

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement de la recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux

Filière : QHSE-GRI

Entreprise : Linde GAS Reghaïa

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme

**Modélisation Statistique et Stochastique pour l'Amélioration
De la Fiabilité d'un Circuit Frigorifique**

HAMITECHE Sarah

MAMMADI Nada

Sous la direction de :

Dr. SENOUCI-BEREKSI Malik Maître de conférences ENP

Mr. KERTOUS Aboubakr Maître assistant A ENP

Présenté et soutenu publiquement le 01 /07/ 2025 devant le jury composé de :

Mr. BOUBAKEUR Mohamed Maître assistant A ENP

Dr. BOUSBAI M'hamed Maître de conférences ENP

Dr. LEGUBEDJ Farid Maître de conférences ENP

ENP 2025

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement de la recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux

Filière : QHSE-GRI

Entreprise : Linde GAS Reghaïa

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme

**Modélisation Statistique et Stochastique pour l'Amélioration
De la Fiabilité d'un Circuit Frigorifique**

HAMITECHE Sarah

MAMMADI Nada

Sous la direction de :

Dr. SENOUCI-BEREKSI Malik Maître de conférences ENP

Mr. KERTOUS Aboubakr Maître assistant A ENP

Présenté et soutenu publiquement le 01 /07/ 2025 devant le jury composé de :

Mr. BOUBAKEUR Mohamed Maître assistant A ENP

Dr. BOUSBAI M'hamed Maître de conférences ENP

Dr. LEGUBEDJ Farid Maître de conférences ENP

ENP 2025

في سياق الإنتاج المستمر، تواجه شركة Linde Gas Algérie أعطالاً متكررة في مسار التبريد Cofely، ويرجع ذلك أساساً إلى غياب الصيانة الوقائية المنظمة. والهدف من هذا العمل هو اقتراح نهج احتمالي لتحليل الاعتمادية من أجل توقع الأعطال الحرجة وتحسين عملية اتخاذ القرارات المتعلقة بالصيانة. بعد تحديد المخاطر وتحليلها باستخدام طرق HAZID و AMDEC و SERP، تم إجراء نمذجة إحصائية تستند إلى وقت الفشل (TTF)، تليها محاكاة مونت كارلو لتقدير الاعتمادية والعمر المتبقي (RUL). ثم تم استخدام نموذج سلسلة ماركوف العشوائية لتقييم العديد من استراتيجيات الصيانة. أظهرت النتائج أن استراتيجية الاستبدال الكامل تقدم أفضل خيار صيانة. تم تطوير واجهة مستخدم لجعل هذه التحليلات في متناول التقنيين ودعم تنفيذ سياسة الصيانة التنبؤية. الكلمات المفتاحية: الاعتمادية والصيانة التنبؤية، مونت كارلو، ماركوف، RUL.

Abstract

In a continuous production context, Linde Gas Algeria faces recurring failures in the Cofely cooling circuit, mainly due to the absence of structured preventive maintenance. This work aims to propose a probabilistic reliability analysis approach to anticipate critical failures and improve maintenance decision-making. After risk identification and analysis using HAZID, FMEA, and SERP methods, a statistical model based on time-to-failure (TTF) data was conducted, followed by a Monte Carlo simulation to estimate system reliability and Remaining Useful Life (RUL). A stochastic model using Markov chains was then applied to evaluate different maintenance strategies. Results show that the full replacement strategy provides the best maintenance option. A user interface was developed to make these analyses accessible to technicians and support the implementation of a predictive maintenance policy.

Keywords: Reliability, Predictive Maintenance, Monte Carlo, Markov, RUL.

Résumé

Dans un contexte de production continue, Linde Gas Algérie fait face à des défaillances récurrentes sur le circuit de refroidissement Cofely, principalement dues à l'absence de maintenance préventive structurée. Ce travail vise à proposer une approche probabiliste d'analyse de fiabilité afin d'anticiper les pannes critiques et d'améliorer la prise de décision en matière de maintenance. Après l'identification et l'analyse des risques à l'aide des méthodes HAZID, AMDEC et SERP, une modélisation statistique basée sur les temps de fonctionnement avant panne (TTF) a été menée, suivie d'une simulation Monte Carlo pour estimer la fiabilité et la durée de vie résiduelle (RUL). Un modèle stochastique par chaîne de Markov a ensuite permis d'évaluer plusieurs stratégies de maintenance. Les résultats montrent que la stratégie de rechange complet offre la meilleure option de maintenance. Une interface utilisateur a été développée pour rendre ces analyses accessibles aux techniciens et appuyer la mise en place d'une politique de maintenance prévisionnelle.

Mots-clés : Fiabilité, Maintenance prévisionnelle, Monte Carlo, Markov, RUL.

Remerciements

À Allah, merci de nous avoir accompagnés et protégés tout au long de ce chemin.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet.

*À nos encadrants académiques, Mr. **Malik Senouci Bereksi** et Mr. **Aboubakr Kertous**, pour la qualité de leur encadrement, leurs précieux conseils et leur accompagnement tout au long de ce travail.*

*À Mr. **Mohamed Boubakeur**, qui nous a fait l'honneur de présider le jury, ainsi qu'à Mr. **M'hamed Bousbai** et Mr. **Farid Leguebej**, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire.*

*À Mr. **Ahmed Belekhal** et Mr. **Hacene Kaci**, responsables HSE, et Mme. **Belhadj** pour leur confiance et pour nous avoir accueillis au sein de Linde Gas Algérie.*

Une pensée particulière au chef d'atelier ASU, Monsieur Samir Boulefrakh, et à son équipe : Houcine Keziou, Ahmed Touil et Mohamed Alaoui, pour leur disponibilité et le partage de leur expertise.

À l'ensemble des enseignants du département de Maîtrise des Risques Industriels, pour la qualité de leur enseignement et leur engagement.

*À Mme. **Marya Fodil** et à **Reda Bourdjoul**, deux personnes dont la gentillesse, la disponibilité et l'esprit profondément humain ont marqué notre parcours. Leur écoute, leur générosité et leur présence bienveillante ont apporté une chaleur et un soutien inestimables à notre formation.*

Merci d'avoir été là, avec autant de cœur.

À nos camarades et amis, pour leur entraide, leur énergie et les souvenirs partagés.

Et enfin, à nos familles, et tout particulièrement à nos parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leur soutien indéfectible.

Dédicaces

*À la seule femme qui a toujours voulu me voir briller plus qu'elle-même,
celle dont l'amour n'a jamais eu de conditions,
celle qui m'a portée, relevée, et jamais abandonnée ; à ma mère.*

*À celui qui m'a soutenue depuis le premier jour,
qui a toujours été présent, discret et bienveillant tout au long du chemin ; à mon père.*

À mon unique et précieux frère.

*À celle qui a toujours illuminé mes jours, présente dans les rires comme dans les tempêtes ; à
Hiba.*

*À mes précieuses amies : Hiba, Khadidja, Dikra et Zineb.
merci d'avoir été là, pour vos rires, vos mots et vos silences qui réconfortent.*

*À Sarah, le meilleur binôme qu'on puisse rêver, merci d'avoir été là dans les pires moments de
stress comme dans les plus beaux souvenirs.*

À toute ma famille et tous mes amis.

*Et enfin à la petite version de moi,
celle qui a tenu bon quand tout semblait flou,
qui a cru aux possibles même quand personne ne regardait.
Je te vois. Et je suis fière de toi et ça ce n'est que le début.*

谢谢我自己 · 加油 !

Long story short, I survived.

Mammadi Nada

Dédicaces de Sarah,

À mon père Mounir,

*Pour sa présence rassurante, la sagesse de ses gestes, la douceur de son regard,
Merci de m'avoir appris à avancer avec dignité et détermination.*

À ma mère Fadila,

*Pour son amour inépuisable, ses prières et son courage quotidien.
Tu es ma plus grande source de motivation.*

À la mémoire de mes grands-parents,

*Djedou Mohamed, Yemma Yamina et Maman Fatima
Que Dieu leur accorde Sa miséricorde et les accueille dans Son vaste paradis.
Leurs souvenirs continuent de m'accompagner et de me guider chaque jour.*

À toute ma famille,

Pour leur amour constant et leur soutien dans chaque étape de ma vie.

À Safia, mon âme sœur,

*Pour ta présence constante, ton écoute profonde et ta lumière dans mes moments d'ombre.
Ton amitié est un cadeau inestimable.*

À Hiba et Nada,

*Mes précieuses alliées dans cette belle aventure à trois.
Merci pour votre complicité, votre patience et tout ce que nous avons partagé ensemble. Ce
trinôme restera gravé dans mon cœur.*

Ce travail vous est dédié, avec tout mon amour, mon respect et ma gratitude.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction Générale.....	16
1 Chapitre 1 : Présentation du contexte industriel.....	19
1.1 Présentation de Linde Gas Algérie	19
1.1.1 Historique de LGA	20
1.1.2 Implantation géographique.....	21
1.1.3 Organigramme de l'entreprise.....	21
1.1.4 Engagements et Certifications de LGA.....	22
1.1.5 Présentation du site de Reghaïa.....	23
1.2 Présentation de l'Unité de Séparation d'Air	26
1.2.1 Procédé de séparation d'air	26
1.2.2 Les équipements de l'ASU.....	31
2 Chapitre 2 : Analyse des risques et des défaillances	34
2.1 Identification des dangers <i>HAZID</i>	34
2.1.1 Synthèse des résultats HAZID sur l'ASU	35
2.2 Description du système COFELY	36
2.2.1 Fluide frigorigène R134a	36
2.2.2 Fonctionnement du circuit frigorifique	36
2.2.3 Equipements du circuit COFELY.....	39
2.3 Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité.....	40
2.3.1 Évaluation de la Criticité :.....	40
2.3.2 Synthèse des résultats de l'AMDEC	43
2.4 Priorisation de la Fiabilité des Systèmes et des Équipements.....	46
2.4.1 Processus de SERP.....	46

2.4.2	Synthèse des résultats de SERP	51
3	Chapitre 3 : Prédiction de la Fiabilité par Simulation Monte Carlo.....	54
3.1	Modélisation des temps avant défaillance.....	54
3.1.1	Préparation des données	55
3.1.2	Sélection des distributions candidates.....	56
3.1.3	Estimation des paramètres.....	61
3.1.4	Méthodes de test d'adéquation des lois statistiques	64
3.2	Simulation Monte Carlo	67
3.2.1	La méthode Monte Carlo.....	68
3.2.2	Conception du modèle.....	70
3.2.3	Test de véracité du modèle	74
3.3	Analyse de fiabilité de la tuyauterie du circuit Cofely	75
3.3.1	Analyse préliminaire des TTF	75
3.3.2	Analyse saisonnière des TTF	77
3.3.3	Anticipation du RUL et recommandations.....	85
4	Chapitre 04 : Modélisation Stochastique et Simulations des Mainténances	89
4.1	Modélisation stochastique pour l'aide à la décision en maintenance.....	89
4.1.1	Modélisation Markovienne du circuit frigorifique.....	92
4.1.2	Hypothèses de la modélisation.....	92
4.1.3	La Matrice de transition	94
4.1.4	Simulation du comportement du circuit	95
4.2	Politiques de maintenance simulées	95
4.2.1	Politique réactive.....	95
4.2.2	Politique préventive.....	96
4.2.3	Politique de rechange	96
4.3	Analyse comparative des politiques de maintenance	98
5	Chapitre 05 : Conception d'une interface d'analyse de fiabilité	103

5.1	Etude de marché	103
5.2	Modèle économique et Business Model Canvas.....	103
5.3	Feuille de route.....	105
5.4	Interface d'analyse de fiabilité	106
5.4.1	Cadrage et préparation du développement	106
5.4.2	Conception et réalisation de l'interface.....	107
5.4.3	Perspectives d'évolution	110
Conclusion Générale		113
Références		116
ANNEXE A – Tableau HAZID de l'unité de séparation d'air		120
ANNEXE B – Modes de défaillance identifiés.....		134
ANNEXE C – Tableau AMDEC du circuit frigorifique Cofely.....		135
ANNEXE D – Rapport de diagnostic de fiabilité		155

