettant de :

- Suivre précisément les 42 étapes réglementées pour le changement de bouteilles de gaz toxiques, corrosifs et inflammables ;
- Uniformiser la procédure entre les opérateurs
- Réduire le risque d'oubli ou de mauvaise manipulation ;
- Utiliser des minuteurs intégrés pour les actions critiques (aspiration, remplissage) ;
- Assurer la traçabilité des opérations effectuées, en précisant l'identité de l'intervenant, le type de gaz concerné et la date du changement ;
- Valider chaque étape avant de passer à la suivante, garantissant la conformité.

L'application intègre également un mode formation avec des quiz, des vidéos pédagogiques, et une check-list de sécurité.

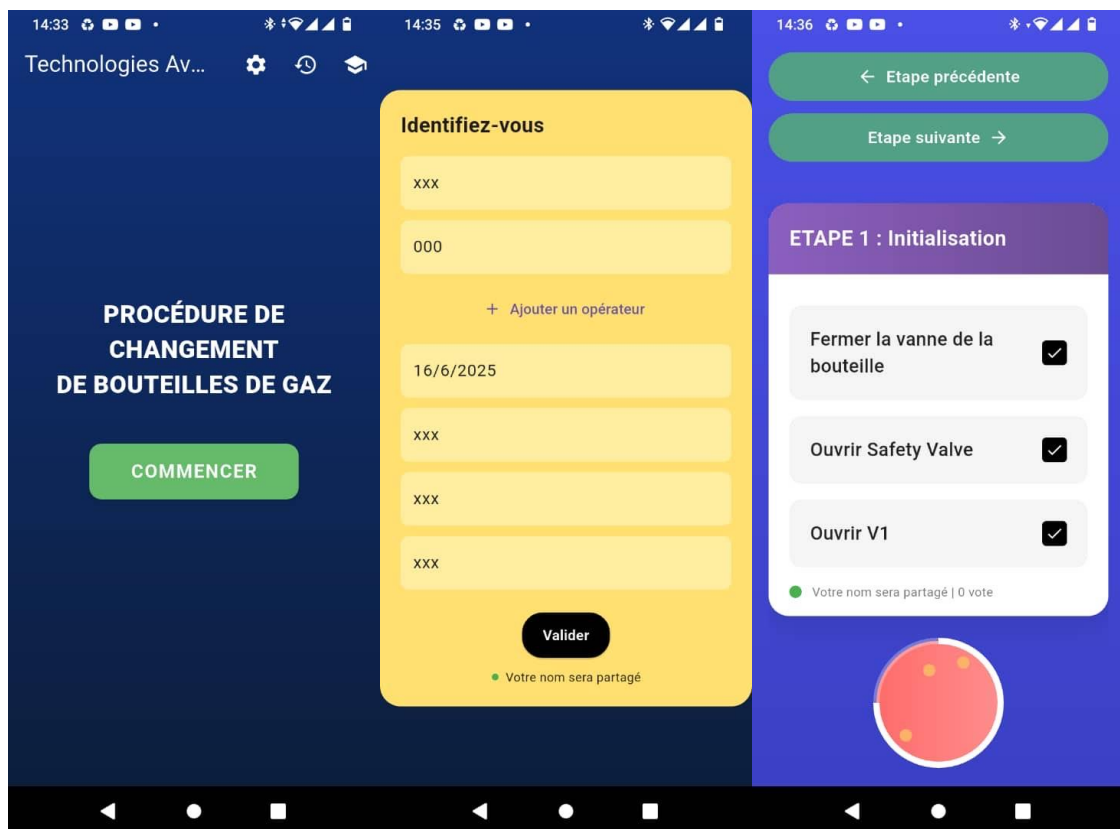


Figure 3.3 : Interface de l'application SafeGaz 1.0

Par ailleurs, l'application SafeGaz 1.0 a été conçue selon une architecture modulaire, adaptée aux contraintes techniques et organisationnelles du terrain. Elle permet une utilisation hors

ligne, garantissant ainsi la continuité opérationnelle en cas de coupure réseau, et offre une navigation séquentielle, guidant l'utilisateur à travers chaque étape du protocole. Le processus est structuré en blocs fonctionnels, intégrant des minuteurs automatiques pour les opérations critiques (telles que l'aspiration ou le rinçage), une validation systématique des actions réalisées, ainsi qu'une fonction d'enregistrement sécurisée. À l'issue de chaque intervention, un rapport horodaté est généré au format PDF, mentionnant l'identité de l'opérateur, le type de gaz, les observations éventuelles et les étapes validées. En complément, un module didactique a été intégré, incluant des supports visuels, des quiz de formation et des check-lists interactives. Cette double vocation – opérationnelle et pédagogique – fait de l'application un levier central de fiabilisation du processus de changement de bouteilles, tout en renforçant la culture sécurité des intervenants.

3.3.3.3 Surveillance vidéo des zones sensibles :

En complément de cette solution numérique, il est proposé de mettre en place un système de vidéosurveillance industrielle ciblée dans les zones de stockage et de manipulation des gaz dangereux, notamment ceux classés inflammables ou explosifs.

L'objectif de ce dispositif est de limiter la présence humaine dans les zones à risque, tout en permettant une surveillance en temps réel des opérations critiques à distance (notamment depuis un poste de supervision sécurisé).

Toutefois, ces zones étant classées ATEX (atmosphères explosibles), les équipements installés doivent être certifiés conformément à la directive européenne 2014/34/UE, applicable aux matériels destinés à être utilisés en zone explosive.

Il existe aujourd'hui sur le marché des caméras de vidéosurveillance antidéflagrantes (caméras ATEX) spécifiquement conçues pour ces environnements. Ces dispositifs présentent les caractéristiques suivantes :

- Boîtiers renforcés en acier inoxydable ou aluminium, certifiés pour une utilisation en zones ATEX 1 ou 2 (gaz) ;
- Étanchéité élevée (IP66/IP68), résistants à la corrosion chimique ;
- Fonctionnement sans production d'étincelles, avec électronique encapsulée ou pressurisée ;
- Intégration possible de caméras thermiques ou infrarouges pour la détection de points chauds ou de fuites ;
- Connexion en réseau (IP), permettant un contrôle et un enregistrement à distance via un système sécurisé.



Figure 3.4 : Caméras ATEX.

Parmi les modèles disponibles, la caméra ARMADEX Ex-M OZC 2, certifiée ATEX Zone 2, constitue une option compacte et performante. Elle offre un enregistrement en 4K, un zoom optique 5×, une excellente résistance aux environnements industriels hostiles (chutes, humidité, froid), et permet une surveillance mobile ou fixe. Son prix indicatif est d'environ 1 700 € HT, ce qui en fait une solution accessible et conforme aux exigences réglementaires.

L'installation de ce système de surveillance, couplée à l'application numérique de guidage, constitue un levier fort pour améliorer la sécurité du personnel, tout en renforçant la fiabilité des opérations et la maîtrise des risques liés aux gaz industriels.

3.4 Conclusion

Les analyses de risques menées dans les chapitres précédents ont mis en évidence plusieurs points critiques dans la gestion actuelle des bouteilles de gaz en salle blanche, en particulier en ce qui concerne le stockage, la traçabilité des opérations, et la sécurité lors des changements de bouteilles. Pour répondre à ces enjeux, trois leviers de maîtrise ont été définis, chacun apportant une réponse ciblée et complémentaire.

La première solution porte sur le choix d'un mode de stockage adapté aux contraintes du site. Deux options ont été étudiées : la construction d'un bunker souterrain sécurisé, permettant de centraliser toutes les bouteilles dans un espace isolé et renforcé ; et la mise en place de niches de stockage aérien ventilé à l'extérieur du bâtiment, plus accessibles et conformes aux normes ATEX. L'analyse multicritère AHP a permis d'objectiver ce choix en fonction de huit critères techniques et réglementaires. Les résultats ont montré une préférence nette pour le stockage aérien, plus favorable en termes de sécurité, de conformité et de flexibilité d'évolution.

La deuxième solution repose sur la digitalisation du processus de changement des bouteilles, aujourd'hui encadré par un tableau Excel statique. Une application numérique interne a été développée pour guider l'opérateur étape par étape, assurer une traçabilité nominative et horodatée, et centraliser l'historique des opérations. Cette solution permet non seulement d'améliorer le respect du protocole, mais aussi de faciliter les audits internes et d'anticiper les dérives ou oublis.

Enfin, un dispositif de vidéosurveillance avec caméras ATEX a été proposé pour les zones de stockage et de manipulation de gaz dangereux. Ces caméras antidéflagrantes permettent de superviser à distance les opérations critiques, de réduire la présence humaine dans les zones à risque, et de renforcer la réactivité en cas d'alerte ou d'anomalie.

Ces trois solutions, combinées constituent un système intégré de maîtrise des risques applicable à l'environnement contraint de la salle blanche, en respectant à la fois les exigences techniques, réglementaires et humaines.

Chapitre 4

"Projet Start up"

Développement d'une plate-forme
numérique d'audit.

Cas d'étude : clean-room, salle de stockage.

4.1 Introduction :

Dans un contexte industriel où la conformité et la maîtrise des risques sont devenues essentielles, les audits jouent un rôle central. Pour en améliorer l'efficacité, la digitalisation apparaît comme une solution incontournable. Ce chapitre présente un projet d'outil numérique d'audit, conçu pour offrir une solution moderne et accessible aux entreprises, en réponse à leurs besoins croissants en matière de sécurité, qualité et traçabilité.

4.2 Origine de l'idée et problématique constatée :

L'idée de concevoir une plateforme numérique d'audit est née d'un constat dans le monde professionnel : la majorité des audits sont encore réalisés de manière manuelle, à l'aide de tableaux Excel, de formulaires papier ou de documents Word, sans standardisation. Cette méthode, bien que courante, présente plusieurs limites : elle est laborieuse et lente, sujette aux erreurs, difficile à exploiter pour le suivi des actions correctives, et peu compatible avec les exigences modernes de qualité et de conformité.

Dans des secteurs sensibles tels que l'industrie, les laboratoires, les établissements de santé, ou encore les sites à risques, les audits réguliers sont pourtant essentiels pour garantir la sécurité, la conformité réglementaire et la fiabilité des procédés.

C'est dans ce cadre qu'est née l'idée de développer une solution numérique. Cette plateforme a été pensée comme un outil de terrain, accessible depuis un navigateur, capable de guider l'utilisateur à chaque étape du processus d'audit, tout en assurant une conservation sécurisée des données et une génération automatique des rapports.

Afin d'évaluer les perspectives de développement de ce projet, une analyse SWOT (forces, faiblesses, opportunités, menaces) a été réalisée, à deux niveaux : national (Algérie) et international :

Tableau 4.1 : Analyse SWOT Algérie

Forces	Faiblesses
- Offre unique sur le marché local - Gain de temps pour les industriels - Expertise technique exportable - Facilité d'adaptation au secteur hospitalier et pharmaceutique	- Faible digitalisation dans certains secteurs - Manque d'infrastructure cloud locale fiable - Résistance au changement dans les process qualité - Besoin de formation initiale des utilisateurs
Opportunités	Menaces

- Marché local en croissance dans la pharma et santé - Digitalisation des processus industriels soutenue par l'État - Peu de solutions concurrentes locales - Possibilité de partenariats publics/pr4és	- Instabilité économique - Budget limité des PME locales - Dépendance à la connexion Internet pour les outils cloud - Risque de piratage ou mauvaise perception de la sécurité informatique
--	--

Tableau 4.2 : Analyse SWOT internationale

Forces	Faiblesses
- Outil digital répondant à des normes mondiales (ISO 14644, GMP) - Croissance des audits numériques - SaaS facilement scalable - Conformité et sécurité = priorité dans tous les pays	- Forte concurrence sur les marchés matures (USA, Europe) - Nécessité d'une certification ou label qualité pour être crédible - Besoin de support multilingue et juridique selon les pays
Opportunités	Menaces
- Marché mondial des salles blanches estimé à +10 % de croissance/an - Demande croissante de solutions SaaS post-COVID - Ouverture vers l'IoT, la traçabilité, et l'IA - Subventions européennes ou internationales pour la digitalisation industrielle	- Normes et réglementations différentes selon les pays - Coût élevé de l'acquisition client à l'international - Défi de traduction/adaptation culturelle - Solutions concurrentes déjà établies (ex. : Qualio, MasterControl, Intelix)

Parmi les forces identifiées en Algérie, on note l'absence de solution locale équivalente.

À l'international, la plateforme se positionne comme un outil Software as a Service (SaaS) conforme aux normes mondiales, dans un marché des salles blanches en forte croissance.

En revanche, certains défis doivent être anticipés : résistance au changement et une forte concurrence sur les marchés matures à l'export. Ces éléments soulignent la nécessité d'un positionnement stratégique clair, d'une certification qualité, et d'un accompagnement des utilisateurs.

4.3 Présentation du site web :

AUDITORIUM est une plateforme numérique conçue pour faciliter et professionnaliser la réalisation des audits dans différents domaines. Accessible via un navigateur web sécurisé, elle propose une interface utilisateur intuitive et modulable, adaptée aussi bien aux auditeurs débutants qu'aux experts.

L'objectif principal d'AUDITORIUM est de centraliser l'ensemble des données d'audit dans un espace unique, garantissant ainsi la traçabilité, la standardisation et la facilité d'exploitation des résultats.

Le site AUDITORIUM propose une série d'outils intégrés, dont :

- Des check-lists personnalisées par secteur d'activité,
- Des guides normatifs simplifiés,
- Des formulaires d'évaluation interactive,
- Un espace d'échange sécurisé entre auditeurs et entreprises.

Grâce à ces fonctionnalités, la plateforme permet aux utilisateurs de détecter rapidement les défauts ou les dérives susceptibles de compromettre les objectifs qualité ou sécurité, tout en bénéficiant d'un accompagnement professionnel dans la mise en conformité.

En outre, AUDITORIUM ambitionne de devenir un acteur de référence dans l'audit digitalisé, en proposant à terme une offre de service complète en mode SaaS, accessible depuis n'importe quel support (ordinateur, tablette, smartphone), et compatible avec les systèmes de management qualité (SMQ) existants.

4.4 Fonctionnalités principales du site :

La plateforme AUDITORIUM a été pensée pour offrir un outil complet et structuré, tout en restant simple d'utilisation. Elle intègre plusieurs fonctionnalités clés, organisées autour de trois grands axes : préparation, réalisation et exploitation des audits.

4.4.1 Page d'accueil :

La page d'accueil constitue le point d'entrée public de la plateforme. Elle présente le slogan de la start-up : "***Contrôlez votre environnement. Simplifiez vos audits.***", et donne à l'utilisateur la possibilité de se connecter à son espace sécurisé ou de créer un compte. Elle contient également une brève présentation du concept d'audit, de ses enjeux dans les milieux critiques (salles blanches, laboratoires, zones à risques), et un lien "En savoir plus" qui renvoie à une description détaillée des objectifs et des fonctionnalités du site.

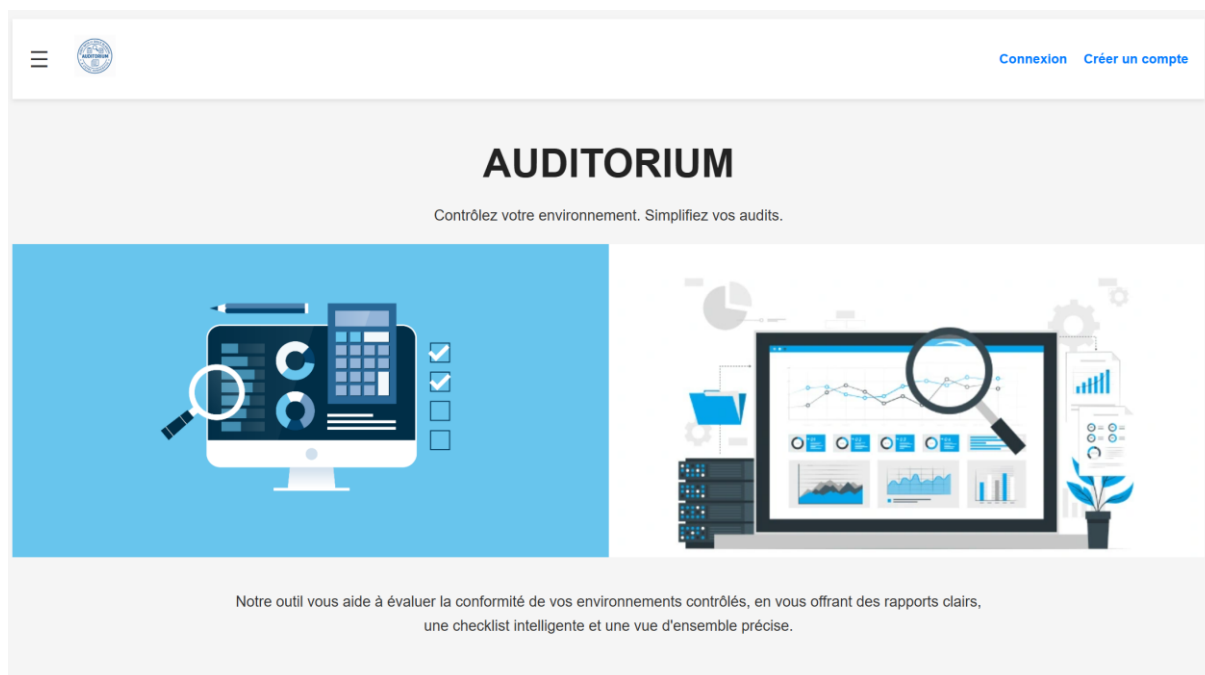


Figure 4.1 : page d'accueil du site AUDITORIUM.

4.4.2 Interface utilisateur post-connexion :

Une fois connecté, l'utilisateur accède à une interface structurée autour de plusieurs modules clés, présentés sous forme de boutons ou d'onglets clairs :



Figure 4.2 : Tableau de bord personnalisé.

Les fonctionnalités les plus importantes sont :

- Check-lists interactives : outils principaux permettant aux entreprises de réaliser des auto-évaluations ciblées, classées par domaine (propreté, sécurité gaz, traçabilité, équipements, etc.). Chaque check-list suit une logique conforme aux référentiels ISO ou GMP, avec possibilité de générer un rapport en PDF.



Figure 4.3 : Fenêtre listes des checklists d'audit.

Ici l'utilisateur clique sur le type d'audit qu'il souhaite faire et il aura la checklist suivant la norme associée.

Voici un exemple de checklist disponible :

Figure 4.4 : Exemple de checklist.

- **Guide numérique** : cette section fournit un guide complet avec toutes les étapes pour la mise en place et la bonne préparation de l’audit, dans le but que les entreprises soient prêtes et disposent de tous les documents et ressources pour une bonne conduite d’audit.

AUDITORIUM [Accueil](#)

Guide pratique de l'audit

1. Comprendre le contexte

- Type d'audit : Interne, externe, client, réglementaire
- Objectif : Conformité, amélioration, certification
- Référentiel : ISO 9001, GMP...

2. Constituer une équipe dédiée

- Désigner un responsable de l'audit
- Identifier les interlocuteurs clés par processus
- Définir les rôles et disponibilités pendant l'audit

3. Rassembler la documentation

Manuel qualité

Description : Document décrivant le système de management de la qualité.

Exemples : Structure qualité, politique qualité, objectifs qualité.

Procédures / instructions

Description : Procédures décrivant les processus clés et instructions de travail.

Exemples : Procédure de nettoyage, gestion des non-conformités, traçabilité.

Figure 4.5 : Guide pratique de l’audit.

- **Formulaire de demande d’audit** : permet à une entreprise de solliciter une intervention personnalisée d’un auditeur partenaire de la plateforme. Le formulaire recueille les informations clés (type de site, référentiel souhaité, date, contacts...).

[Retour à l'accueil](#)

Formulaire de Demande d'Audit

Informations générales

Nom de l'établissement :

Personne à contacter :

Email :

Téléphone :

Détails de l'audit

Type d'audit souhaité :

-- Choisir --

Secteur concerné :

Date ou période souhaitée :

Figure 4.6 : Formulaire demande d’audit

- Glossaire technique : module éducatif rassemblant les termes techniques et réglementaires essentiels à la compréhension des audits en milieux contrôlés. Il constitue un outil de sensibilisation à la culture qualité et sécurité.