Liste des figures

Figure 1.1 : Répartition mondiale du groupe Linde [1]	21
Figure 1.2 : Organigramme de LGA [1].....	22
Figure 1.3 : Organisation des ateliers au sein de l'unité de Reghaïa [1].....	23
Figure 1.4 : Plan de masse de Reghaïa [1]	24
Figure 1.5 : Piping and Instrumentation Diagram de l'ASU [3].....	28
Figure 2.1 : P&ID du circuit frigorifique [6]	37
Figure 2.2: Répartition du nombre de cas en fonction des différents modes de défaillance.....	45
Figure 3.1 : Déroulement des étapes de modélisation.....	55
Figure 3.2 : Script d'estimation des paramètres	63
Figure 3.3 : Exemple script des tests d'ajustements.....	67
Figure 3.4 : Organigramme des étapes suivies pour la conception du modèle	71
Figure 3.5 : Script du tirage aléatoire Monte Carlo.....	71
Figure 3.6 : Script des calculs de la méthode Monte Carlo.....	72
Figure 3.7 : Script d'affichage de la distribution des TTF simulés	72
Figure 3.8 : Distribution des TTF simulés	73
Figure 3.9 : Script de calcul du RUL pour la loi exponentielle.....	73
Figure 3.10 : Résultats de l'analyse préliminaire de fiabilité	77
Figure 3.11 : Script Matlab de la segmentation des TTF	78
Figure 3.12 : Résultats de l'ajustement des TTF_été.....	79
Figure 3.13 : Courbes d'évolution de la fiabilité et du taux de défaillance des TTF_été.....	80
Figure 3.14 : Résultats de l'ajustement des TTF_hiver	81
Figure 3.15 : Courbes d'évolution de la fiabilité et du taux de défaillance des TTF_hiver	82
Figure 3.16 : Résultats d'indicateurs de fiabilité des TTF simulés combinés	83
Figure 3.17 : Résultats de l'analyse saisonnière des TTF combinés simulés	83
Figure 3.18 : Résultats de l'analyse des TTF pour une RUL anticipée	86
Figure 4.1 : Diagramme de flux de la démarche de simulation proposée	91
Figure 4.2 : Chaîne de Markov du circuit frigorifique	94
Figure 4.3 : Histogramme comparatifs des politiques de maintenance.....	99
Figure 5.1 : Business Model Canvas	104
Figure 5.2 : Diagramme descriptive de la navigation de l'interface	108
Figure 5.3 : Page d'accueil de l'interface	109
Figure 5.4 : Exemple 1 des résultats de l'interface	109

Figure 5.5 : Exemple 2 des résultats de l'interface	110
---	-----

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Présentation de Linde Gas Algérie	20
Tableau 1.2 : Gamme de produits de LGA [1]	25
Tableau 1.3 : Liste des équipements de l'ASU de LGA [3].....	31
Tableau 2.1 : Exemple de scénario HAZID – Circuit de refroidissement Cofely.....	35
Tableau 2.2 : Résultats de l'analyse <i>HAZID</i> sur l' <i>ASU</i>	35
Tableau 2.3 : Grille de cotation des Gravité de défaillances pour AMDEC [7] [8]	41
Tableau 2.4 : Grille de cotation d'occurrence de défaillances pour AMDEC [7] [8].....	42
Tableau 2.5 : Grille de cotation de détection de défaillances pour AMDEC [7] [8]	42
Tableau 2.6 : Grille de cotation de criticité de défaillances pour AMDEC	43
Tableau 2.7 : Extrait du tableau AMDEC.....	43
Tableau 2.8 : La répartition des modes de défaillance par tranche de criticité	44
Tableau 2.9 : Tableau d'évaluation du <i>SCR</i>	47
Tableau 2.10 : Tableau d'évaluation du <i>OCR</i>	48
Tableau 2.11 : Tableau d'évaluation du <i>AFPF</i>	49
Tableau 2.12 : Résultats du calcul <i>MPI</i>	50
Tableau 2.13 : Résultats de l'analyse <i>SERP</i>	51
Tableau 3.1 : Résultats d'ajustements des lois	63
Tableau 3.2 : Résultats obtenue des tests d'ajustements	74
Tableau 3.3 : Résultats des tests d'ajustements	76
Tableau 3.4 : Résultats d'analyse du RUL anticipée.....	85
Tableau 4.1 : Coûts d'intervention de rechange estimée	98
Tableau 4.2 : Résultats des simulations de politiques de maintenance sur 6 ans	98
Tableau 5.1: Feuille de route de développement du produit	105

Liste des abréviations

AFF	Asset Failure Factor
AFNOR	Association Française de Normalisation
AFPF	Asset Failure Probability Factor
AIC	Akaike Information Criterion
AICc	Corrected Akaike Information Criterion
ALN	Armée de Libération Nationale
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité
API	Application Programming Interface
ASU	Air Separation Unit (Unité de Séparation d’Air)
BIC	Bayesian Information Criterion
BMS	Building Management System
Bulk	Produits en vrac
CCR	Component Criticality Ranking
CDF	Cumulative Distribution Function (Fonction de répartition cumulée)
CSV	Comma-Separated Values (format de fichier)
EDF	Empirical Distribution Function (Fonction de répartition empirique)
ENGI	Entreprise Nationale de Gaz Industriels
EPRI	Electric Power Research Institute
ERP	Entreprise Resource Planning
FMEA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis
GMAO	Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur
GWP	Global Warming Potential
GUI	Graphical User Interface (Interface graphique utilisateur)
HAZID	Hazard Identification
HFC	Hydrofluorocarbures
IPR	Indice de Priorité de Risque
ISO	International Organization for Standardization

LGA	Linde Gas Algérie
LIMSS	Linde Integrated Management System Standards
LIN	Liquid Nitrogen (Azote liquide)
LOX	Liquid Oxygen (Oxygène liquide)
MIG	Metal Inert Gas (Soudage à l'électrode fusible et gaz inerte)
MIL-P-1629	Military Procedure Standard P-1629
MLE	Maximum Likelihood Estimation (Méthode du maximum de vraisemblance)
MPI	Maintenance Priority Index
MTTF	Mean Time To Failure (Durée de vie moyenne)
MVP	Produit Minimum Viable
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NF X 60-510	Norme Française de l'AMDEC
OCR	Operational Criticality Ranking
OC	Operational Cost
ODP	Ozone Depletion Potential
PDF	Probability Density Function (Fonction de densité de probabilité)
PFD	Process Flow Diagram (Schéma de procédé)
PGF	Packaged Gas Products
PGP	Packaged Gas Products
POE	Polyol Ester
PRNG	Pseudo-Random Number Generator (Générateur pseudo-aléatoire)
Q	Quality
R134a	1,1,1,2-Tétrafluoroéthane
RPN	Risk Priority Number
RUL	Remaining Useful Life (Durée de vie résiduelle)
S	Safety
SCR	System Criticality Ranking
SERP	System & Equipment Reliability Prioritization

SHEQ	Safety, Health, Environment and Quality
SMI	Système de Management Intégré
SPA	Société Par Actions
TIG	Tungsten Inert Gas (Soudage à l'électrode de tungstène et gaz inerte)
TP	Throughput Process
TTF	Time To Failure (Temps de fonctionnement avant défaillance)

Introduction Générale

Introduction Générale

De nos jours, l'importance de la fonction maintenance s'est accrue en raison de son rôle essentiel dans le maintien et l'amélioration de la disponibilité, de l'efficacité des performances, de la qualité des produits, du respect des délais de livraison, des exigences environnementales et de sécurité, ainsi que de la rentabilité globale des installations industrielles. À l'inverse, le manque de maintenance peut provoquer des pannes imprévues, une usure accélérée, des surcoûts et des arrêts de production. Ces conséquences impactent directement la compétitivité, la conformité réglementaire et la durabilité des installations.

Dans ce contexte, Linde Gas Algérie, acteur majeur de la production de gaz industriels en Algérie, fait face à des difficultés croissantes liées à la dégradation progressive de certains équipements de son unité de séparation d'air (ASU), notamment le circuit de refroidissement Cofely. Ce dernier, sujet à des fuites récurrentes de fluide frigorigène, ne bénéficie actuellement que d'une maintenance réactive, consistant en des recharges ponctuelles sans véritable diagnostic approfondi ni stratégie préventive structurée. Par ailleurs, malgré l'obligation d'un programme de maintenance planifiée tous les six ans, aucune opération complète n'a été réalisée sur ce circuit depuis plusieurs cycles, en raison d'objectifs de production prioritaires.

Face à cette situation, ce projet de fin d'études vise à proposer une approche d'analyse statistique et stochastique de la fiabilité du circuit Cofely, afin de mieux comprendre son comportement, d'anticiper les défaillances, et de définir la stratégie de maintenance optimale. Pour cela, nous appuierons sur l'analyse statistique des temps de fonctionnement avant panne (TTF), l'ajustement de lois de probabilité, et la simulation Monte Carlo. Cette démarche nous permettra d'estimer des indicateurs clés (fiabilité, taux de panne, RUL) et de justifier des décisions de maintenance.

Dans une seconde phase, nous proposerons un modèle stochastique basé sur les chaînes de Markov afin de simuler différentes politiques de maintenance (réactive, préventive, rechange) et d'en comparer les impacts. Enfin, une interface utilisateur sera développée pour faciliter l'accès aux calculs de fiabilité et de RUL, et soutenir la prise de décision sur le terrain, avec une conception pensée pour une application générale, au-delà du seul cas étudié.

Ce travail s'articulera autour de cinq chapitres. Dans le premier chapitre, nous présenterons l'entreprise Linde Gas Algérie, le site de Reghaïa ainsi que l'unité de séparation des gaz de l'air.

Le deuxième chapitre sera consacré à une analyse des risques et des défaillances du système étudié. Ensuite, le troisième chapitre comportera une analyse de fiabilité, menée à travers une modélisation statistique et une simulation de type Monte Carlo. La suite du travail, présentée dans le quatrième chapitre, portera sur la modélisation stochastique du système via une chaîne de Markov, ainsi que sur la simulation de différentes politiques de maintenance. Enfin, dans le cinquième chapitre, nous présenterons une interface d'analyse de fiabilité développée dans le cadre d'un projet de start-up.

Chapitre 01

Présentation Du Contexte

Industriel

Chapitre 1 : Présentation du contexte industriel

Ce chapitre est consacré à la présentation de Linde Gas Algérie. Il est essentiel de comprendre à la fois l'environnement industriel de l'entreprise et le procédé technique concerné, afin de situer notre étude dans son contexte réel d'application.

Dans une première partie, nous dresserons un aperçu général de l'entreprise, en mettant en lumière son historique, ses activités principales et sa mission. La seconde partie portera sur la description du procédé de séparation des gaz de l'air, qui constitue le cœur technologique de l'unité étudiée.

1.1 Présentation de Linde Gas Algérie

Linde Gas Algérie (LGA) est le fruit d'un partenariat entre *The Linde Group*, installé en Algérie en 2007, et l'Entreprise Nationale de Gaz Industriels (ENGI), où Linde possède 66% de l'entreprise et ENGI possède les 34% restantes.

A travers une gamme complète en gaz industriels, Linde Gas Algérie, a pour objectif principal la prise en charge des besoins générés par la multiplication de l'utilisation de ces gaz dans divers secteurs économiques. [1]

La fiche technique présentée dans le tableau 1.1 présente des informations générales sur LGA [1].

Tableau 1.1 : Présentation de Linde Gas Algérie

Elément	Information
Nom de l'entreprise	Linde Gas Algérie
Logo	
Adresse de la direction	23, Avenue de l'ALN, Hussein Dey, Alger
Site web	https://www.linde.dz/
Forme juridique / Capital	Société Par Actions (SPA)
Activité principale	Production, conditionnement, commercialisation et distribution de gaz industriels, alimentaires et médicaux
Produits	- Gaz médicaux : Oxygène médical, protoxyde d'azote, oxyde d'éthylène - Gaz industriels : Azote, oxygène industriel, argon, acétylène, hydrogène - Gaz alimentaires : Dioxyde de carbone (CO₂) alimentaire - Autres gaz : Fréons, gaz purs, mélanges (ex. Argon-CO₂)
Taille de l'organisation	- Effectif (fin février 2015) : entre 500 et 600 employés - Capital social : 1.500.000.000 DA - Effectif site de Reghaïa : 132 employés - Superficie site de Reghaïa : 35 000 m² - Surface construite : 16 840 m² dont 6 375 m² bâtis

1.1.1 Historique de LGA

En 1972, l'entreprise Air Liquide a été nationalisé et intégrée à la Société Nationale de Sidérurgie (SNS). En 1983, l'Entreprise Nationale de Gaz Industriels (ENGI) est née lors de la restructuration de la SNS qui a été rachetée par le Groupe Linde GAS en 2007.