Figure 4.7 : Glossaire des termes techniques.

4.5 Analyse stratégique et modèle économique :

Le projet AUDITORIUM, en tant que solution numérique d’audit et de gestion des équipements sensibles, s’adresse à un large éventail de clients potentiels dans les secteurs critiques, soumis à des exigences normatives strictes.

La plateforme fonctionnera sur un modèle SaaS, avec un système d’abonnement mensuel.

Deux offres ont été définies : une formule Basic, donnant accès aux check-lists, guides, glossaire et veille réglementaire, et une formule Pro, incluant des fonctionnalités avancées telles que les demandes d’audit, les rapports personnalisés, la gestion multi-utilisateur et un tableau de bord évolutif. Les prix moyens des clients est estimé à :

- Formule Basic : 7 500 DA/mois.
- Formule Pro : 12 500 DA/mois (usage élargi ou multi-utilisateur)

4.5.1 Hypothèse de coût de réalisation du site

Les coûts de développement et de mise en ligne du site (infrastructure technique, hébergement, sécurité, design responsive, base de données, intégration des outils d'audit) sont estimés à environ **400 000 DA la première année**, répartis ainsi :

Tableau 4.3 : Répartitions des montants et des postes de travail.

Poste	Montant estimé
Développement site (freelance/SSII)	250 000 DA
Hébergement + nom de domaine + certificat SSL (3 ans)	45 000 DA
Maintenance et évolutions annuelles	60 000 DA
UI/UX design + logo + charte graphique	45 000 DA
Total	400 000 DA

Ces résultats sont rendus possibles grâce à l'effet de mutualisation des coûts, à la réutilisabilité de la plateforme, et à l'augmentation progressive du nombre d'abonnements.

Tableau 4.4 : Projection financière sur 3 ans

Année	Clients estimés	CA estimé	Charges	Résultat net
1	20	2 400 000 DA	1 375 000 DA	1 025 000 DA
2	50	5 850 000 DA	1 100 000 DA	4 750 000 DA
3	100	10 900 000 DA	1 350 000 DA	9 550 000 DA

L'investissement initial dans le développement du site est absorbé dès la première année, grâce à la combinaison des revenus récurrents et ponctuels. L'intégration des audits à la demande constitue une source de revenus flexible et facilement scalable, notamment en mobilisant un réseau d'auditeurs partenaires. La marge nette s'améliore significativement dès la deuxième année, grâce à la réutilisabilité de la plateforme, à la fidélisation des clients et à une structure de coûts relativement stable.

Voici le graphique représentant la projection financière d'AUDITORIUM sur 3 ans, incluant le chiffre d'affaires, les charges et le résultat net.

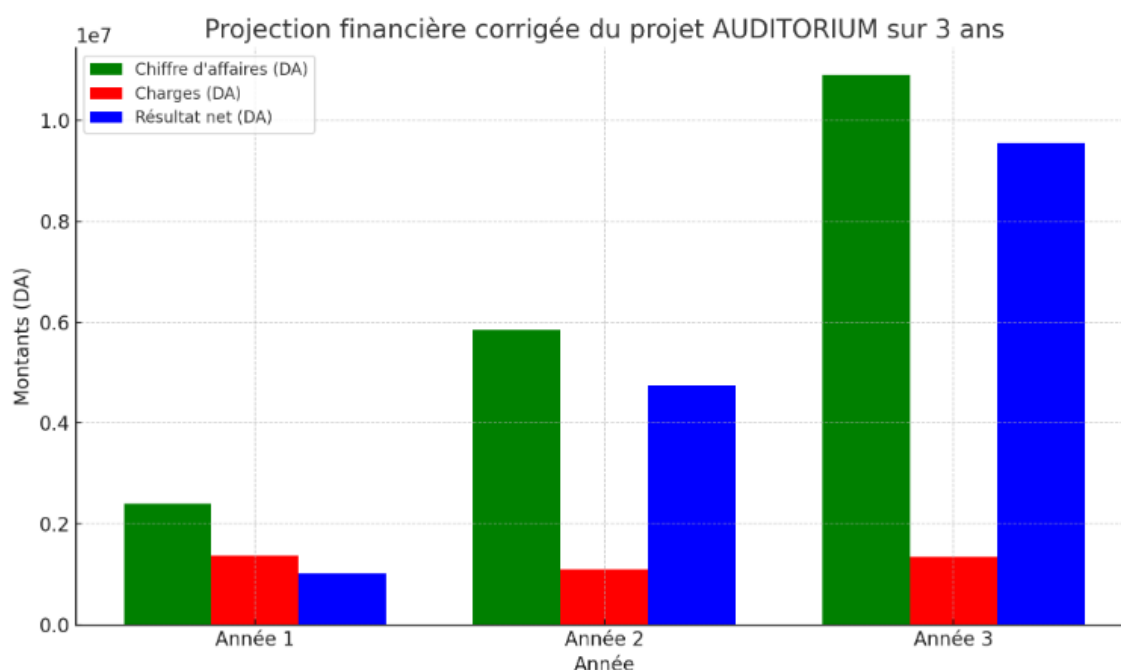


Figure 4.8 : Projection financière d’AUDITORIUM sur 3 ans

Le modèle économique de la start-up AUDITORIUM a été structuré à l’aide de la méthode Business Model Canvas, qui permet de représenter de manière synthétique les composantes clés du projet. Ce schéma met en évidence les segments de clients visés, les propositions de valeur, les canaux de distribution, les sources de revenus, ainsi que les coûts et partenaires stratégiques. Il constitue une base utile pour piloter le lancement de la start-up, affiner le positionnement commercial et anticiper les besoins de financement à court et moyen terme.

Voici une synthèse du modèle économique et stratégique d’AUDITORIUM, selon la méthodologie Business Model Canvas :

Tableau 4.: Business Model Canvas de la start up AUDITORIUM

Le Business Model Canvas

Réalisé pour : Site Web AUDITORIUM

Réalisé par : Lina Chabha SI AMER & Chahrazed TALBI

Date : 20/06/2025

Version : 2.0

Partenaires Clés	Activités Clés	Propositions de Valeur	Relations avec les Clients	Segments de Clientèle
- Experts en développement web. - Spécialistes QHSE, auditeurs et ingénieurs en sûreté de fonctionnement. - Utilisateurs industriels pilotes (retours terrain). - Hébergeurs cloud certifiés pour la sécurité des données.	- Analyse fonctionnelle des besoins des utilisateurs QHSE. - Développement de modules d'audit et de reporting automatisé. - Intégration de référentiels réglementaires (ICPE, équipements sous pression...). - Déploiement d'interfaces sécurisées et ergonomiques. - Test, validation et maintenance de la plateforme.	- Centralisation de l'ensemble des audits techniques d'équipements sensibles. - Automatisation de la planification, la traçabilité et l'archivage des interventions. - Fiabilité du processus d'audit selon les et normes ISO. - Réduction significative des coûts logistiques liés aux audits traditionnels. - Gain de temps, sécurité des données, conformité réglementaire. - Outil innovant et inédit dans le contexte industriel algérien.	- Abonnement et fidélisation clients. - Accompagnement personnalisé à la prise en main. - Interface de support technique (chatbot, ticketing). - Mises à jour automatiques et service d'alertes réglementaires. - Plateforme collaborative ouverte à la co-construction (suggestions, évolutions).	- Entreprises Industrielles classées (ICPE, SEVESO). - Responsables QHSE, ingénieurs maintenance. - Gestionnaires d'équipements à risque (pressions, gaz, produits chimiques). - Acteurs du transport et de la logistique sensible. - Entreprises pharmaceutiques - Laboratoires d'analyse - Hôpitaux / établissements de santé - Industrie agroalimentaire - Entreprises utilisant des gaz Industriels
	Ressources Clés - Ingénieurs développeurs, experts QHSE, auditeurs, testeurs. - Base de données normalisée, serveurs sécurisés. - Code source, interfaces utilisateurs, modules ISO. - Investissement initial pour l'hébergement, le développement et le marketing.		Canaux de Distribution - Partenariats avec fabricants ou installateurs de salles blanches. - Distribution de flyers. - Accès direct via le site web : https sécurisé, espace client personnalisé. - Communication ciblée sur réseaux professionnels (LinkedIn, salons industriels). - Démonstrations et webinaires pour sensibiliser les utilisateurs industriels.	
Structure des Coûts			Sources de Revenues	
- Coûts fixes : développement du logiciel, hébergement sécurisé, support client. - Coûts variables : communication et marketing digitale, publicités, mises à jour, évolution des modules. - Investissements dans la conformité réglementaire et la cybersécurité.			- Services personnalisés (accompagnement à la conformité, audits à distance) - Formule abonnement annuel ou mensuel selon le volume de données et services activés. - Vente de modules spécialisés (audit énergie, déchets, équipements sous pression...). - Formations et certifications intégrées (en option).	

4.6 Cas d'étude : simulation d'un audit de stockage :

Dans le cadre de ce projet, un audit interne a été réalisé au sein du CDTA à l'aide de la plateforme numérique **AUDITORIUM**. Ce site, développé dans le cadre de ce mémoire, a permis de structurer la démarche d'audit, de générer une checklist adaptée au processus de gestion des gaz et de collecter les informations en temps réel. La figure suivante montre la checklist générée par notre site :

The screenshot displays the 'Check-list pour un audit de vérification de stockage de bouteille de gaz conformément à la norme ISO 11625'. It includes a 'Retour à l'accueil' link in the top right. The checklist is divided into two main sections. The first section contains three items: 'Localisation du stockage clairement identifiée et signalée' (radio buttons for 'Oui' and 'Non'), 'Registre des gaz présents à jour (type, quantité, risque)' (radio buttons for 'Oui' and 'Non'), and 'Fiches de données de sécurité (FDS) disponibles et accessibles' (radio buttons for 'Oui' and 'Non'). Each item has a text input field for remarks. The second section is titled 'Conformité des installations' and includes a sub-section 'Infrastructure et ventilation'. It contains two items: 'Zone de stockage hors-sol, sèche, bien ventilée' (radio buttons for 'Oui' and 'Non') and 'Température < 65°C' (radio buttons for 'Oui' and 'Non'), both with remark input fields. A final item, 'Présence d'une zone de rétention en cas de fuite (liquide/gaz)', has radio buttons for 'Oui' and 'Non' (with 'Non' selected).

Figure 4.9 : réalisation de l'audit a travers le site AUDITORIUM

L'utilisation de l'outil a facilité le suivi des points de contrôle, la traçabilité des observations et la formalisation des non-conformités identifiées. Cette expérience a permis de valider l'utilité opérationnelle de la solution proposée dans un contexte réel.

A la fin de la réalisation de l'audit, l'opérateur a la fonctionnalité de télécharger le PV de l'audit :

The screenshot shows the 'Conclusion de l'audit' section. It features three rows of radio button options: 'Conformité réglementaire' (Conforme, Non conforme), 'Niveau de sécurité du site' (Satisfaisant, À améliorer, Critique), and 'Priorité des actions correctives' (Immédiate, Court terme, Suivi périodique). Each row has a corresponding 'Commentaires / Actions correctives' text input field. At the bottom, there is a large blue button labeled 'Recevoir le PV'.

Figure 4.10 : fin de procédure de l'audit

De ce fait l'opérateur recevra toutes les réponses en un PV :

```

PROCÈS-VERBAL D'AUDIT - Check-list pour un audit de vérification de stockage de bouteille de gaz conformément à la norme ISO 11625

Date et heure de l'audit : 29/05/2025 13:39:45

> Localisation du stockage clairement identifiée et signalée : Oui
> Remarque : Salle pour chaque type de gaz
> Registre des gaz présents à jour (type, quantité, risque) : Oui
> Remarque : L'inventaire est mis à jour
> Fiches de données de sécurité (FDS) disponibles et accessibles : Oui
> Remarque : Tous les produits sont identifiés et les FDS sont mises à la disposition des opérateurs.
> Zone de stockage hors-sol, sèche, bien ventilée : Oui
> Remarque :
> Température < 65°C : Oui
> Remarque :
> Présence d'une zone de rétention en cas de fuite (liquide/gaz) : Non
> Remarque :

```

Figure 4.11 : PV de l'audit

Ainsi, l'utilisation du site **AUDITORIUM** a rendu l'audit plus simple, rapide et structuré. L'interface intuitive, les outils intégrés et la traçabilité automatique ont largement facilité le travail d'audit par rapport aux méthodes classiques sur support papier, tout en garantissant une meilleure fiabilité des données collectées.

4.7 Conclusion :

Le développement de la start-up AUDITORIUM constitue une avancée majeure dans la concrétisation des solutions proposées, en les transformant en outils numériques accessibles, innovants et adaptés aux besoins du terrain. Grâce à sa plateforme d'audit en ligne, elle répond à une réelle demande de digitalisation des démarches QHSE dans les environnements sensibles. Alliant simplicité d'utilisation, conformité réglementaire et viabilité économique, AUDITORIUM apporte une réponse moderne aux enjeux de sécurité industrielle. Ce projet représente également une opportunité stratégique pour le CDTA, en lui permettant de valoriser ses travaux de recherche, de renforcer son engagement dans l'innovation, et d'étendre son impact au-delà du cadre institutionnel, vers une gestion des risques plus autonome, connectée et durable.

Conclusion Générale

Notre mémoire de fin d'études a été l'occasion de conduire une réflexion approfondie et structurée autour d'un enjeu majeur de la maîtrise des risques industriels : la sécurisation et la gestion réglementaire du stockage aérien des gaz et produits dangereux en Algérie. À travers l'étude approfondie de ce dernier, nous avons démontré l'importance d'une approche multidisciplinaire et réglementaire dans la conception, la gestion et la sécurisation de ces installations à risques.

Nous avons d'abord abordé le sujet par une analyse des risques, celle-ci a constitué un axe central de notre démarche. Ainsi, à l'issue d'un processus structuré d'identification des dangers appuyé par des outils tels que le diagramme d'Ishikawa, l'EVRP, l'AMDEC, et l'analyse multicritère, nous avons pu identifier les causes potentielles de dysfonctionnement, évaluer leur criticité et proposer des mesures préventives et correctives robustes. Cette analyse de risque a été le socle de notre référentiel.

Sur le plan technique, nous avons développé référentiel pour la conception d'un stockage aérien de bouteilles de gaz sous pression, en tenant compte des spécificités des gaz dangereux spéciaux stockés au Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA). L'une des forces de notre travail réside dans la ségrégation stricte des familles de gaz, la prise en compte des incompatibilités chimiques, et la définition de conditions techniques normalisées (implantation, ventilation, accessibilité, protection mécanique, etc.). L'intégration de distances de sécurité normalisées, la définition des zones ATEX et la configuration du réseau d'alimentation en gaz à partir des bouteilles ont permis de concevoir un modèle fonctionnel de distribution sécurisé.

Nous avons également intégré les dispositions environnementales générales relatives au stockage : revêtement du sol, pente, gestion des eaux de ruissellement, prévention de la corrosion et confinement des fuites. Le volet corrosion, souvent négligé dans les stockages en extérieur, a été traité avec rigueur en s'appuyant notamment sur les articles 8 et 12 du décret exécutif n°21-257 et l'article 31 du décret n°21-315, garantissant ainsi une approche durable et conforme à la réglementation.

Du point de vue réglementaire, un travail de recensement a été mené en ce qui concerne les textes algériens en vigueur (Loi n°90-11 sur la sécurité au travail, Loi 04-20 pour la prévention des accidents majeurs dans le cadre du développement durable, Décret 06-104 pour fixer la nomenclature des produits dangereux, etc.). Cette démarche a permis de garantir la conformité du référentiel du stockage aérien en Algérie tout en renforçant la culture réglementaire au sein de l'entreprise.

Le volet normatif n'a pas été en reste, avec la prise en compte de référentiels reconnus tels que les normes ISO (9001, 3864, 11625), les normes européennes NF (NF – C 15-100, NF EN 62305), les fiches INRS, ainsi que les recommandations du SGH (Système Général Harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques). L'intégration de ces normes a servi de socle à l'élaboration du « Référentiel de sécurité pour le stockage des gaz sous pression et produits dangereux » et à le rendre applicable et cohérent.

Une dimension importante de ce mémoire a porté sur l'amélioration continue. L'élaboration d'un référentiel de conception d'un stockage aérien des gaz sous-pression, combinée au développement de l'application SafeGaz 1.0, vise à instaurer une dynamique durable de traçabilité, de digitalisation des procédures, et d'optimisation continue des pratiques. Ce projet s'inscrit ainsi pleinement dans une logique d'évolution des systèmes industriels vers plus de sécurité, d'efficacité et de conformité.

Enfin, dans une logique de valorisation des acquis et d'ouverture vers le monde professionnel, nous avons intégré à notre démarche une dimension entrepreneuriale concrète à travers la création d'un projet de start-up. Ce dernier prend la forme d'un site web professionnel, vitrine d'un bureau d'études spécialisé dans l'audit. Fondé sur les normes internationales, notamment les référentiels ISO, ce projet vise à moderniser et digitaliser les processus d'audit, en proposant des prestations structurées, fiables et à forte valeur ajoutée.

L'objectif est de faciliter, sécuriser et optimiser les audits en réduisant significativement les délais, les coûts de déplacement et les contraintes logistiques, tout en garantissant une expertise technique pointue. Ce volet entrepreneurial complète ainsi notre approche technique et réglementaire, en inscrivant notre travail dans une dynamique d'innovation, de professionnalisation et de pérennité économique.

Pour finir, ce travail constitue une synthèse concrète des compétences développées au cours de notre formation d'ingénieur en QHSE-Gestion des Risques Industriels. Il nous a permis de mettre en œuvre nos compétences en gestion des risques, en amélioration continue, en réglementation et en digitalisation, tout en développant un regard critique, analytique et systémique sur des problématiques complexes. Il ouvre également des perspectives concrètes d'application industrielle, et pose les bases pour de futurs travaux d'optimisation, de veille réglementaire, de prévention, de la performance et de la responsabilité en milieu industriel.

Bibliographie :

- [1] Whyte, W. « Cleanroom Technology: Fundamentals of Design, Testing and Operation ». Wiley Editorial, vol 2, 2001.
- [2] CSB. **U.S. Chemical Safety Board. (2025, June 18).** U.S. Chemical Safety Board releases second update on fatal explosion at Givaudan facility in Louisville, KY. *CSB News Release*. Consulté à l'adresse « <https://www.csb.gov/us-chemical-safety-board-releases-second-update-on-fatal-explosion-at-givaudan-facility-in-louisville-ky/> » consulté en Mai 2025.
- [3] H.ZITOUNI. « Etude de danger du Centre de développement des technologies avancées BABA HASSEN, Pour l'octroi de l'autorisation d'établissement classée », document interne du CDTA, 2023.
- [4] Google earth, consulté en Mai 2025.
- [5] Wong, K. « Using an Ishikawa diagram as a tool to assist memory and retrieval of relevant medical cases from the medical literature ». Wong Journal of Medical Case Reports 2011.
- [6] Bureau d'étude QUALIPEC. « AUDIT ENVIRONNEMENTAL DU CENTRE DE DEVELOPEMENT DES TECHNOLOGIES AVANCEES CDTA BABA HASSEN », document interne du CDTA, 2023.
- [7] INRS. « Les bouteilles de gaz : identification, prévention lors du stockage et de l'utilisation ». ED6364, 2020, P 19-33.
- [8] M. Maino, P. Pérez, P. Oviedo, G. Sotomayor & P. Abalos « The analytic hierarchy process in decision making for caprine health programmes ». Rev. sci. tech. Off. int. Epiz., 2012, P 890-895.
- [9] Saaty T.L. « The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. The analytic hierarchy process series », Vol. 1. RWS publications. Pittsburgh, Pennsylvania, 1996.
- [10] O.Boutou, G.Landy, B.Saintvoirin, « AMDEC Guide Pratique ». AFNOR. 2ed, 2007, P33-95 P141-145.

Bibliographie du référentiel :

1/ Lois

Loi n° 01-19 du ramadhan 1422 correspondant au 12 décembre 2001, relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets. *Journal officiel de la République Algérienne*, n° 77.

Loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. *Journal officiel de la République Algérienne*, n° 43.