Le 18 Juin 2007 marque la naissance de Linde GAS Algérie (LGA), une unité du groupe Allemand « The Linde Group ». [1]

1.1.2 Implantation géographique

Le Groupe Linde est une entreprise de premier plan dans le domaine des gaz et de l'ingénierie, avec environ 60000 employés travaillant dans plus de 100 pays à travers le monde. En Algérie, LGA est présente par un réseau comprenant 9 sites de production : Reghaïa, Annaba, Constantine, Ouargla, Oran, Bouira, Sidi Bel Abbés, Arzew et Skikda, assurant une couverture de plus de 80 % du marché Algérien [1]. Dans la figure 1.1 on voit la répartition de LGA sur le territoire national :

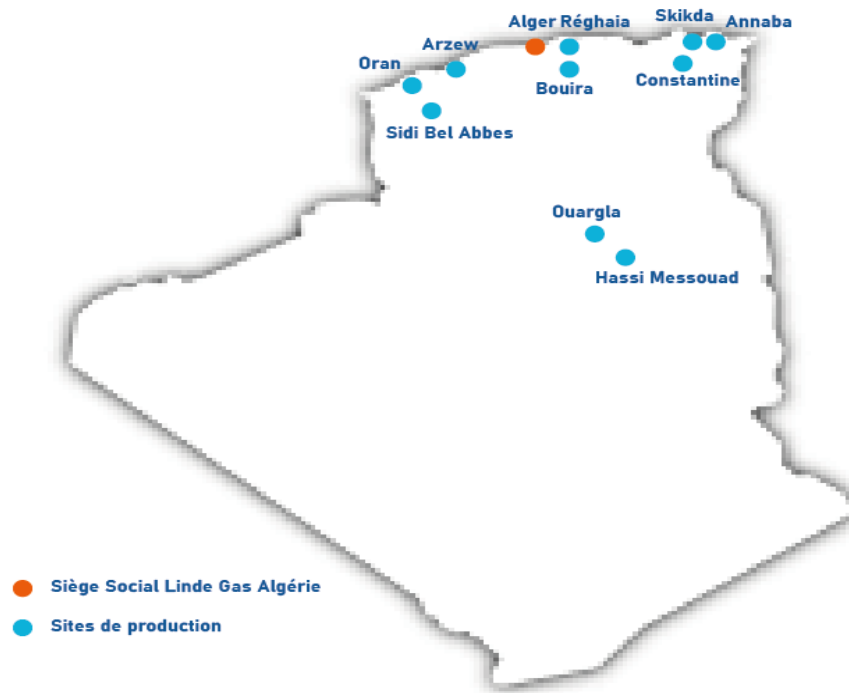


Figure 1.1 : Répartition mondiale du groupe Linde [1]

1.1.3 Organigramme de l'entreprise

Linde Gas Algérie dispose d'une organisation structurée autour de trois grandes directions : la direction de site, la direction réalisation, et la direction support. Chaque site (Reghaïa, Constantine, Annaba, Skikda, Bouira, Ouargla, Sidi Bel Abbés, Arzew et Oran) est supervisé par un Plant Manager. La direction réalisation regroupe les opérations (Bulk et PGP) ainsi que les services commerciaux et marketing. La direction support intègre les départements juridiques, informatiques, ressources humaines, achats, finances et SHEQ (Sécurité, Hygiène, Environnement, Qualité). Cette dernière comprend également plusieurs fonctions centrales spécialisées (qualité et audit SMI, sécurité, environnement, hygiène et santé, process safety et sécurité alimentaire) ainsi qu'un réseau de responsables SHEQ répartis sur les différents sites du pays.

Linde Gas Algérie est organisé comme le présente la figure 1.2 ci-dessous :

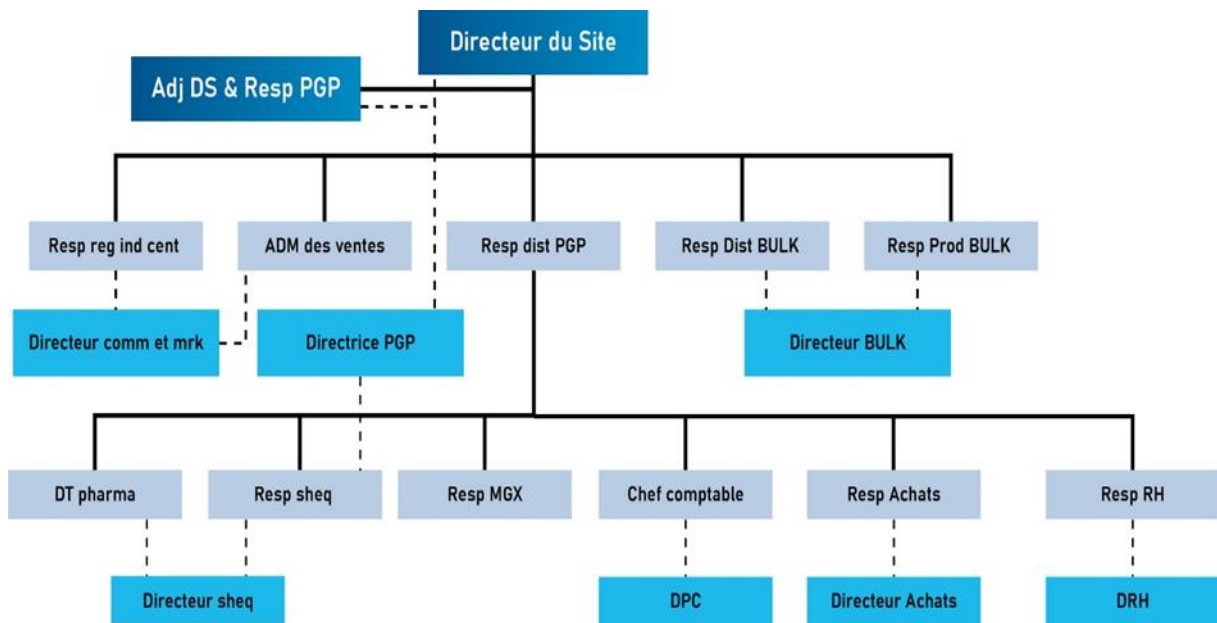


Figure 1.2 : Organigramme de LGA [1]

1.1.4 Engagements et Certifications de LGA

Linde Gas Algérie s'engage dans une démarche d'amélioration continue de la qualité de ses produits et services, tout en veillant au respect des normes les plus strictes en matière de santé, de sécurité au travail et de protection de l'environnement. [1]

Elle garantit que l'ensemble de ses stations de remplissage et unités de production similaires fonctionnent selon des spécifications uniformes. Cette harmonisation assure à ses clients un niveau constant de qualité de produits.

1.1.4.1 Politique QHSE

Linde Gas Algérie dispose d'une politique SHEQ structurée, qui constitue un pilier fondamental de sa stratégie. Elle a pour objectif d'assurer un haut niveau de sécurité, notamment dans les secteurs sensibles tels que les produits alimentaires et les boissons, en garantissant la qualité, la conformité réglementaire et la confiance des clients. [1]

1.1.4.2 Certifications

Linde Gas Algérie est certifiée selon plusieurs normes internationales majeures, garantissant la qualité, la sécurité, et la responsabilité environnementale [1]:

- **ISO 9001 :2015** : Gestion de la qualité.

- **ISO 14001 :2015** : Management environnemental pour améliorer la performance écologique.
- **ISO 45001 :2021** : Santé et sécurité au travail, avec un focus sur la prévention des risques et le bien-être psychosocial.
- **ISO 22000** : Sécurité alimentaire dans la chaîne d’approvisionnement.

1.1.4.3 Système de management & Standards Linde (LIMSS)

Linde Gas Algérie applique un Système de Management Intégré (SMI) basé à la fois sur les référentiels internationaux et sur les standards internes du groupe Linde, appelés LIMSS (Linde Integrated Management System Standards) [1]. Ce cadre global combine les normes internationales et les standards internes du groupe Linde, sa structuré permet :

- De standardiser les procédures d’exploitation et les fonctions clés,
- De respecter les exigences légales et réglementaires,
- Et de promouvoir l’amélioration continue en SHEQ.

1.1.5 Présentation du site de Reghaïa

Le site de Reghaïa est l'un des 9 sites de Linde Gas Algérie. Il comporte plusieurs ateliers structurés en fonction des missions techniques et des exigences de production. L’organigramme de ces ateliers est présenté dans la figure 1.3 ci-dessous [1]:

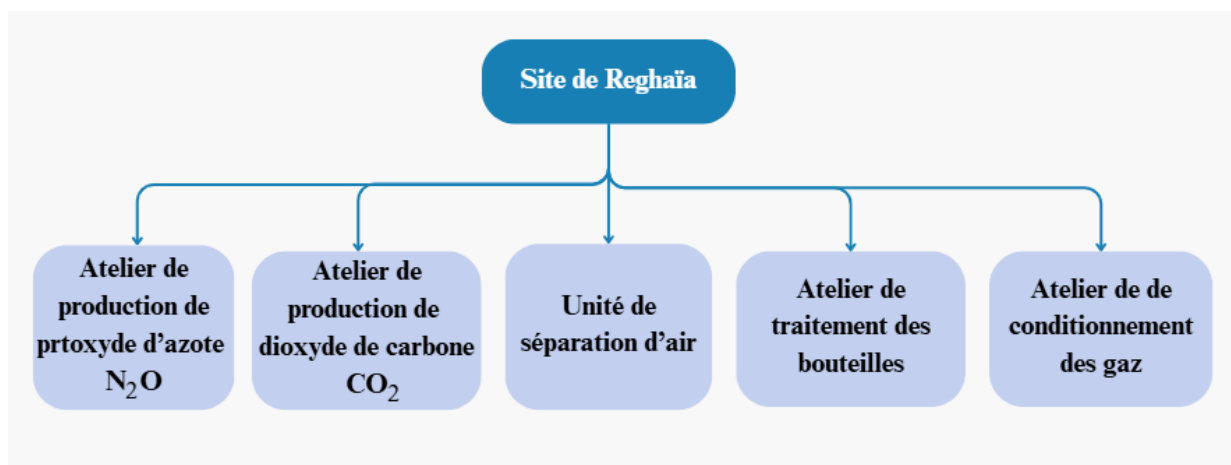


Figure 1.3 : Organisation des ateliers au sein de l’unité de Reghaïa [1]

Tous ces ateliers sont illustrés dans le plan de masse de la figure 1.4 ci-dessous :

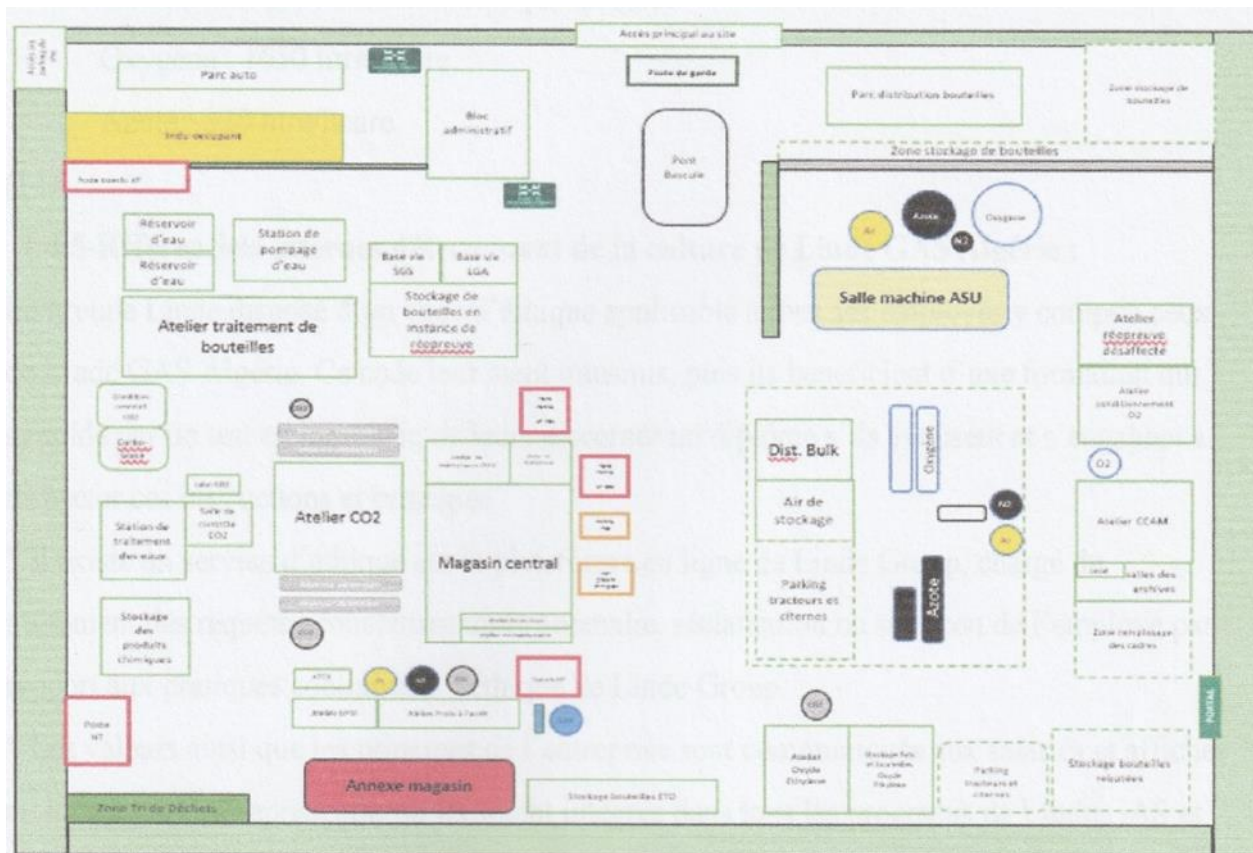


Figure 1.4 : Plan de masse de Reghaïa [1]

1.1.5.1 Gamme de produits

Le tableau 1.2 représente une liste des produits de LGA à Reghaïa :

Tableau 1.2 : Gamme de produits de LGA [1]

Usage	Gamme
Gaz médicaux	-O ₂ médical -Protoxyde d'Azote (N ₂ O) -Oxyde d'éthylène (C ₂ H ₄ O)
Gaz industriels	-Azote (N ₂) -Oxygène industriel (O ₂) -Argon (Ar) -Acétylène (C ₂ H ₂) -Hydrogène (H ₂)
Gaz à usage alimentaire	-Dioxyde de Carbone alimentaire (CO ₂)
Produits chimiques conditionnés	-Ammoniac (NH ₃) -Ethylène (C ₂ H ₄) -Chlorure d'hydrogène (HCl) -Dioxyde de soufre (SO ₂) -Hexafluorure de soufre (SF ₆)
Autres gaz	-Fréons -Gaz purs -Mélanges (Ar-CO ₂)

1.1.5.2 Capacité de production et conditionnement

La capacité de production et conditionnement de LGA sur le site de Reghaïa uniquement est [1] :

- ❖ Capacités de production :
 - Gaz carbonique : 2 tonnes/heure.
 - Oxygène : 4275 litres/heure.
 - Azote : 1695 litres/heure.
 - Protoxyde d'azote : 100 Kg/heure.
- ❖ Capacité de conditionnement :
 - Oxygène : 400 m³/heure.
 - Azote : 400 m³/heure.
 - Gaz carbonique :
 - Bouteille : 400 Kg/heure.