Loi n° 24-04 du 16 Chaâbane 1445 correspondant au 26 février 2024 portant les règles de prévention, d'intervention et de réduction des risques de catastrophes dans le cadre du développement durable. *Journal officiel de la république algérienne* n° 16

2/ Décrets

Décret exécutif n° 05-08 du 17 janvier 2005, fixant les conditions de mise sur le marché, d'utilisation et de stockage des substances et préparations chimiques dangereuses. *Journal officiel de la République Algérienne*, n° 4.

Décret exécutif n° 05-315 du 6 Chaâbane 1426 correspondant au 10 septembre 2005, fixant les modalités de suivi et d'élimination des déchets dangereux. *Journal officiel de la République Algérienne*, n° 62.

Décret exécutif n° 06-02 du 7 janvier 2006, fixant les objectifs de qualité de l'air et les seuils limites de pollution. *Journal officiel de la République Algérienne*, n° 01.

Décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006, relatif à la gestion des produits chimiques dangereux. *Journal officiel de la République Algérienne*, n° 13.

Décret exécutif n° 06-141 du 19 avril 2006, fixant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels. *Journal officiel de la République Algérienne*, n° 26.

Décret exécutif n° 06-198 du 31 mai 2006, fixant les modalités d'élaboration des études de dangers et d'impact pour les installations classées. *Journal officiel de la République Algérienne*, n° 42.

Décret exécutif n° 07-144 du 19 mai 2007, fixant les règles générales d'implantation, d'exploitation et de contrôle des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). *Journal officiel de la République Algérienne*, n° 34.

Décret exécutif n° 09-335 du Aouel Dhou El Kaada 1430 correspondant au 20 octobre 2009, fixant les modalités d'élaboration et de mise en œuvre des plans internes d'intervention. *Journal officiel de la République Algérienne*, n° 60.

Décret exécutif n° 21-257 du 21 juillet 2021, relatif à la sécurité des installations industrielles classées. *Journal officiel de la République Algérienne*, n° 64.

Décret exécutif n° 25-63 du 28 janvier 2025, fixant les conditions et les modalités d'élaboration, de mise en œuvre et de gestion des plans d'intervention en matière de risques de catastrophes. *Journal officiel de la République Algérienne*, n° 7.

3/ Arrêté

Arrêté interministériel du 8 juillet 2014, fixant les prescriptions de formation, d'habilitation et de protection du personnel exposé à des substances chimiques dangereuses. *Journal officiel de la République Algérienne*, n° 23.

Normes et référentiels internationaux

International Organization for Standardization. (2004). ISO 5145:2004 – Cylinder valve outlets for gases and gas mixtures – Selection and dimensioning. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2007). ISO 11625:2007 – Gas cylinders – Safe handling and storage. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2014). ISO 10298:2014 – Determination of toxic and corrosive hazards of gases and vapours. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2012). ISO 11114 series – Transportable gas cylinders – Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents. Geneva: ISO.

NF E29-650. (2004). *Robinets de bouteilles de gaz – Connexions normalisées pour les raccordements.* Paris : AFNOR.

NF C 15-100. (2020). *Installation électrique basse tension – Règles de conception et de sécurité.* Paris : AFNOR.

NF EN 62305. (2012). *Protection contre la foudre – Principes généraux.* Paris : AFNOR.

NFPA 55. (2020). *Compressed Gases and Cryogenic Fluids Code.* National Fire Protection Association.

Système Général Harmonisé des Nations Unies (SGH). (2021). *Classification et étiquetage des produits chimiques – 9e édition révisée.* New York: Nations Unies.

Référentiels INRS (France)

INRS. (2013). *ED 6369 – Les gaz industriels en bouteille : choix, stockage et manipulation.* Institut National de Recherche et de Sécurité. Paris : INRS.

INRS. (2010). *ED 986 – Stockage des produits chimiques incompatibles.* Paris : INRS.

INRS. (2008). *ED 6015 – Le stockage des produits chimiques au laboratoire.* Paris : INRS.

INRS. (2007). *ED 88 – Repérage des tuyauteries de gaz : codage couleur et pictogrammes.* Paris : INRS.

INRS. (2015). *ED 6161 – La charge physique de travail.* Paris : INRS.

INRS. (2021). *ED 6106 – Protection respiratoire contre les gaz dangereux.* Paris : INRS.

Annexes

Unité de travail	Phénomène dangereux	Nature du risque	Dommages/conséquences	P	G	C	Mesures existantes	P'	G'	C'	Actions de protection
Salle blanche	Surpression ou dépression anormale.	Physique	Déstabilisation des zones de confinement (Peut entraîner l'entrée d'air contaminé.).	2	4	8	Maintenance préventive régulière du système de traitement d'air. Présence d'alarmes	1	4	4	
	Variations brusques de température ou d'humidité.		Risque pour la stabilité des produits ou pour les équipements sensibles (condensation, corrosion).	3	3	9	Capteurs de température / humidité haute précision. Climatisation spécifique pour salle blanche. Contrôle permanent via logiciel de gestion environnementale.	1	3	3	
	Rayonnements non ionisants (Exposition aux UV dans les systèmes de décontamination.).		Risques oculaires ou cutanés pour le personnel.	2	3	6	Blindage UV des systèmes de décontamination (enceintes fermées, matériaux opaques). Équipements de protection individuelle (EPI). Formations du personnel aux risques liés aux UV.	1	2	2	
	Nuisances sonores.		Risques auditifs.	2	2	4	Port de protections auditives. Limitation du temps d'exposition dans les zones les plus bruyantes.	1	2	2	
	Contamination particulaire (Introduction de particules via le personnel, les équipements ou les matériaux.)		Produits défectueux, Pannes d'équipements, Rejets de lots, Altération des résultats expérimentaux.	2	4	8	Surveillance stricte sur le port de la combinaison spéciale salle blanche. Règlementation stricte sur l'habillement en salle blanche : -Porter obligatoirement la combinaison de la	1	2	2	

							salle blanche -Éviter de porter des vêtements pelucheux -Ne pas entrer en salle blanche avec un short ou des sandales -Avoir une paire de souliers d'intérieur propre pour la salle blanche -Laisser ses affaires (sac, veste, carton, ...) à son bureau plutôt qu'à l'intérieur.				
	Présence de solvants inflammables, atmosphère enrichie en oxygène		Blessures graves, Destruction d'équipements, Arrêt de production, Explosion ou incendie.	3	3	9	Présence des EPIs adaptés selon les normes et guides de bonne pratique en salles blanches. Fiches signalétiques de chaque produit est disponible. Réglementation de manipulation stricte. Formation sur le comportement a tenir en cas de déversement de produits chimiques, fuite de gaz toxique, accident ou brulure. Mise en place d'une procédure d'évacuation (alarme, point de rassemblement, plan d'évacuation ...). Moyens de lutte contre incendie.	1	2	2	

	Accumulation de charges électrostatiques dans les zones où sont manipulés des composants électroniques sensibles.		Dommages invisibles aux circuits électroniques, perte de fiabilité des produits.	2	4	8	Chaussures antistatiques portés obligatoirement par les opérateurs.	1	4	4	
	Chute d'objets ou glissade		Blessures du personnel, Dommages matériels.	2	2	4	Port d'EPI renforcés	2	1	2	
	Utilisation de substances comme NH ₃ , Cl ₂ , HF, solvants organiques volatils	Chimique	Émanations de gaz toxiques ou irritants	3	4	12	Présence des EPIs et EPCs adaptés selon les normes et guides de bonne pratique en salles blanches. Fiches signalétiques de chaque produit est disponible Règlementation de manipulation stricte. Formation sur le comportement à tenir en cas de déversement de produits chimiques, fuite de gaz toxique, accident ou brûlure. Mise en place d'une procédure d'évacuation (alarme, point de rassemblement, plan d'évacuation ...).	2	2	4	
	Mauvais dosage, mélange inapproprié, ou mauvaise séquence de réaction → dégagement de		Réactions chimiques incontrôlées	3	3	9	Vérification rigoureuse avant chaque manipulation et surveillance permanente	2	3	6	

	chaleur, feu ou explosion.										
	Fuite de solvants, acides, gaz, ou autres substances utilisées dans les processus.		Intoxication du personnel, Explosion, Corrosion d'équipements, Pollution de l'air de la salle.	3	4	12	Présence des EPIs adaptés selon les normes et guides de bonne pratique en salles blanches Maintenance préventive régulière du système de traitement d'air. Présence d'alarmes. Fiches signalétiques de chaque produit est disponible Réglementation de manipulation stricte. Formation sur le comportement à tenir en cas de déversement de produits chimiques, fuite de gaz toxique, accident ou brulure. Mise en place d'une procédure d'évacuation (alarme, point de rassemblement, plan d'évacuation ...).	2	3	6	
	Contamination microbiologique (Présence de micro-organismes (bactéries, moisissures) dus à une hygiène insuffisante ou un système de filtration défectueux.)	Biologique	Risque d'infection	4	3	12	Présence des EPIs adaptés selon les normes et guides de bonne pratique en salles blanches. Fiches signalétiques de chaque produit est disponible. Réglementation de manipulation stricte.	3	2	6	

							Formation sur le comportement a tenir en cas de déversement de produits chimiques, fuite de gaz toxique, accident ou brulure. Mise en place d'une procédure d'évacuation (alarme, point de rassemblement, plan d'évacuation ...). Moyens de lutte contre incendie.				
	Panne de climatisation ou de filtration	Technique	Contamination massive Possible, Rupture du maintien en température ou pression.	2	4	8	Maintenance régulière	1	4	4	
	Défaillance de l'alarme ou des capteurs		La surveillance des conditions de pression, particules, humidité et la température devient impossible.	2	4	8	Vérification des capteurs et alarmes chaque trois mois et remplacement chaque année.	1	3	3	
	Non-respect du port des EPI	Organisationnel	Contamination du produit, Risque pour l'opérateur	2	3	6	Surveillance stricte	1	3	3	
Stockage gaz inertes	Explosion due a une surpression causée par la chaleur ou un choc (en cas de chute ou ouverture brutale)	Physique	Projection de la bouteille	2	4	8		2	4	8	Stockage en armoire ventilée ou local technique classé ATEX
	Gaz stocké à l'état liquide		Brûlure cryogénique (brulure par le froid)	1	4	4		1	4	4	Systèmes de confinement et de récupération de fuite Contrôle régulier de l'étanchéité
	Fuite non détectée	Chimique	Hypoxie, perte de conscience, arrêt respiratoire ; Étourdissement, maux de tête, confusion, chute	2	4	8	Système de ventilation	2	4	8	Respect des compatibilités de stockage Port des EPI spécifiques Formation des

											opérateurs à la manipulation sécurisé
Stockage de gaz corrosifs et toxiques	Certains gaz sont instables ou réactifs (chlore, phosphine...)	Physique	Explosion	3	4	12		3	4	12	Stockage en armoire ventilée ou local technique classé ATEX
	Explosion de cylindre		Projection, onde de choc, dégâts matériels, blessés graves	2	3	6		2	3	6	Systèmes de confinement et de récupération de fuite
	Inhalation de gaz toxique	Chimique	Intoxication, irritation pulmonaire, œdème, arrêt respiratoire, décès	3	4	8	Système de ventilation. Détecteur de gaz. Affichage des FDS	3	4	8	Contrôle régulier de l'étanchéité
	Brûlure par gaz corrosif		Brûlures cutanées, oculaires, lésion des muqueuses	3	4	12		3	4	12	Respect des compatibilités de stockage
	Fuite de gaz		Contamination de la zone, exposition du personnel, arrêt d'activité	2	3	6	Système de ventilation	2	3	6	Port des EPI spécifiques
	Réaction chimique dangereuse		Formation de vapeurs ou composés dangereux, explosion secondaire	2	4	8		2	4	8	Formation des opérateurs à la manipulation sécurisé
	Corrosion de matériels		Dégradation de tuyauteries, vannes, détecteurs	3	3	9		3	3	9	
Stockage de gaz inflammables	Départ de feu au contact d'une source d'allumage	Physique	Brûlures graves, Incendie	2	3	6		2	3	6	Stockage dans armoire ou local ventilé classé ATEX
	Explosion du gaz sous pression si surchauffe ou rupture		Déflagration, effet de souffle, Blessures multiples, Destruction de locaux	2	4	8		2	4	8	Étiquetage clair et conforme à la norme CLP
	Rupture de robinet ou de la bouteille		Effet "missile", Dommages matériels et humains	3	3	9		3	3	9	Détecteurs de gaz et d'incendie en place
	Fuite	Chimique	Effet "missile", Dommages matériels et humains	3	4	12	Système de ventilation	3	4	12	Formation du personnel à la manipulation sécurisée
											Utilisation d'équipements adaptés

			Incendie								
	Surchauffe des bouteilles et Augmentation de la pression		Projection de fragments métalliques, Blessure grave ou mortelle	2	4	8		2	4	8	
	Contact avec corps humain		Lésions cutanées, Atteinte des yeux ou voies respiratoires	1	3	3		1	3	3	
Changement de bouteilles de gaz	Ouverture d'une vanne sans vérification pression résiduelle	Chimique	Projection de gaz, Effet de souffle, Intoxication	2	4	8		2	4	8	Vérification manométrique avant ouverture, consigne de purge obligatoire
	Gaz toxique/inflammable restant dans la ligne		Asphyxie, Brûlures, Incendie	2	3	6		2	3	6	
	Fuite de gaz résiduel lors de la déconnexion		Irritation, Brûlures, Contamination	2	3	6	Système de ventilation	2	3	6	Vanne fermée, gant + lunettes, déconnexion en zone ventilée
	Défaut de joint / mauvais montage		Fuite continue, Atmosphère explosive	2	3	6		2	3	6	Remplacement systématique du joint VCR, test d'étanchéité
	Fuite non détectée en dépression		Contamination du circuit	1	3	3		1	3	3	
	Inertage incomplet / surpression accidentelle		Brûlures froides (azote liquide), Asphyxie (appauvrissement en O ₂)	2	3	6		2	3	6	Limitation de débit, détection O ₂ , procédure de remplissage contrôlée
	Fuite de gaz si vannes mal fermées		Risque d'explosion, Intoxication	2	4	8		2	4	8	Vérification croisée de toutes les vannes avant ouverture
	Gaz acheminé vers ligne de production sans test préalable		Perte de produit, Contamination du process	2	2	4		2	2	4	Test d'étanchéité et pression obligatoire avant ouverture
	Non-détection d'une fuite lente		Risque d'accumulation de gaz	2	2	4		2	2	4	Lecture manomètres obligatoire, alarme si HP/LP anormales

Composant	Etat de fonctionnement	Mode de défaillance	Cause des défaillances	Effets des défaillance	Fréquence	Gravité	Capacité de détection	Criticité	Action de prévention
Vanne d'arrêt haute pression	Vanne ouverte	Fuite externe	Vieillissement ou dégradation des joints Desserrage ou dommages aux points de connexion Corrosion, Surpression Vibrations	Risque d’incendie/explosion (gaz inflammable), Pollution, Danger pour le personnel	3	4	2	24	Inspection régulière, Remplacement périodique des joints, Nettoyage du siège Contrôle de propreté de l’orifice, Vérification des pressions en amont/aval, Remplacement préventif des joints Re-serrage périodique
		Commande erronée	Bug automate, Signal erroné, Dysfonctionnement des éléments de contrôle	Interruption du processus, Surpression dans une ligne amont, Risque d'arrêt non prévu	2	3	3	18	Test périodique du déclenchement automatique, Maintenance des capteurs et électrovannes
		Blocage mécanique	Encrassement (Accumulation de saletés ou de dépôts), Corrosion, Tige grippée	Impossibilité d’isoler le gaz, Risque d'aggravation d'incident, Perte de maitrise	2	3	2	12	Graissage périodique, vérification de la manœuvrabilité, purge préventive, Contrôle de l’état mécanique, remplacement préventif des éléments mobiles

	Vanne fermée	Fuite interne	Siège usé, impureté, corrosion	Fuite de gaz vers une zone censée être isolée, Risque d'explosion si accumulation	1	4	2	8	Graissage périodique, vérification de la manœuvrabilité, purge préventive Inspection régulière, remplacement périodique des joints, nettoyage du siège
		Fuite externe	Joint de corps ou bride endommagé	Émission dangereuse, Risque pour la santé et l’environnement	3	4	2	24	Vérification du bon fonctionnement après chaque usage, remplacement des poignées endommagées
		Blocage mécanique	Corrosion, manque de lubrification	Blocage du processus	2	3	2	12	Graissage périodique, vérification de la manœuvrabilité, purge préventive, Contrôle de l’état mécanique, remplacement préventif des éléments mobiles
		Position réelle non détectée	Capteur HS ou déréglé	Fausse info de contrôle, perte de sécurité	2	3	4	24	Test périodique du déclenchement automatique, maintenance des capteurs et électrovannes

Manomètre	Mesure de la pression	Affichage erroné	Vibration mécanique	Lecture imprécise, Déviation de l'aiguille du zéro.	2	3	2	12	Le remplissage du boîtier avec de la glycérine ou de l’huile de silicone agit comme un amortisseur pour ralentir le mouvement. Eloigner le manomètre de la source de la vibration
		Rupture des éléments mécaniques	Pic de pression	Aiguille tordue, cassée ou entaillée Perte de précision Tube manométrique fendu	2	4	2	16	Utilisation de vis frein, des amortisseurs, des vannes à pointeau ou un séparateur avec capillaire. Remplacer le manomètre par un autre qui a une plage de pression plus élevée.
		Perforation	Corrosion	Détérioration du boîtier, de l'aiguille et du cadran.	1	2	2	4	Isolez le manomètre des produits chimiques agressifs
Robinet bouteille	Ouvert	Fuite au niveau de la tige	Usure des joints, Desserrage, Fissure	Risque de perte de gaz	2	4	1	8	Vérification du serrage, contrôle visuel, tests d’étanchéité réguliers
		Fuite à la connexion (filetage)	Filetage abîmé, Mauvais vissage, Choc	Impossibilité de raccorder correctement le détendeur	2	3	1	6	Contrôle du filetage, remplacement des embouts usés, montage avec clé dynamométrique
		Rupture du corps de robinet	Surcharge de pression, Défaut de fabrication	Projection	1	4	2	8	Vérification de la pression max, tests de résistance, certification du matériel

		Débit non contrôlé	Clapet abîmé	Mauvaise alimentation du réseau	2	3	1	6	Essais fonctionnels réguliers, limiteurs de débit, entretien du robinet
	Fermé	Fuite	Siège usé, Joint endommagé, Impuretés	Danger d’explosion ou intoxication	2	4	1	8	Inspection régulière de l’étanchéité, remplacement périodique des joints
		Robinet ne se ferme pas complètement	Corps étranger, Usure du mécanisme	Consommation continue	1	3	1	3	Filtrage du gaz, nettoyage interne régulier, maintenance préventive
		Volant cassé, coincé ou desserré	Choc, Vieillessement, matériau fragile	Manœuvre impossible ou incomplète	1	2	2	4	Choix de matériaux robustes, formation à la manipulation, entretien régulier
		Corrosion interne ou externe	Humidité, Gaz corrosif, Mauvaise protection	Altération du robinet	3	2	3	18	Utilisation de matériaux résistants à la corrosion, lubrification adaptée bouchons de protection, vérification avant usage
Joints	Assurer l’étanchéité entre deux pièces mécaniques	Fuite	Usure Vieillessement, Dégradation Fatigue thermique, Manque de lubrification, Pression trop élevée Cycles répétitifs	Perte de confinement, Explosion ou incendie	3	4	3	36	
		Serrage insuffisant des raccords	Erreur humaine lors de l'assemblage, Manque de formation,	Fuite de gaz lente à la jonction, Risque de fuite prolongée	2	4	4	32	

			Outil de serrage mal calibré						
		Eclatement / extraction	Surpression, Choc, Mauvais positionnement, Mauvais serrage	Fuite brutale, projection débris	2	4	3	24	

Annexe 03 : tableau de l’AMDEC processus appliqué au processus de changement de bouteilles de gaz