- Cadre : 100 Kg/heure.
- Argon : 400 m³/heure.
- Protoxyde d'azote : 200 Kg/heure.
- Traitements de bouteilles : 200 bouteilles/jour.

1.2 Présentation de l'Unité de Séparation d'Air

Une Unité de Séparation d'Air, autrement dit *Air Separation Unit (ASU)*, est une installation industrielle conçue pour séparer l'air atmosphérique en ses principaux composants (l'azote, l'oxygène et l'argon), grâce à une distillation cryogénique.

L'ASU du site de Reghaïa fonctionne 24 heures sur 24 et 365 jours par an pour produire de l'azote, oxygène et argon liquides, afin de répondre aux besoins constants des clients. [1]

1.2.1 Procédé de séparation d'air

En mai 1895, **Carl von Linde** réalisa une expérience dans son laboratoire de Munich, en Allemagne, qui mena à l'invention du premier procédé continu de liquéfaction de l'air, fondé sur **l'effet Joule-Thomson** de réfrigération et sur le principe de l'échange thermique à contre-courant. Cette découverte marqua un tournant décisif dans le développement des technologies de séparation cryogénique de l'air. [2]

Le procédé de Linde repose sur la liquéfaction de l'air par détente (effet Joule-Thomson), après compression et refroidissement, grâce à un échangeur thermique à contre-courant. L'air liquéfié est ensuite introduit dans une colonne de distillation (ou rectification) où les différences de points d'ébullition des principaux constituants, notamment l'azote et l'oxygène, permettent leur séparation. En 1910, Linde améliore ce procédé en introduisant un système à double colonne, permettant la production simultanée d'oxygène et d'azote de haute pureté. Ce système, toujours en usage aujourd'hui, associe condensation et évaporation dans une unité d'échange thermique pour maximiser le rendement énergétique du processus. [2]

La production d'argon, bien qu'il ne représente que 0,93 % de l'air, est également intégrée à ce procédé. Grâce à une colonne d'argon dédiée, reliée à un point spécifique de la colonne basse pression où la concentration d'argon est maximale. [2]

Afin de mieux comprendre le fonctionnement de l'unité de séparation d'air selon le procédé de Linde, il est pertinent de décomposer les différentes étapes du processus, de l'aspiration de l'air jusqu'à la récupération des trois gaz purs.

Le schéma (figure 1.6) ci-dessous (P&ID) illustre l'enchaînement des différentes opérations et les principaux équipements impliqués dans le procédé de séparation d'air de LGA [3]:

À partir de ce schéma, les étapes principales du procédé peuvent être décrites comme suit [3] :

1. Aspiration et filtration de l'air :

L'air ambiant est aspiré par des compresseurs puis filtré pour retenir les particules supérieures à 2 μm , telles que les poussières.

2. Compression :

L'air est comprimé à environ 4,6–5,4 bars, ce qui élève sa température. Le débit volumique est de 12 200 Nm^3/h . La compression s'effectue en 3 étages dans un compresseur centrifuge C1161, avec deux réfrigérants inter-étages qui refroidissent l'air entre chaque étage.

3. Refroidissement initial :

L'air comprimé est pré-refroidi à environ 25 °C dans les refroidisseurs E1121 (refroidissement par un premier circuit d'eau froide - tour de refroidissement) puis E2418 (refroidissement à l'eau froide de l'unité de réfrigération K2476, circuit Cofely), jusqu'à environ 20 °C.

4. Élimination du CO₂ et de l'humidité :

L'air traverse un séparateur d'eau D2431 pour retirer les gouttelettes résiduelles. Ensuite, il est purifié des contaminants (humidité, CO₂, hydrocarbures) par adsorption sur des tamis moléculaires A2626A/B remplis d'alumine et de zéolithe.

Deux tamis fonctionnent en alternance : l'un en service, l'autre en régénération par passage d'azote sec chauffé via le réchauffeur E2618 et l'accumulateur E2621. La pression est maintenue à 5,3 bars. Après régénération, l'adsorbeur est refroidi par un gaz froid (azote impur provenant de la boîte froide).

5. Compression et refroidissement avant la boîte froide :

L'air sec est dirigé vers un compresseur de recyclage C1461 qui élève la pression de 5 à 33 bars et la température de 31 à 115 °C. L'air est ensuite refroidi dans le refroidisseur E1421, puis comprimé à nouveau à 49,6 bars par le turbo-compresseur à turbine C3420. Le flux de sortie est refroidi dans l'échangeur E3421 puis dans le refroidisseur E3427 (eau de l'unité K2476, circuit Cofely).

Un débit d'air de 24 500 Nm³/h entre ensuite dans la boîte froide où il est refroidi par le flux de produit froid dans l'échangeur principal à plaques E3116.

6. Refroidissement cryogénique et détente :

L'air comprimé entre dans la boîte froide, où il est refroidi à contre-courant par les flux produits jusqu'à -70 °C. Une partie de l'air (18 450 Nm³/h) est détendue dans la turbine, produisant la réfrigération cryogénique nécessaire et une autre partie de l'air comprimé (6 022 Nm³/h) est refroidie jusqu'à -159 °C puis détendue via une vanne de Joule-Thomson (ouverte à 80 %, pression 5,5 bars), injectée au 6^e plateau de la colonne basse pression T3211 sous forme d'un mélange 80 % liquide – 20 % vapeur, améliorant le transfert matière et chaleur. L'autre partie (12 670 Nm³/h) est recyclée vers le turbo-compresseur.

7. Séparation cryogénique dans les colonnes :

La boîte froide contient cinq colonnes de distillation : deux pour O₂/N₂ et trois pour l'argon.

- La colonne moyenne pression T3211 (54 plateaux, 5 bars) sépare l'air en un liquide enrichi en oxygène (38 %) au bas et un azote pur en tête. Le reflux est généré par condensation de l'azote contre l'oxygène dans le condenseur E3216.
- L'oxygène liquide alimente la colonne basse pression T3212 (environ 1,25 bars) où la séparation finale a lieu : oxygène liquide pur au fond et azote gazeux en tête.
- Le liquide enrichi en oxygène est sur-refroidi (échangeurs E3316 et évaporateur d'argon E4118), détendu dans le condenseur d'argon brut E4116, et sert de réfrigérant dans les colonnes d'argon.

8. Récupération des gaz :

- L'oxygène liquide est pompé par la pompe cryogénique P3366, partagé entre stockage (LOX D7110) et réchauffeur E3216.
- L'azote gazeux pur est réchauffé puis évacué en tant que produit (LPGAN).
- L'argon brut est séparé dans la colonne basse pression, puis raffiné dans les colonnes dédiées (T4110, T4111, T4112) pour obtenir de l'argon pur (<1 ppm O₂), liquéfié et stocké (réservoir D7531).

1.2.2 Les équipements de l'ASU

Voici les équipements principaux qui interviennent dans le procédé de séparation d'air représentés dans le tableau 1.6 ci-dessous :

Tableau 1.3 : Liste des équipements de l'ASU de LGA [3]

Équipements de traitement d'air	
S1146	Filtre d'air (entrée du compresseur)
C1161	Compresseur d'air centrifuge (4,6 bars)
C1461	Compresseur d'air de recyclage (37 bars)
C3461	Compresseur / supprimeur a turbin
D2431	Séparateur d'eau
E1121, E3421	Refroidisseurs intermédiaires
E2418, E3427	Refroidisseur d'air de procédés
K2476	Groupe frigorifique - Circuit Cofely
A2626A/B	Adsorbours à tamis moléculaires
X3471	Turbine d'entraînement du surpresseur
E3116	Boîte froide – Refroidissement à -70°C - Échangeur de chaleur principal (réchauffage des gaz)
E3316	Sur-refroidisseur
Colonne de séparation cryogénique	
T3211	Colonne de haute pression
T3212	Colonne basse pression
T4110, T4111, T4112	Colonne d'argon brut
E3216.E4116 E4117.E4118	Condenseurs des colonnes
Stockage	
D7310	Réservoir de stockage d'azote liquide (LIN)
D7110	Réservoir de stockage d'oxygène liquide (LOX)
D7531	Réservoir de stockage d'argon liquide

Ce premier chapitre a permis de présenter l'environnement industriel dans lequel s'inscrit notre étude. Nous y avons décrit l'entreprise Linde Gas Algérie, le site de Reghaïa ainsi que l'unité de séparation des gaz de l'air (ASU). Une attention particulière a été portée au procédé de séparation, qui constitue le cœur technologique de l'unité. Cette mise en contexte servira de base aux analyses techniques développées dans la suite du travail.

Chapitre 02

Analyse Des Risques Et Des Défaillances

Chapitre 2 : Analyse des risques et des défaillances

Dans ce chapitre, nous présentons la démarche d'analyse des risques entreprise afin d'identifier les systèmes critiques au sein de l'unité de séparation d'air. Nous débutons par une analyse HAZID globale visant à recenser les principaux dangers liés aux différents sous-systèmes du procédé.

Puis, nous appliquerons les méthodes AMDEC et SERP, afin d'évaluer les scénarios de défaillance potentiels et de hiérarchiser les sous-ensembles selon leur criticité.

L'approche adoptée est présentée de manière progressive dans les sections qui suivent, en commençant par l'analyse HAZID menée sur l'ensemble de l'ASU.

2.1 Identification des dangers *HAZID*

The Hazard Identification (HAZID), ou l'identification des dangers, est une approche d'analyse qualitative des risques dont l'objectif est d'identifier les dangers potentiels liés aux produits, installations, procédés et à l'environnement, d'examiner les effets de ces dangers. Elle propose aussi des recommandations et un plan d'action pour réduire le risque à un niveau acceptable. [4] [5]

Dans le cadre de notre projet, une étude HAZID a été réalisée afin d'identifier de manière globale les équipements de l'ASU dont la défaillance est susceptible de causer des scénarios de dangers potentiels, affectant la sécurité des personnes, l'intégrité des équipements et l'environnement. Le tableau 2.1 présente un exemple représentatif issu de cette étude, portant sur l'analyse du Circuit de refroidissement frigorifique « COFELY ».

L'ensemble de l'étude HAZID, couvrant l'ensemble des équipements de l'ASU, est présenté en Annexe A.

Tableau 2.1 : Exemple de scénario HAZID – Circuit de refroidissement Cofely

HAZID PROCESS – IDENTIFICATION DE DANGERS				
Système : Unité de séparation d'air (ASU)			Linde Gas Algérie - Reghaïa	
N°	Opération / équipement	Mot Guide	Cause	Scénarios Potentiels Conséquences
12	Refroidissement à 10°C / Circuit frigorifique (COFELY)	Surchauffe	Conditions climatiques extrêmes	- Elévation de température du process. - Risque de surchauffe des équipements. - Arrêt ou ralentissement de la production.
			Défaillance du 1er circuit de refroidissement.	
			Contamination de l'eau => réduisant l'efficacité thermique	

2.1.1 Synthèse des résultats HAZID sur l'ASU

D'après l'analyse HAZID menée sur l'ASU, nous avons identifié les sous-systèmes dont la défaillance pourrait engendrer des scénarios dangereux. Les résultats sont regroupés dans le tableau 2.3.

Tableau 2.2 : Résultats de l'analyse HAZID sur l'ASU

Sous système	Nombre de scénarios dangereux
Circuit frigorifique Cofely	10
Circuit tour de refroidissement	10
Tamis moléculaire	3
Turbine	1

L'analyse nous a permis d'identifier 10 scénarios dangereux issues de la défaillance du circuit de refroidissement COFELY, soit le même nombre que pour le circuit de tour de refroidissement. Cependant, pour le reste de l'étude, nous avons choisis de se focaliser sur le circuit COFELY, non seulement pour le nombre de scénarios identifiés, mais surtout pour le nombre élevé de pannes historiquement observées sur ce circuit par rapport aux autres équipements.

Ainsi, même en l'absence d'une analyse formelle de criticité, la convergence entre les résultats de la HAZID et les données de pannes réelles met en évidence que le circuit COFELY constitue un maillon critique du procédé cryogénique, justifiant pleinement son traitement prioritaire dans le cadre de cette étude. Ce système sera traité en détail dans les analyses AMDEC et SERP.