Fonction	Etat de fonctionnement	Mode de défaillance	Causes	Effets	G	P	D	C	Actions correctives
Assurer le stockage sécurisé des bouteilles	Bouteilles stockées verticalement, arrimées	Chute de bouteille	Mauvais arrimage, sol glissant	Fuite de gaz, explosion	4	3	3	36	Supports de maintien, sol antidérapant, formation
Prévenir l’exposition au gaz	Vannes fermées, contrôle d’étanchéité	Robinet mal fermé ou fuite	Défaut de fermeture, robinet endommagé	Intoxication, asphyxie	4	2	3	24	Vérification régulière, capteurs de fuite, maintenance
Éviter les mélanges dangereux	Séparation des gaz incompatibles	Stockage trop proche de gaz réactifs	Mauvais tri, erreur humaine	Réaction chimique, explosion	4	2	2	16	Signalisation, stockage séparé, formation
Maîtriser la température	Stockage dans local ventilé, à l’ombre	Température élevée	Manque de ventilation, exposition au soleil	Surpression, explosion	4	2	3	24	Ventilation naturelle/mécanique, contrôle de température
Préserver l’intégrité des bouteilles	Contenant en bon état, sans corrosion	Corrosion ou déformation	Humidité, vieillissement	Fuite, rupture	3	3	2	18	Inspection régulière, stockage au sec
Garantir la sécurité lors de la manipulation	Manutention avec chariot adapté, EPI portés	Choc ou chute pendant déplacement	Manque de formation, équipement inadapté	Ouverture non contrôlée, blessure	4	3	3	36	Formation, matériel adapté, port des EPI
Prévenir les fuites lentes	Contrôle périodique de l’étanchéité	Micro fuite au niveau des joints	Usure du joint, mauvais serrage	Contamination de l’atmosphère	3	3	4	36	Contrôle d’étanchéité, remplacement périodique des joints
Respecter les distances de sécurité	Stockage éloigné des sources de chaleur/ignition	Proximité d’une flamme ou appareil électrique	Négligence, signalisation absente	Incendie ou explosion	4	3	3	24	Marquage au sol, balisage ATEX, inspection fréquente

Annexe 03 : Echelle de Saaty pour la hiérarchisation des critères

Degrés d'importance de chaque caractéristique	Définition	Explication
1	Importance égale	Deux caractéristiques contribuent de la même façon à l'objectif.
3	Faible importance d'une caractéristique par rapport à une autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement une caractéristique par rapport à une autre.
5	Importance forte ou déterminante	L'expérience et l'appréciation favorisent fortement une caractéristique par rapport à une autre.
7	Importance très forte ou attestée	Une caractéristique est fortement favorisée et sa dominance est attestée dans la pratique.
9	Importance absolue	Les preuves favorisant une caractéristique par rapport à une autre sont aussi convaincantes que possible.
2, 4, 6, 8	Valeurs associées à des jugements intermédiaires	Lorsqu'un compromis est nécessaire.

Annexe 05 : Plan d'audit

	Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA)	Code : Version :
	Système de management Qualité ISO 9001 : 2015 PLAN AUDIT QUALITE INTERNE	Date : 09/04/2025 Page 1 /

Audit fournisseur

Période de l'audit : 09/04/2025

Nombre de jours d'audit : 01 jour

Critères d'audit : norme ISO 9001 : 2015

Type d'audit : Audit fournisseur

Champ d'audit : Direction Générale (Processus HSE)

Equipe d'audit :

(RA) : Responsable d'Audit // (A) : Auditeur // (AS) Auditeur Stagiaire // (AC) : Accompagnateur.

RA	Lina S AMER
A	Chahrazed TALBI

Objectif de l'audit : Vérifier la conformité et l'efficacité du fournisseur par rapport aux exigences de la norme ISO 9001 :2015

Méthodes d'audit : Entretiens, observations, revue documentaire.

	Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA)	Code : Version :
	Système de management Qualité ISO 9001 : 2015 PLAN AUDIT QUALITE INTERNE	Date : 09/04/2025 Page 2 /

09/04/2025				
Durée	Auditeurs	Processus	Pilote processus	Lieu
	Lina SI AMER Chahrazed TALBI	Réunion d'ouverture		
	Lina SI AMER Chahrazed TALBI	Communication		Bureau du pilote
PAUSE				
	Lina SI AMER Chahrazed TALBI	Réunion de clôture avec les pilotes processus		

Annexe 06 : Rapport d'audit fournisseur suivant la norme ISO 9001

Le sigle de la société	Centre de développement des Technologies Avancées (CDTA)	Code : RA1 Version : projet
	Système de management Qualité ISO 9001 : 2015 RAPPORT D'AUDIT QUALITE DES FOURNISSEURS	09/04/2025 Page 1 sur 3

RAPPORT D'AUDIT QUALITE PROCESSUS GESTION DES FOURNISSEURS et SOUS TRAITANTS

REFERENTIEL : ISO 9001 : 2015

Lina SI AMER
09/04/2025

	Centre de développement des Technologies Avancées (CDTA)	Code : RA1 Version : Projet
	Système de management Qualité ISO 9001 : 2015 RAPPORT D'AUDIT QUALITE FOURNISSEURS	Date : 09/04/2025 Page 2 sur 3

OBJET DE L'AUDIT :

Vérification de la conformité et de l'efficacité du processus gestion des sous-traitant et fournisseurs par rapport aux exigences de la norme ISO 9001 :2015 pour le processus HSE salle blanche

DOCUMENT DE RÉFÉRENCE :

- Norme ISO 9001 :2015
- Documents contractuels.

CHAMP DE L'AUDIT :

Processus de gestion des sous-traitants et fournisseurs de CDTA

CRITÈRES D'ÉVALUATION :

- Conformité du processus de gestion des sous-traitants et fournisseurs par rapport aux exigences de la norme (chapitre 8.4) de la norme ISO 9001 :2015.
- Vérification effectuée via des entretiens et la consultation des informations documentées correspondantes.

	Centre de développement des Technologies Avancées (CDTA)	Code : RA1 Version : Projet
	Système de management Qualité ISO 9001 : 2015 RAPPORT D'AUDIT QUALITE FOURNISSEURS	Date : 09/04/2025 Page 3 sur 3

PRINCIPALES CONCLUSIONS :

Points Forts (PF) :

- Bonne connaissance des activités du processus, avec un travail important d'identification, de définition, d'analyse et de description.
- Connaissance des enjeux internes et externes de l'organisme.
- Identification des éléments d'entrées et de sorties du processus.
- Intégration des aspects liés à la qualité, délai et dispositions environnementales.
- Bien que non documentés, les critères pour le choix et la sélection des fournisseurs sont identifiés.

Points Sensibles (PS) :

- Absence d'évaluation annuelle des fournisseurs.
- Aucune réalisation d'audit n'a été effectuée auparavant.

Non-Conformités (NC) :

- **NC 1** : Bien que les critères de qualité, délai et dispositions environnementales sont disponibles, aucune évaluation documentée des sous-traitants n'est établie en la matière. *(Se référer à l'exigence ISO 9001 :2015 concernant la maîtrise des processus, produits et services fournis par des prestataires externes).*
- **NC 2** : Les dispositions liées à la santé et sécurité au travail (SST) ne sont pas disponibles ni documentées lors de l'établissement de la relation contractuelle CDTA / Shanghai Titan International Trading Limited. *(Se référer à l'exigence ISO 9001 :2015 concernant la planification et la maîtrise des processus pour la fourniture de produits et services, en particulier les aspects SST pertinents).*
- **NC 3** : aucune disposition managériale (décision) relatif à l'existence d'un Lot d'une vingtaine de bouteilles à gaz usagées (vides) Honeywell utilisé dans le processus de production, n'est engagée systématiquement. *(Se référer à l'exigence ISO 9001 :2015 concernant la maîtrise des biens appartenant aux clients ou aux prestataires externes.)*

Recommandations :

- **REC 1** : Intégrer dans le cahier des charges des sous-traitants et fournisseurs les articles liés au respect de la législation relative à la SST, ces derniers doivent repris dans les articles dans le processus de sélection et d'évaluation des fournisseurs.
- **REC 2** : Mettre en place et réaliser des évaluations annuelles documentées des sous-traitants, en considérant la qualité, les délais, les aspects environnementaux et la SST comme paramètre principaux lors de chaque évaluation réalisée.

	Centre de développement des Technologies Avancées (CDTA)	Code : RA1 Version : Projet
	Système de management Qualité ISO 9001 : 2015 RAPPORT D'AUDIT QUALITE FOURNISSEURS	Date : 09/04/2025 Page 4 sur 3

- Définir et mettre en œuvre des indicateurs de performance clés (KPIs) pour ce processus évaluations.
- **REC 3** : Définir une procédure pour la gestion des bouteilles de gaz vides, incluant leur stockage, leur identification et leur retour au fournisseur ou leur élimination conforme à la réglementation.

Annexe 07 : Fiche de présence audit fournisseur suivant la norme ISO 9001

	Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA)	Code : Version :
	Système de management Qualité ISO 9001 : 2015 PLAN AUDIT QUALITE INTERNE	Date : 09/04/2025 Page 1 /

Fiche de présence Audit fournisseur

Période de l'audit : 09/04/2025

Nombre de jours d'audit : 01 jour

Critères d'audit : norme ISO 9001 : 2015

Type d'audit : Audit fournisseur

Champ d'audit : Direction Générale (Processus HSE)

Equipe d'audit :

(RA) : Responsable d'Audit // (A) : Auditeur // (AS) Auditeur Stagiaire // (AC) : Accompagnateur.

RA	Lina S AMER
A	Chahrazed TALBI
Audité	Lamia MENASRI

Objectif de l'audit : Vérifier la conformité et l'efficacité du fournisseur par rapport aux exigences de la norme ISO 9001 :2015

Méthodes d'audit : Entretiens, observations, revue documentaire.

Annexe 08 : Tableau de la procédure de changement de bouteilles de gaz actuelle du CDTA

CDTA - CDTA
CDTA-0602-LI-1500813-GasProcedure-EMVA



STAGE NO	STAGE	OPERATION	STEP TIME	COMMENT	GAS BOTTLE VALVE	SAFETY VALVE	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	STEP DONE	CHECK LIST
		NORMAL OPERATION			OPEN	OPEN	OPEN	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED		
		BOTTLE CHANGE													
1	GAS VENT	STEP 1			CLOSED	OPEN	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED		
		STEP 2	5 s	CHECK VENTURI MANOMETER	CLOSED	OPEN	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		PRESSURE DECREASE BELOW 0 VENTURI MANOMETER?
		STEP 3		UNTIL HP = 0 and LP = 0	CLOSED	OPEN	OPEN	CLOSED	OPEN	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		HP AND LP PRESSURE INDICATOR SHOULD BE 0
		STEP 4			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		ISOLATION OF PIPELINE UNTIL V1, GAS IN THE PIPELINE SHOULD BE VENTED
		STEP 5			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		ISOLATION OF PIPELINE UNTIL V3, GAS IN THE PIPELINE SHOULD BE VENTED
		STEP 6	30 s	Vacuum check	CLOSED	OPEN	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		VACUUM THE PIPELINE, HOW TO CHECK? HOW WILL BE THE CHANGE IN VENTURI MANOMETER?
		STEP 7			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		VACUUM ENDS
2	N2 PURGE AND VACUUM	STEP 8	5 s	FILL with N2	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	OPEN	CLOSED		FILLING THE PIPELINE WITH N2
		STEP 9			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		FILLING ENDS
		STEP 10	30 s	Vacuum check	CLOSED	OPEN	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		VACUUM N2 FROM PIPELINE
		STEP 11			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		VACUUM ENDS
3	N2 PURGE AND VACUUM*	STEP 12	5 s	FILL with N2	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	OPEN	CLOSED		FILLING THE PIPELINE WITH N2
		STEP 13			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		FILLING ENDS
		STEP 14	30 s	Vacuum check	CLOSED	OPEN	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		VACUUM N2 FROM PIPELINE
		STEP 15			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED		VACUUM ENDS
4	BOTTLE CHANGE	STEP 16	5 s	PIPE PURGE (N2 FLOW)	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED		FILL THE PIPELINE WITH N2, PURGE CONTINUOUSLY
		STEP 17		Disconnect Empty Bottle											
		STEP 18		Connect New Bottle											VCR GASKET CHANGE EVERYTIME
		STEP 19		PIPE PURGE END	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED		PURGE ENDS
5	VACUUM	STEP 20			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		OBSERVE PRESSURE DECREASE IN VENTURI MANOMETER?
		STEP 21	30 s	Vacuum check	CLOSED	OPEN	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		VACUUM THE PIPELINE, HOW TO CHECK? HOW WILL BE THE CHANGE IN VENTURI MANOMETER?
		STEP 22			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		VACUUM ENDS
6	N2 PURGE AND VACUUM	STEP 23	5 s	FILL with N2	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	OPEN	CLOSED		FILLING THE PIPELINE WITH N2
		STEP 24			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		FILLING ENDS
		STEP 25	30 s	Vacuum check	CLOSED	OPEN	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		VACUUM THE PIPELINE, HOW TO CHECK? HOW WILL BE THE CHANGE IN VENTURI MANOMETER?
		STEP 26			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		VACUUM ENDS
7	N2 PURGE AND VACUUM	STEP 27	5 s	FILL with N2	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	OPEN	CLOSED		FILLING THE PIPELINE WITH N2
		STEP 28			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		FILLING ENDS
		STEP 29	30 s	Vacuum check	CLOSED	OPEN	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		VACUUM THE PIPELINE, HOW TO CHECK? HOW WILL BE THE CHANGE IN VENTURI MANOMETER?
		STEP 30			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		VACUUM ENDS
8	OPENING THE GAS BOTTLE VALVE 1	STEP 31			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED		ISOLATE N2, VENTURI MANOMETER INDICATES "0"
		STEP 32		OPEN GAS BOTTLE VALVE	OPEN	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED		GAS INLET
		STEP 33		HP AND LP CHECK	OPEN	OPEN	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED		OBSERVE INCREASE IN HP&LP
		STEP 34		CLOSE GAS BOTTLE VALVE	CLOSED	OPEN	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED		
		STEP 35			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED		
9	PURGING GAS	STEP 36		VENTURI ON	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		OBSERVE PRESSURE DECREASE IN VENTURI MANOMETER?
		STEP 37	5 s		CLOSED	OPEN	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		PURGE THE PIPELINE TO GAS VENT
		STEP 38			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED		PURGE ENDS
10	OPENING THE GAS BOTTLE VALVE 2	STEP 39			CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED		VENTURI MANOMETER INDICATES "0"
		STEP 40		OPEN GAS BOTTLE VALVE	OPEN	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED		GAS INLET
		STEP 41		HP AND LP CHECK	OPEN	OPEN	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED		OBSERVE INCREASE IN HP&LP
		STEP 42		PROCESS VALVE V4 OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	CLOSED	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED	CLOSED		OPERATION MODE

**Annexe 09 : Premières pages du référentiel HSE
pour la conception d'un stockage aérien.**

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

Département QHSE – Gestion des Risques Industriels

Annexe 09 au mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

**Référentiel HSE destiné à la conception d'un stockage
aérien des bouteilles de gaz sous pression et produits
dangereux pour le Centre de Développement des
Technologies Avancées (CDTA)**

(Approche réglementaire, normative & technique dans le contexte algérien)

Réalisé par: Lina Chabha SI AMER & Chahrazed TALBI (ENP)

Alger, juin 2025

TABLE DES MATIERES

I. INTRODUCTION	4
II. PRINCIPES D'AMÉNAGEMENT DU STOCKAGE AÉRIEN	5
1. Ségrégation des produits	5
Identification des bouteilles et sources d'information	6
Classification des gaz et organisation du stockage	9
2. Analyse de compatibilité et classification des gaz	10
Classification et étiquetage des produits chimiques	10
Incompatibilités entre produits chimiques	11
Tableau de Compatibilité Chimique (Extraits Critiques)	14
Règles générales applicables au stockage aérien de gaz industriels	16
3. Exigences générales pour le stockage aérien de gaz industriels	16
1. Conditions générales de la zone de stockage	17
2. Organisation des bouteilles	17
3. Sécurité et accessibilité	17
4. Prévention de la corrosion	17
5. Rétention et étanchéité des surfaces de stockage	19
A. Stockage aérien des bouteilles de gaz asphyxiants	19
B. Stockage aérien des bouteilles de gaz oxydants	20
C. Stockage aérien des bouteilles de gaz inflammables	21
D/ Stockage aérien des gaz toxiques et/ou corrosifs	22
4. Emplacement et distances de sécurité	24
5. Conception du réseau et raccordement des bouteilles de gaz	26
5.1. Raccordement sécurisé des bouteilles à l'équipement ou au réseau	26
5.2. Éléments de régulation et de sécurité	27
5.3. Conception sécurisée du réseau gaz	27
6. Dispositions environnementales générales	28
III. MESURES DE PROTECTION, DE PREVENTION, D'INTERVENTION ET DE SUIVI	30
IV. REMARQUE	31
Bibliographie	32

I. INTRODUCTION

Dans un contexte industriel en constante évolution, la maîtrise des risques liés au stockage des gaz industriels sous pression représente un enjeu majeur en matière de sécurité, de conformité réglementaire et de performance opérationnelle. Ces substances, utilisées dans divers procédés technologiques, présentent des dangers multiples qui exigent des mesures rigoureuses d'organisation, de prévention et de contrôle.

Le Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA), en tant qu'établissement de recherche et d'innovation, projette d'appliquer notre solution de mettre en place un stockage aérien des bouteilles de gaz destinées à ses activités en microtechnologie. Dans cette perspective, il est apparu essentiel de formaliser un référentiel HSE permettant d'encadrer techniquement et réglementairement la conception, l'aménagement, l'exploitation et la gestion de ce type d'installation.

Ce référentiel a pour objectif principal de fournir un outil structurant et opérationnel permettant :

- D'assurer la sécurité des personnes, des biens et la protection de l'environnement ;
- De garantir la conformité aux exigences réglementaires algériennes (notamment celles relatives aux installations classées, aux produits dangereux, aux rejets, et aux déchets industriels) ;
- D'intégrer les bonnes pratiques techniques issues des normes internationales (ISO, INRS, SGH, NF, etc.) ;
- Et de faciliter la mise en œuvre sur le terrain grâce à une approche claire, méthodique et adaptée aux réalités du CDTA.

Fruit d'un croisement entre les textes réglementaires nationaux et les référentiels techniques internationaux, ce document s'adresse aux exploitants, ingénieurs, responsables HSE et autorités de contrôle. Il se veut évolutif, pédagogique et transposable à d'autres contextes similaires, afin d'accompagner durablement la maîtrise des risques liés aux gaz industriels en Algérie.

II. PRINCIPES D'AMÉNAGEMENT DU STOCKAGE AÉRIEN

L'implantation et l'organisation d'une zone de stockage aérien destinée aux substances dangereuses doivent répondre à des exigences réglementaires et normatives rigoureuses en matière de sécurité. Ces exigences sont encadrées par la législation nationale en vigueur et complétées par les référentiels internationaux. L'objectif est de prévenir tout accident technologique, de maîtriser les risques associés et de garantir la conformité réglementaire des installations.

Les principes directeurs ci-dessous constituent les fondements techniques à respecter lors de la conception et de l'exploitation de telles zones :

1. Ségrégation des produits

L'implantation et l'organisation d'une zone de stockage aérien destinée aux substances dangereuses doivent répondre à des exigences réglementaires et normatives structurées et précises en matière de sécurité. Ces exigences sont encadrées par la législation nationale en vigueur et complétées par les référentiels internationaux. L'objectif est de prévenir tout accident technologique, de maîtriser les risques associés et de garantir la conformité réglementaire des installations.

Les principes directeurs ci-dessous constituent les fondements techniques à respecter lors de la conception et de l'exploitation de telles zones :

- **SGH (Système Général Harmonisé)** : impose l'étiquetage normalisé des contenants de substances chimiques, incluant les pictogrammes de danger, mentions de danger (H), conseils de prudence (P), ainsi que la classification des dangers (physiques, santé, environnement).
- **Brochure INRS (ED 986 ou ED 955)** : fournit des recommandations pratiques pour l'organisation du stockage de produits chimiques incompatibles, notamment à travers des tableaux de compatibilité.
- **ISO 11625:2007** : spécifie les règles de marquage, d'étiquetage et d'identification des bouteilles de gaz pour un stockage sécurisé.
- **ISO 5154:2004** : s'applique aux bouteilles de gaz réfrigérants, en précisant les exigences de codage couleur et de compatibilité de stockage.