2.2 Description du système COFELY

Avant de procéder à l'analyse détaillée des risques et des défaillances spécifiques aux composants du circuit frigorifique, il est essentiel d'en comprendre le fonctionnement général, le fluide frigorigène utilisé, ainsi que les différents équipements qui le composent. En ce qui suit, nous allons expliquer le procédé de refroidissement frigorifique et ses équipements en détail.

2.2.1 Fluide frigorigène R134a

Le R134a ou 1,1,1,2-tétrafluoroéthane est un fluide frigorigène de la famille des hydrofluorocarbures (HFC). C'est un gaz incolore, faiblement toxique et non inflammable, classé dans le groupe de sécurité A1 (A : Faible toxicité ; 1 : Faible inflammabilité).

On le retrouve dans de nombreuses applications, notamment :

- la climatisation automobile,
- les réfrigérateurs domestiques et commerciaux,
- les chambres froides,
- les pompes à chaleur,
- et le transport frigorifique.

2.2.2 Fonctionnement du circuit frigorifique

Le système frigorifique Cofely appelé aussi Quantum est une installation, allemande, avancée utilisée dans le domaine industriel pour la production de froid. Ce système fonctionne avec le fluide frigorigène R134a et intègre des technologies modernes telles que des turbos compresseurs à entraînement magnétique, des évaporateurs à faisceau tubulaire et des condenseurs à air ou à eau. La figure 2.1 ci-dessous illustre le schéma de P&ID du circuit frigorifique :

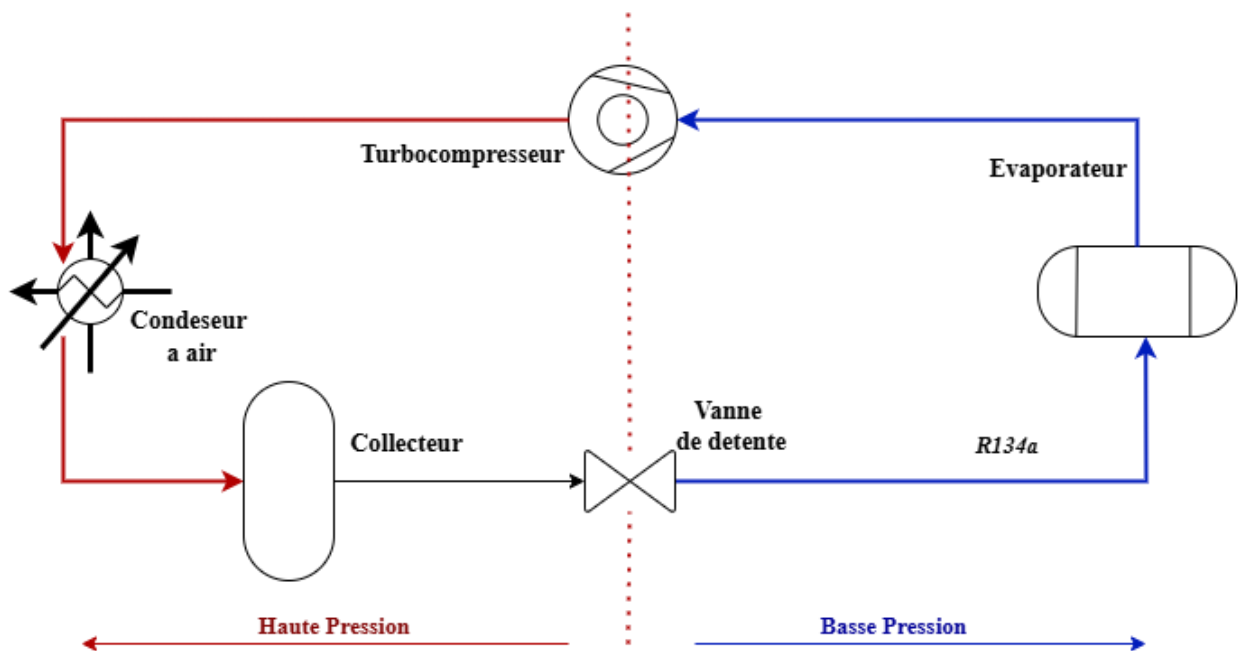


Figure 2.1 : P&ID du circuit frigorifique [6]

Le fonctionnement du circuit frigorifique Cofely peut être résumé comme suit :

A. Compression du fluide frigorigène

Le cycle frigorifique du Quantum commence par la compression du fluide frigorigène R134a, qui entre dans le compresseur à l'état gazeux, sous basse pression et basse température. Le compresseur aspire ce gaz et le comprime, augmentant ainsi sa pression et sa température. Cette élévation de pression et de température prépare le fluide à céder sa chaleur dans l'étape suivante du cycle.

Dans le système Quantum, cette compression est réalisée par des turbo-compresseurs semi-hermétiques à entraînement magnétique sans contact. Cette technologie élimine le besoin de lubrification, réduisant ainsi l'usure et les besoins en maintenance. Chaque compresseur est associé à un moteur à vitesse variable, permettant une régulation fine de la puissance frigorifique. Le refroidissement du moteur est assuré par injection de réfrigérant, garantissant une performance optimale.

B. Condensation du fluide frigorigène

Après la compression, le fluide frigorigène, à haute pression et haute température, entre dans le condenseur. La fonction principale du condenseur est de refroidir ce fluide en lui permettant de céder sa chaleur à un autre fluide, généralement l'air ambiant ou l'eau de refroidissement, selon la configuration. Ce transfert de chaleur provoque la condensation du fluide frigorigène, qui passe ainsi de l'état gazeux à l'état liquide, étape essentielle pour assurer la continuité du cycle frigorifique.

Dans le système Quantum, le condenseur est de type refroidi par air : le fluide frigorigène libère sa chaleur à l'air extérieur grâce à des tubes en cuivre conçus pour favoriser l'échange thermique. Des ventilateurs assurent la circulation de l'air autour des tubes, optimisant ainsi le refroidissement.

C. Collecte du fluide frigorigène

Après la sortie du fluide frigorigène du condenseur, le collecteur reçoit le fluide liquide et assure sa distribution vers le détendeur. Il centralise et équilibre les flux de fluide, permettant une répartition homogène et contrôlée du fluide frigorigène dans le système. Cette fonction est essentielle pour maintenir la stabilité des pressions et débits, et ainsi garantir un fonctionnement efficace et équilibré du cycle frigorifique.

D. Détente du fluide frigorigène

Le détendeur assure la réduction brusque de la pression du fluide frigorigène liquide provenant du condenseur. Cette chute de pression provoque une baisse significative de la température du fluide, qui passe alors en phase mixte liquide-vapeur. Ce changement d'état est indispensable pour que le fluide puisse absorber efficacement la chaleur dans l'évaporateur. Par ailleurs, le détendeur régule le débit de fluide frigorigène en fonction de la demande thermique du système, garantissant un équilibre optimal du cycle frigorifique.

E. Vaporisation du fluide frigorigène

L'évaporateur est l'élément du circuit frigorifique où le fluide frigorigène, sous forme de mélange liquide-vapeur à basse pression et basse température, absorbe la chaleur de l'environnement à refroidir. Grâce à ce transfert thermique, le fluide change d'état, passant complètement en phase vapeur.

Cette absorption de chaleur permet de maintenir la température souhaitée dans le local ou le procédé industriel, tout en assurant la continuité du cycle frigorifique en préparant le fluide pour la compression suivante. La performance de l'évaporateur est déterminante pour l'efficacité globale du système, car elle influence directement la capacité frigorifique et la consommation énergétique. [6]

2.2.3 Equipements du circuit COFELY

A. Compresseur :

Le compresseur du Quantum est un turbocompresseur semi-hermétique à entraînement magnétique sans contact. Ce design élimine les pièces d'usure mécaniques comme les paliers lubrifiés, ce qui réduit considérablement les besoins de maintenance. Le moteur à vitesse variable intégré permet une modulation continue de la puissance. Le compresseur est refroidi par injection directe de réfrigérant, ce qui évite tout système de refroidissement externe supplémentaire.

B. Évaporateur :

L'évaporateur est un échangeur de chaleur à faisceau tubulaire horizontal, de type noyé. Le fluide caloporteur circule à l'intérieur des tubes en cuivre, pendant que le fluide frigorigène R134a s'évapore autour de ces tubes dans une cuve fermée. Cette configuration assure un excellent transfert thermique et permet également d'accumuler temporairement le réfrigérant, jouant un rôle de réservoir. L'accessibilité aux zones internes facilite les opérations de nettoyage et d'inspection.

C. Condenseur :

Le condenseur du Quantum est composé de trois groupes de huit aérocondenseurs, chacun constitué d'un ensemble de tubes en cuivre munis d'ailettes en aluminium, refroidis par des ventilateurs axiaux à haut rendement. Installé sur le toit du bâtiment, ce système permet un rejet direct de la chaleur dans l'air ambiant, sans nécessiter de circuit d'eau. Les ventilateurs, souvent à vitesse variable, assurent une régulation thermique optimale tout en limitant la consommation énergétique.

D. Détendeur :

Le détendeur est un équipement essentiel du circuit frigorifique, placé en amont de l'évaporateur. Sa fonction principale est d'assurer la détente du fluide frigorigène, c'est-à-dire de provoquer une chute de pression facilitant son évaporation. Dans notre installation, il s'agit d'une vanne de détente électronique pilotée par capteurs, qui ajuste précisément le débit de fluide en fonction de la charge thermique, garantissant ainsi un fonctionnement stable, même à charge partielle. Ce dispositif est intégré dans un bloc compact doté d'une isolation thermique renforcée.

E. Collecteur

Le collecteur de réfrigérant, présent uniquement sur les modèles Quantum avec condenseur externe à air, est un élément intégré à l'intérieur de l'unité frigorifique. Il se compose d'une

calandre simple, sans éléments internes additionnels. Sa fonction principale est d'assurer le stockage temporaire du fluide frigorigène, permettant une régulation efficace du circuit lors des variations de charge thermique.

F. Armoire électrique

L'armoire électrique centralise l'alimentation et la commande des différents éléments du système. Elle intègre un écran tactile pour l'interface utilisateur, les relais de puissance, les variateurs de fréquence, les dispositifs de sécurité (pressostats, thermostats, alarmes) ainsi qu'un automate programmable. Le système de régulation permet une supervision complète : consignes de température, modulation de puissance, suivi des défauts, communication avec le système de gestion centralisé du bâtiment (BMS). [6]

2.3 Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité), également connue sous son nom international FMEA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*), est une méthode préventive de sûreté de fonctionnement. Elle vise à anticiper les défaillances potentielles dans un produit, un processus ou un système, à en évaluer les conséquences et à définir des actions correctives pour réduire les risques. Cette démarche est largement utilisée pour améliorer la qualité, fiabiliser les équipements et maîtriser les coûts liés aux pannes.

- On distingue principalement trois types : AMDEC produit, AMDEC procédé et AMDEC processus. Dans ce travail, nous avons recours à l'AMDEC **procédé** pour évaluer les risques liés au circuit de refroidissement.
- La mise en œuvre suit plusieurs étapes clés : définition du périmètre, constitution d'une équipe pluridisciplinaire, identification des fonctions critiques, analyse des modes de défaillance, évaluation de la criticité et propositions d'actions correctives.

Les concepts clés utilisés ainsi qu'un tableau des modes de défaillance les plus répandus sont présentés en Annexe B, conformément aux normes NF X 60-010 et NF X 60-011.

2.3.1 Évaluation de la Criticité :

Ce qui diffère AMDEC à AMDE c'est l'évaluation de la criticité des modes de défaillances en utilisant IPR ou l'indice de priorité du risque. Ce dernier est obtenu en faisant le produit des trois indices :

- **Gravité** : De mineure à importante

- **Probabilité d'occurrence** : D'exceptionnelle à certaine.
- **Capacité de détection** : D'évidente à impossible.

Le tableau 2.3 ci-dessous présente la grille de cotation de la gravité des défaillances utilisée dans l'analyse AMDEC

Tableau 2.3 : Grille de cotation des Gravite de défaillances pour AMDEC [7] [8]

Valeur de Gravité (G)	Gravité	Description
1	Nulle	Aucun effet ; la défaillance est indétectable ou sans conséquence.
2	Très faible	Effet négligeable, aucune incidence sur la performance.
3	Faible	Effet minime, dérangement peu significatif.
4	Moyennement faible	Légère gêne ; le système fonctionne avec des limitations.
5	Moyenne	Fonction partiellement affectée ; réparation nécessaire mais non urgente.
6	Moyennement élevée	Fonction affectée, mais non critique ; gêne importante.
7	Élevée	Défaillance majeure, perte de performance, besoin de réparation immédiate.
8	Critique	La défaillance complète du système, affecte gravement les fonctions.
9	Très critique	Effet très grave, potentiellement dangereux, peu de contrôle.
10	Catastrophique	Effet dangereux pouvant entraîner des blessures graves ou la mort, sans avertissement.

Le tableau 2.4 ci-dessous présente la grille de cotation de l'occurrence des défaillances utilisée dans l'analyse AMDEC.

Tableau 2.4 : Grille de cotation d'occurrence de défaillances pour AMDEC [7] [8]

Valeur d'occurrence (O)	Probabilité	Description
1	Improbable	Échec pratiquement impossible (1 sur 1 500 000).
2	Presque improbable	Très peu probable (1 sur 150 000).
3	Très faible	Événement rare (1 sur 15 000).
4	Faible	Défaillance peu probable (1 sur 2 000).
5	Moyennement faible	Faible probabilité (1 sur 400).
6	Modérée	Défaillance occasionnelle (1 sur 80).
7	Moyennement élevée	Défaillance fréquente connue (1 sur 20).
8	Élevée	Défaillance répétée, processus instable (1 sur 8).
9	Très élevée	La défaillance est très fréquente (1 sur 3).
10	Très probable	La défaillance est presque inévitable (> 1 sur 2).

Le tableau 2.5 ci-dessous présente la grille de cotation de la gravité des défaillances utilisée dans l'analyse AMDEC

Tableau 2.5 : Grille de cotation de détection de défaillances pour AMDEC [7] [8]

Valeur de Détection (D)	Détection	Description
1	Parfaite	Contrôle existant assure la détection avant effet.
2	Très fiable	Détection très probable avant défaillance.
3	Fiable	Bonne capacité de détection.
4	Plutôt fiable	Moyennement élevée possibilité de détection.
5	Acceptable	Détection possible dans certaines conditions.
6	Moyenne	Détection difficile, mais parfois possible.
7	Faible	Faible possibilité d'identifier la cause.
8	Difficile	Faible probabilité de détection (procédures non fiables).
9	Très difficile	Très faible probabilité de détection.
10	Impossible	Aucune action de contrôle, détection impossible.

Voici la grille de cotation de de criticité pour AMDEC représenté dans le tableau 2.6 :

Tableau 2.6 : Grille de cotation de criticité de défaillances pour AMDEC

Valeur RPN	Criticité
1 – 40	Faible
41 – 100	Modérée
101 – 200	Élevée
> 200	Critique

2.3.2 Synthèse des résultats de l'AMDEC

Après avoir réalisé l'analyse AMDEC, nous avons pu classer l'ensemble des défaillances identifiées selon leur niveau de criticité.

Le tableau 2.7 suivant présente un extrait représentatif de cette analyse. Le tableau complet est disponible en Annexe C.

Tableau 2.7 : Extrait du tableau AMDEC

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d'air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
Tuyauterie / Circuit	Assurer le transport et la rétention du fluide	Fuite de fluide frigorigène	Corrosion interne/externe, Mauvais raccordement, Microfissures, Vieillessement des joints	- Perte de confinement - Réduction de performance du système - Pollution atmosphérique	Inspection visuelle	8	10	10	800
		Obstruction partielle	Dépôt interne	- Mauvaise circulation du fluide - Baisse d'efficacité - Surchauffe du compresseur	Capteurs de pressions / températures.	2	8	8	128
		Rupture brutale de la tuyauterie	Choc mécanique, Fatigue des conduites, Corrosion	- Arrêt total de l'installation - Risque pour le personnel et équipements adjoints - Perte de fluide	Capteurs de pressions / températures.	1	10	10	100

Le tableau 2.8 ci-dessous présente la répartition des modes de défaillance par tranche de criticité, ainsi que les équipements les plus concernés :

Tableau 2.8 : La répartition des modes de défaillance par tranche de criticité

Tranche de criticité	Niveau de risque	Nombre de cas	Pourcentage (%)	Équipements concernés les plus fréquents
1 – 40	Faible	10	22,7 %	Turbo-compresseur, Armoire électrique, Évaporateur
41 – 100	Modéré	29	65,9 %	Détendeur, Collecteur, Évaporateur, Armoire électrique, Vanne de contrôle de pression.
101 – 200	Élevé	4	9 %	Condenseur
> 200	Critique	1	2,2 %	Tuyauterie

La majorité des défaillances identifiées présentent une criticité modérée (65,9 % des cas). Cela montre que, bien que le système soit globalement fonctionnel, il présente de nombreuses faiblesses techniques qui peuvent affecter la fiabilité du processus.

Les niveaux de criticité faible (22,7 %) et élevé (9 %) viennent compléter cette répartition, montrant que certaines défaillances ont un impact plus limité, tandis que d'autres peuvent avoir des conséquences plus graves. Enfin, un cas unique a été identifié en criticité critique (2,2 %), correspondant à une fuite majeure dans la tuyauterie.

Une analyse approfondie des résultats permet d'identifier les modes de défaillance les plus fréquemment observés dans l'installation, comme le montre l'histogramme dans la figure 2.2 :

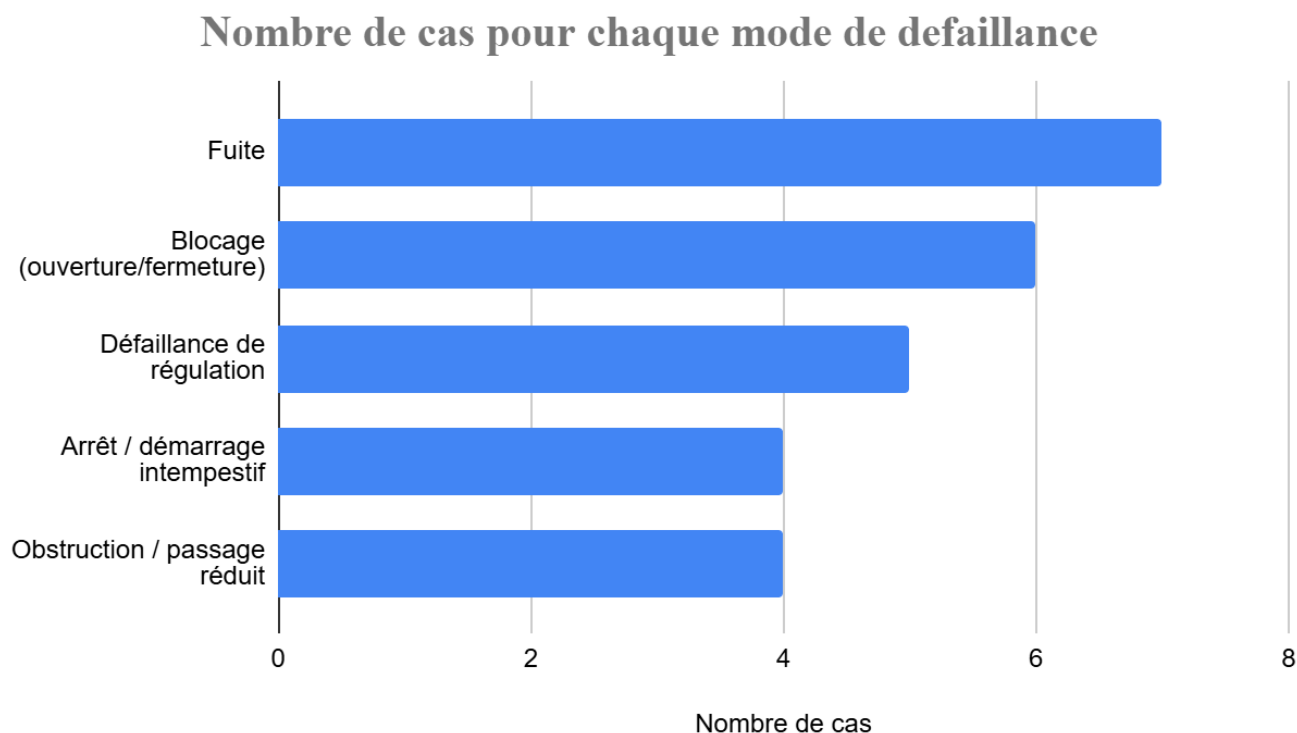


Figure 2.2: Répartition du nombre de cas en fonction des différents modes de défaillance recensés

L'analyse met en évidence que le problème de fuite est le plus récurrent, ce qui confirme les observations faites sur le terrain : des pertes régulières de fluide frigorigène sont constatées dans le circuit, sans qu'une source exacte de la fuite soit identifiée. Ce dysfonctionnement est souvent corrigé de manière temporaire par des appoints de fluide frigorigère R134a, sans traitement en profondeur de la cause réelle.

Les autres modes de défaillance identifiés, tels que le blocage, la mauvaise régulation et l'obstruction, sont également significatifs. Ces modes peuvent favoriser indirectement l'apparition de fuites en générant des surpressions ou des déséquilibres hydrauliques dans le circuit, ce qui fragilise les composants sur le long terme.

Ainsi, le problème des fuites doit être considéré non pas comme un phénomène isolé, mais comme le résultat d'un enchaînement de défaillances multiples, nécessitant une surveillance accrue des composants identifiés comme sensibles.

2.4 Priorisation de la Fiabilité des Systèmes et des Équipements

Afin de concentrer notre étude sur les équipements les plus critiques de l'installation, nous avons choisi d'utiliser la méthode de **Priorisation de la Fiabilité des Systèmes et des Équipements** autrement dit **SERP** (*System & Equipment Reliability Prioritization*). Il s'agit d'une approche systématique d'aide à la décision permettant de hiérarchiser les systèmes et composants en fonction de leur niveau de criticité, sur la base de critères tels que la sécurité, l'impact environnemental, l'impact qualité, les coûts de fonctionnement, la fiabilité et la disponibilité opérationnelle.

L'objectif principal de cette méthode est d'optimiser les efforts de maintenance en identifiant les équipements dont la défaillance aurait les conséquences les plus significatives. Grâce aux résultats obtenus via le calcul de l'indice de priorité de maintenance (MPI), il devient possible de filtrer les équipements les moins critiques et de concentrer l'analyse sur un sous-ensemble prioritaire, ce qui améliore considérablement l'efficacité du processus de fiabilité. [9]

2.4.1 Processus de SERP

Le processus SERP commence par l'examen des objectifs et buts de l'étude afin de développer des critères de criticité au niveau des composants du système. Les critères de décision pour chaque niveau de criticité sont généralement décomposés en descriptions spécifiques à chaque catégorie de criticité globale et sont classés avec des valeurs de 1 à 5.

Le personnel impliqué dans l'évaluation du SERP est invité à attribuer une note pour chaque critère, en se basant sur les descriptions de décision approuvées [9]. Ces valeurs sont ensuite traitées à l'aide d'une formule mathématique générale qui nous conduit à la valeur du MPI. Ce processus est répété pour chaque système inclus dans le périmètre du projet SERP.

Les étapes de ce processus, telles qu'appliquées dans le cadre de notre étude, sont détaillées ci-dessous :

A. Revue des objectifs de l'étude :

L'objectif de ce SERP est d'évaluer la liste des composants du système choisis pour retirer les éléments plus critiques et les introduire dans notre programme d'optimisation de fiabilité des équipements.

B. Définition des critères de criticité du SERP :

Cette étape consiste à élaborer des critères de criticité SERP applicables et adaptés à notre système. Ces critères sont : System criticality ranking, décomposés en niveaux de décision, avec des descriptions et valeurs spécifiques, attribuées selon l'impact estimé [10].

Les points suivants présentent la manière dont les critères de criticité SERP ont été définis dans le cadre de notre analyse :

- **System Criticality Ranking (SCR)**

Le classement de criticité des systèmes (**SCR**) est un indicateur utilisé pour évaluer l'importance d'un système en fonction de plusieurs critères clés nommées aspects de criticités. Il permet de classer les systèmes selon leur impact potentiel sur la sécurité, les performances et les coûts d'exploitation [9]. Le SCR est calculé par la formule suivante :

$$SCR = \frac{1}{4} \times \sqrt{TP^2 + S^2 + Q^2 + OC^2} \quad (2.1)$$

Avec :

- **TP** : Aspect système (*Throughput Process*)
- **S** : Aspect sécurité (*Safety*)
- **Q** : Aspect qualité (*Quality*)
- **OC** : Aspect coût (*Operational Cost*)

Le tableau 2.9 ci-dessous représente les valeurs spécifiques de calculs du SCR :

Tableau 2.9 : Tableau d'évaluation du SCR

Critère	Valeur du critère	Description du critère
Aspect système (<i>Throughput Process</i>) : il mesure l'impact de la perte de fonctionnalité ou la durée nécessaire à la remise en service du système		
	1	Aucun effet
	2	Perturbation de 1 à 7 jours
	3	Perturbation > 7 à 15 jours
	4	Perturbation > 15 à 30 jours
	5	Perturbation > 30 jours

Aspect sécurité (<i>Safety</i>) : basé sur la classification des composants selon leur impact sur la sécurité.		
	1	Aucun effet sur la sécurité
	2	Impact indirect sur la sécurité
	3	Impact direct sur la sécurité
Aspect qualité (<i>Quality</i>) : repose sur la tolérance définie par le fabricant pour chaque équipement ou composant.		
	1	Classe 3 : Equipment/composant avec tolérance >10%
	2	Classe 2 : Equipment/composant avec tolérance >5 - 10%
	3	Classe 1 : Equipment/composant avec tolérance 0 - 5%
Aspect coût (<i>Operational Cost</i>) : représente le coût moyen de maintenance préventif, ici estimé pour l'année 2025.		
	1	< 300
	2	≥ 300 et <800
	3	≥800 et <1 200
	4	≥1 200 et <1 600
	5	≥1 600

- **Operational Criticality Ranking (OCR)**

Le classement de criticité opérationnelle (OCR) est déterminé en fonction de la durée de la défaillance de l'équipement [10]. Le tableau 2.10 suivant présente ce classement :

Tableau 2.10 : Tableau d'évaluation du *OCR*

Durée de panne (heures)	Valeur du critère
0-20	1
≥ 21-40	2
≥ 41-80	3
≥ 81-120	4
≥ 121	5

- **Asset Failure Probability Factor (AFPF)**

Le facteur de probabilité de défaillance d'un équipement (AFPF) est obtenu en évaluant le niveau de fiabilité des équipements [10], à partir de paramètres mesurés comme les défaillances survenues au niveau du système sur la période 2020-2024.

L'AFPF correspond au pourcentage de fréquence des défaillances (%) pour l'ensemble du système, il est calculé comme suivant :

$$AFPF = \frac{Nbr\ de\ défaillances\ d'un\ équipement}{Nbr\ total\ de\ défaillances} \times 100 \quad (2.2)$$

Le classement des AFPF (AFF) est présenté dans le tableau 2.11 suivant :

Tableau 2.11 : Tableau d'évaluation du *AFPF*

Fraction de défaillance (%)	Valeur du critère
$\leq 0,1$	1
$< 0,1 - 10 \leq$	2
$< 10 - 30 \leq$	3
$< 30 - 50 \leq$	4
$< 50 - 100 \leq$	5

C. Evaluations du système par critères :

Pour l'ensemble des critères de criticité issue de l'étape précédente, une évaluation qualitative est réalisée en concertation avec le personnel de LGA (ingénieurs et techniciens process et maintenance). Il s'agit d'estimer les impacts potentiels en cas de perte de fonctionnalité du système étudié. Cette démarche permet de mesurer, pour chaque critère, les conséquences suivantes :

- **Sécurité** : risques probables pour les personnes ou les installations ;
- **Environnement** : atteintes possibles à l'environnement en cas de défaillance ;
- **Coût** : répercussions économiques, incluant les coûts de maintenance préventif ;
- **Disponibilité** : effet sur la capacité de l'unité à rester opérationnelle ;
- **Efficacité** : influence sur les performances ou le rendement global du système.

Cette phase d'analyse collaborative permet d'aboutir au tableau 2.12 ci-dessous, qui synthétise l'évaluation de chaque composant du système étudié. Cette synthèse constitue une base opérationnelle pour le calcul direct du MPI.

Tableau 2.12 : Résultats du calcul *MPI*

Composant	Aspects				SCR	OCR	AFPF		MPI SCORE
	System	Coût	Qualité	Sécurité			%	Valeur	
Turbocompresseurs (1&2&3)	2	1	3	3	2,40	4	12,5	3	28,77
Condenseur	2	4	2	1	2,50	1	3,12	2	5,00
Collecteur	2	1	1	1	1,32	1	≤ 0,1	1	1,32
Vanne de détente	1	1	3	2	1,94	2	3,12	2	7,75
Evaporateur	2	1	3	1	1,94	1	12,5	3	5,81
Vanne de contrôle pression	1	1	3	2	1,94	1	≤ 0,1	1	1,94
Armoire électrique	2	2	3	3	2,55	4	3,12	2	20,40
Tuyauterie / Circuit	2	5	2	3	3,24	4	46,87	4	51,85

D. Calcul du MPI :

L'indice de priorité de maintenance (MPI) est calculé par la formule suivante :

$$\text{MPI} = \text{SCR} \times \text{OCR} \times \text{AFPF} \quad 2.3)$$

Une fois que les valeurs MPI pour tous les composants du système sont calculés (Tableau 2.13), nous utilisons la technique de clustering pour regrouper automatiquement les MPI similaires en 4 catégories de priorité [10], comme l'illustre le tableau 2.13.

Tableau 2.13 : Résultats de l'analyse SERP

Catégorie	Valeur du MPI	Composants
Très élevé = Critique	≥ 40	Tuyauterie / Circuit
Élevé	≥ 20 et < 40	Turbocompresseurs (1&2&3) Armoire électrique
Moyen	≥ 5 et < 20	Vanne de détente Evaporateur Condenseur
Faible	< 5	Vanne de contrôle pression Collecteur

2.4.2 Synthèse des résultats de SERP

D'après l'analyse SERP appliquée à l'ensemble des composants du circuit frigorifique COFELY, il ressort que la tuyauterie nécessite une priorisation accrue en matière de maintenance, avec un indice de criticité MPI élevé de 51,85. Ce résultat met en évidence la stratégie de maintenance adoptée par Linde Algérie pour le circuit Cofely, fondée essentiellement sur une approche réactive.

En effet, le circuit de refroidissement au réfrigérant est peu maîtrisé par le personnel du site, ce qui entraîne une absence de maintenance préventive structurée. Les interventions se limitent généralement à des réparations ou des remplacements après apparition de pannes. Une fuite a été détectée ces dernières années, sans toutefois être localisée, et les registres de maintenance montrent des perturbations récurrentes sur ce circuit. Celles-ci sont généralement corrigées uniquement par des appoints de réfrigérant.

Le circuit contient environ 500 kg de R134a, et selon les recommandations du constructeur, son étanchéité devrait être vérifiée tous les trois mois. Cependant, cette vérification n'est pas effectuée par LGA, notamment en raison de la sollicitation intense du circuit dans le processus industriel et d'une perception erronée des contrôles réguliers comme étant des coûts supplémentaires. Ce choix engendre pourtant des pannes non planifiées fréquentes et des pertes significatives de production. En conclusion, l'analyse HAZID a permis de cibler le circuit Cofely comme composant critique du procédé de séparation d'air. Les évaluations AMDEC et SERP ont ensuite mis en évidence que la tuyauterie présente le niveau de criticité le plus élevé, avec un indice MPI de 51,85. Ce score

reflète à la fois la fréquence des incidents observés et les conséquences potentielles sur le fonctionnement global de l'unité.

Cette criticité s'explique par l'absence de maintenance préventive adaptée et par une stratégie principalement réactive, qui se traduit par des pertes de réfrigérant non maîtrisées et des interruptions non planifiées. Parmi les scénarios de défaillance étudiés, la fuite de fluide frigorigène a été identifiée comme le risque dominant.

Ces résultats justifient une attention particulière portée à ce scénario dans la suite du travail, où nous chercherons à modéliser le comportement du circuit et à explorer des stratégies de maintenance plus efficaces à l'aide d'outils de simulation.

Chapitre 03

Prédiction De La Fiabilité Par Simulation Monte Carlo

Chapitre 3 : Prédiction de la Fiabilité par Simulation Monte Carlo

À la suite des évaluations de risques menées sur le circuit Cofely, la tuyauterie a été identifiée comme l'équipement le plus critique, notamment en raison de sa vulnérabilité aux pertes d'étanchéité et de son exposition aux conditions environnementales. L'objectif de ce chapitre est d'exploiter les données historiques de défaillance relatives à cette tuyauterie afin de modéliser les temps de fonctionnement avant panne, mieux comprendre son comportement en service et optimiser la stratégie de maintenance.

Pour cela, une première étape consiste à modéliser statistiquement les données de défaillance, en passant par leur collecte, leur traitement et l'ajustement des lois de probabilité les plus représentatives. Une simulation de type Monte Carlo est ensuite mise en œuvre pour explorer la variabilité des défaillances et évaluer différents scénarios de vieillissement. Enfin, une analyse de fiabilité est réalisée sur la tuyauterie du circuit afin d'estimer la durée de vie résiduelle (RUL) et proposer des pistes concrètes d'amélioration de la maintenance.

3.1 Modélisation des temps avant défaillance

La modélisation des temps avant défaillance constitue la première grande partie de notre travail. Elle vise à analyser et représenter le comportement des défaillances à travers différentes étapes méthodologiques.

Le diagramme représenté par la figure 3.1 illustre de manière synthétique le déroulement de cette modélisation, depuis la collecte des données jusqu'à l'identification de la loi de probabilité la plus représentative.

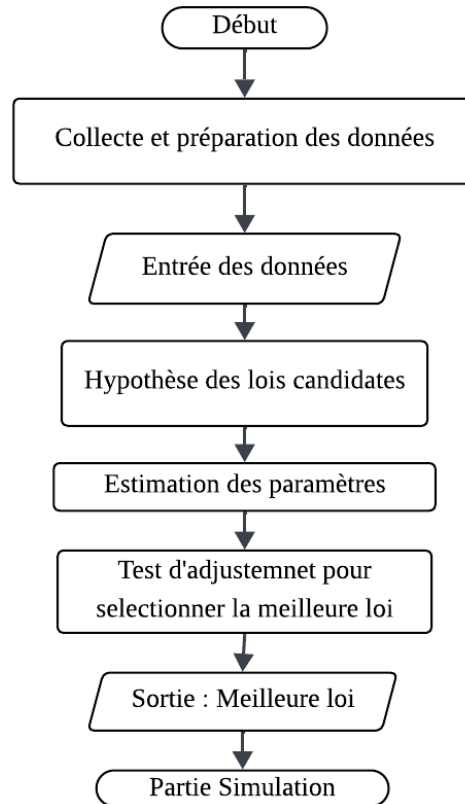


Figure 3.1 : Déroulement des étapes de modélisation

3.1.1 Préparation des données

Avant toute modélisation, une étape essentielle consiste à préparer les données de fiabilité collectées sur le circuit Cofely. Cette phase garantit que les informations exploitées par la suite sont cohérentes, complètes et adaptées à l'analyse statistique, dans le but d'assurer qu'elles reflètent fidèlement la réalité du fonctionnement du circuit.

Voici le vecteur des TTF en heures utilisés, présentée ci-dessous :

TTF_Linde (heures) = [2616, 72, 24, 48, 6360, 2088, 1176, 1200, 648, 5760, 10056, 72, 6360, 3720, 3792]

Ces données sont issues de l'historique de maintenance du circuit frigorifique Cofely par LGA, collectées sur une période de 5 ans, à partir de 2020 jusqu'à mars 2025. Elles représentent les temps de fonctionnement entre deux pannes liées aux pertes de réfrigérant (R134a).

3.1.2 Sélection des distributions candidates

La modélisation statistique des TTF repose sur le choix d'une loi de probabilité capable de représenter fidèlement le comportement observé des équipements. Ce choix est déterminant pour garantir la fiabilité des estimations et la validité des résultats issus de la simulation. Dans cette étape, quatre distributions couramment utilisées en fiabilité ont été retenues : la loi **Exponentielle**, la loi de **Weibull**, la loi **Normale** et la loi **Log normale**. Chacune de ces lois possède des caractéristiques spécifiques qui permettent de modéliser différents profils de défaillance. Elles sont présentées ci-après avec leurs propriétés et leurs paramètres associées.

3.1.2.1 Loi Exponentielle

La loi exponentielle est l'un des modèles les plus utilisés en fiabilité pour représenter la durée de vie d'un composant lorsque le taux de défaillance est constant dans le temps. Elle constitue un cas particulier de la loi de Weibull, correspondant à un paramètre de forme $\beta = 1$. Ce modèle s'applique principalement aux systèmes opérant de façon continue (comme les circuits électroniques), où les défaillances sont considérées comme aléatoires et indépendantes du temps de fonctionnement déjà écoulé. [11]

A. Expression Mathématique

La loi exponentielle de paramètre $\lambda > 0$ est définie à l'aide de plusieurs fonctions caractéristiques. Voici les principales expressions associées à cette loi :

a. Fonction de densité de probabilité (f.d.p.)

Elle donne la probabilité que la variable aléatoire prenne une valeur précise dans un intervalle infinitésimal [11] :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0 \quad (3.1)$$

b. Fonction de répartition (F.R.)

Elle permet de calculer la probabilité que la variable soit inférieure ou égale à une valeur donnée t :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, t \geq 0 \quad (3.2)$$

c. Fonction de survie

Aussi appelée fonction complémentaire de la répartition, elle donne la probabilité que l'événement ne se soit pas encore produit à l'instant t :

$$S(t) = e^{-\lambda t}, t \geq 0 \quad (3.3)$$

d. Taux de défaillance (fonction de risque)

Il s'agit du taux instantané de défaillance à l'instant t , conditionnellement au fait que la défaillance ne soit pas encore survenue :

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} = \lambda, t \geq 0 \quad (3.4)$$

B. Paramètre et interprétation

La loi exponentielle est définie par un seul paramètre :

Lambda λ : c'est le paramètre de taux ou taux de défaillance. Il représente le nombre moyen de défaillances par unité de temps. Il est exprimé en 1/temps (par exemple, défaillances par heure).

L'interprétation est la suivante :

- Plus λ est grand, plus la probabilité de défaillance est élevée dans un court intervalle de temps.
- La durée de vie moyenne (espérance) est donnée par $E(X) = \frac{1}{\lambda}$
- Le taux de défaillance est constant dans le temps, ce qui signifie que la probabilité qu'un composant tombe en panne ne dépend pas de son âge. [11]

3.1.2.2 Loi de Weibull

La loi de Weibull est l'un des modèles les plus polyvalents en fiabilité, permettant de représenter des comportements de défaillance variables dans le temps. Contrairement à la loi exponentielle, elle peut modéliser aussi bien les taux de défaillance croissants, constants que décroissants, selon la valeur de son paramètre de forme. Elle est donc particulièrement adaptée à des composants mécaniques ou électroniques dont le risque de défaillance évolue au fil du temps. [12]

A. Expression Mathématique

La loi de Weibull à deux paramètres : $\beta > 0$ paramètre de forme et $\alpha > 0$ paramètre d'échelle et elle est définie par les fonctions suivantes : [12]

a. Fonction de densité de probabilité (f.d.p.)

Elle décrit la probabilité que la durée de vie d'un composant prenne une valeur précise dans un petit intervalle de temps :

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}, t \geq 0 \quad (3.5)$$

b. Fonction de répartition (F.R.)

Elle permet de calculer la probabilité que la défaillance survienne avant ou à l'instant t :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}, t \geq 0 \quad (3.6)$$

c. Fonction de survie

Cette fonction donne la probabilité que le composant fonctionne encore au-delà de l'instant t :

$$S(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}, t \geq 0 \quad (3.7)$$

d. Taux de défaillance (fonction de risque)

Le taux de défaillance $h(t)$ est ici variable dans le temps, ce qui permet de modéliser différentes phases de vie d'un composant :

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}, t \geq 0 \quad (3.8)$$

B. Paramètres et interprétation

La loi de Weibull est caractérisée par deux paramètres :

- **β (bêta)** : paramètre de forme. Il contrôle le comportement du taux de défaillance :
 - Si $\beta < 1$: le taux de défaillance diminue (défaillances précoces).
 - Si $\beta = 1$: le taux est constant (équivalent à la loi exponentielle).
 - Si $\beta > 1$: le taux augmente (usure ou vieillissement).
- **α (alpha)** : paramètre d'échelle. Il représente une durée caractéristique : la durée à laquelle environ 63,2 % des composants sont attendus en panne (car $S(\alpha) \approx 0,368$).
- **Espérance de vie (durée moyenne de fonctionnement)** : L'espérance $E(T)$ de la durée de vie suit la formule : [12]

$$E(X) = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (3.9)$$

3.1.2.3 Loi Normale

La loi Normale (ou loi de Gauss) est l'un des modèles les plus fondamentaux en statistique. Elle permet de modéliser des phénomènes aléatoires naturels centrés autour d'une valeur moyenne, avec des variations symétriques. Elle intervient dans de nombreuses situations en fiabilité, notamment lorsque la variable étudiée est influencée par de multiples facteurs indépendants. [13]

A. Expression Mathématique

La loi normale est définie par deux paramètres :

- μ (mu) : la moyenne
- σ (sigma) : l'écart type ($\sigma > 0$)

a. Fonction de densité de probabilité (f.d.p.)

Elle exprime la probabilité que la variable aléatoire prenne une valeur proche de x [13] :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}, t \in \mathbb{R} \quad (3.10)$$

b. Fonction de répartition (F.R.)

Il n'existe pas de forme explicite simple pour la fonction de répartition $F(x)$, mais elle est définie comme :

$$F(t) = P(X \leq t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt \quad (3.11)$$

Elle donne la probabilité que la variable soit inférieure ou égale à une certaine valeur x .

c. Fonction de survie

$$S(t) = 1 - F(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (3.12)$$

d. Taux de défaillance (fonction de risque)

Le taux de défaillance $h(t)$ est ici variable dans le temps, ce qui permet de modéliser différentes phases de vie d'un composant :

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} = \frac{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}}{1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)} \quad (3.13)$$

B. Paramètres et interprétation

- μ (moyenne) : indique la position centrale de la distribution.
- σ (écart type) : mesure la dispersion autour de la moyenne. Plus σ est grand, plus la courbe est étalée.

Quelques propriétés importantes :

- La courbe est symétrique par rapport à μ .
- Environ 68 % des valeurs sont comprises entre $\mu - \sigma$ et $\mu + \sigma$

- Environ 95 % sont comprises entre $\mu-2\sigma$ et $\mu+2\sigma$
- Cas particulier : Loi Normale centrée réduite : Il s'agit du cas où $\mu = 0$ et $\sigma = 1$. On la note $N(0,1)$, et elle sert de base pour normaliser d'autres lois normales via le changement de variable : [13]

$$Z = \frac{X-\mu}{\sigma} \quad (3.14)$$

3.1.2.4 Loi Log normale

La loi log normale est utilisée pour modéliser des variables strictement positives dont le logarithme suit une loi normale. Elle est souvent utilisée en fiabilité pour décrire des durées de vie influencées par des processus multiplicatifs, comme dans certains cas de corrosion, de fatigue ou de croissance biologique.

A. Expression Mathématique

Une variable aléatoire T suit une loi log normale si $\ln(T) \sim N(\mu, \sigma^2)$, c'est-à-dire que le logarithme de T suit une loi normale.

Les fonctions caractéristiques associées sont :

a. Fonction de densité de probabilité (f.d.p.)

Elle donne la probabilité que la variable aléatoire prenne une valeur dans un intervalle infinitésimal autour de t :

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad t \geq 0 \quad (3.15)$$

b. Fonction de répartition (F.R.)

Il n'existe pas d'expression élémentaire pour la fonction de répartition. Elle s'écrit en fonction de la fonction de répartition de la loi normale Φ :

$$F(t) = P(T \leq t) = \Phi\left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}\right) \quad (3.16)$$

Où Φ est la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.

c. Fonction de survie (S(t))

$$S(t) = 1 - F(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}\right) \quad (3.17)$$

d. Taux de défaillance (fonction de risque)

Le taux de défaillance $h(t)$ est ici variable dans le temps, ce qui permet de modéliser différentes phases de vie d'un composant :

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} = \frac{\frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}\right)^2}}{1 - \Phi\left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}\right)} \quad (3.18)$$

B. Paramètres et interprétation

La loi log normale est définie par deux paramètres issus de la loi normale associée :

- μ : la moyenne du logarithme de la variable.
- σ : l'écart type du logarithme de la variable.

Interprétation :

- La variable est strictement positive : $T > 0$
- La distribution est asymétrique à droite, avec une queue longue vers les grandes valeurs.
- Elle permet de modéliser des durées de vie avec une forte variabilité et un comportement multiplicatif (par exemple, temps de réaction chimique, usure cumulative, etc.)

Espérance et variance

- **Espérance :**

$$E(T) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} \quad (3.19)$$

- **Variance :**

$$V(T) = (e^{\sigma^2} - 1) e^{2\mu + \sigma^2} \quad (3.20)$$

3.1.3 Estimation des paramètres

Dans tout processus de modélisation statistique, ajuster une loi de probabilité aux données empiriques nécessite d'en estimer les paramètres. Il s'agit de déterminer les valeurs numériques qui définissent la forme, la position et la dispersion de la distribution. En fiabilité, cette étape est essentielle pour modéliser correctement les temps avant défaillance (TTF), simuler le comportement des composants et appuyer les décisions de maintenance. [14]

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour cette estimation, en fonction de la nature des données, du type de distribution et des objectifs visés. Parmi les plus courantes figurent :

- La méthode du maximum de vraisemblance (MLE)
- La méthode des moments

- Les techniques d'optimisation numérique non linéaire.

Parmi les différentes méthodes envisageables, la méthode du maximum de vraisemblance (MLE) a été retenue dans cette étude, en raison de sa robustesse et de sa large utilisation dans le domaine de la fiabilité. Elle présente l'avantage de fournir des estimations cohérentes, même lorsque la taille de l'échantillon est limitée. [15]

Contrairement à la méthode des moments, qui peut produire des valeurs instables ou non représentatives, la MLE exploite l'ensemble de la distribution pour offrir des résultats plus fiables. Quant aux approches d'optimisation numérique, bien qu'elles soient plus flexibles, elles restent plus complexes à mettre en œuvre et sensibles aux conditions initiales. Ainsi, la méthode MLE a été appliquée à chaque loi candidate, comme présenté dans les sections suivantes. [14]

3.1.3.1 Principe de la méthode du maximum de vraisemblance (MLE)

La méthode du maximum de vraisemblance (*Maximum Likelihood Estimation – MLE*) repose sur un principe simple : déterminer les valeurs ou les paramètres d'une loi de probabilité qui rendent l'échantillon observé le plus probable, en supposant que les données sont **indépendantes et identiquement distribuées**.

Soit une variable aléatoire X suivant une loi de probabilité caractérisée par une fonction de densité (ou de masse) $f(x|\theta)$, où θ désigne le vecteur des paramètres à estimer. Pour un échantillon de taille n , la fonction de vraisemblance s'écrit : [14]

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i|\theta) \quad (3.21)$$

Pour des raisons de stabilité numérique, on maximise généralement le logarithme de la fonction de vraisemblance, appelé log-vraisemblance :

$$\ell(\theta) = \ln L(\theta) = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i|\theta) \quad (3.22)$$

L'estimateur du maximum de vraisemblance $\hat{\theta}$ est défini comme la valeur de θ qui maximise cette expression. Selon le cas, cette maximisation peut être réalisée soit analytiquement par résolution des équations issues des dérivées de $\ell(\theta)$, soit numériquement à l'aide d'algorithmes d'optimisation.

Sur le plan théorique, la méthode présente plusieurs propriétés fondamentales qui justifient son usage étendu dans les applications statistiques :

- Elle est consistante (l'estimateur converge vers la vraie valeur du paramètre quand $n \rightarrow \infty$),
- Elle est asymptotiquement normale,
- Elle est asymptotiquement efficace, atteignant la borne de Cramér–Rao. [16]

3.1.3.2 Estimation numérique des paramètres sur MATLAB

Dans cette section, la méthode du maximum de vraisemblance (MLE) a été appliquée à l'aide du logiciel MATLAB, afin d'estimer les paramètres des distributions de probabilité retenues. L'ajustement des lois aux TTF a été réalisé à l'aide de la fonction *fitdist*, intégrée dans la librairie *Statistics and Machine Learning Toolbox*.

Cette fonction permet de renvoyer un objet contenant les paramètres estimés, ainsi que diverses statistiques associées à une distribution donnée en exploitant l'algorithme du maximum de vraisemblance, selon les modalités décrites dans le script présente dans la figure 3.2.

```
exp_pd = fitdist(T_column, 'Exponential');
wbl_pd = fitdist(T_column, 'Weibull');
norm_pd = fitdist(T_column, 'Normal');
logn_pd = fitdist(T_column, 'Lognormal');
```

Figure 3.2 : Script d'estimation des paramètres

Les résultats de l'ajustement sont présentés dans le tableau 3.1 suivant :

Tableau 3.1 : Résultats d'ajustements des lois

Distribution	Paramètre 1	Paramètre 2
Exponentielle	$\lambda = 0,0003$	—
Weibull	$\eta = 5543,1089$	$\beta = 0,6339$
Normale	$\mu = 3387,1989$	$\sigma = 4355.11$
Log-normale	$\mu = 6.8736$	$\sigma = 2,1769$

3.1.4 Méthodes de test d'adéquation des lois statistiques

Afin de valider le choix de la loi de distribution la plus représentative du comportement de défaillance du système étudié, nous avons utilisés les méthodes d'évaluations de l'adéquation des lois statistiques.

Dans la littérature, plusieurs approches sont proposées pour évaluer la compatibilité d'une distribution observée avec une distribution théorique associée à une loi de probabilité, en particulier dans le domaine de l'analyse de fiabilité.

Bien que plusieurs tests soient mentionnés dans la littérature, tels que le test de Kolmogorov–Smirnov ou le test du χ^2 , ceux-ci présentent certaines limites, notamment une sensibilité réduite aux queues de distribution. Dans ce contexte, nous avons privilégié des méthodes plus robustes et adaptées aux exigences de la fiabilité : le test d'Anderson–Darling, l'AIC et le BIC.

3.1.4.1 Le test d'Anderson-Darling

Le test d'Anderson–Darling, basé sur la fonction de répartition empirique, permet de mesurer l'écart entre les données observées et une loi théorique [25]. Il est reconnu pour sa sensibilité accrue aux extrémités de la distribution, ce qui le rend particulièrement pertinent en analyse de fiabilité, où les valeurs extrêmes sont critiques.

La statistique associée, notée A^2 , est calculée à partir des écarts pondérés entre la fonction de répartition empirique et la fonction théorique [25].

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) [\ln(F(x_i)) + \ln(1 - F(x_{n+1-i}))] \quad (3.23)$$

Où :

- n est la taille de l'échantillon,
- x_i représente les données classées par ordre croissant,
- F est la fonction de répartition théorique supposée.

Une version corrigée, notée A_m , est utilisée pour les petits échantillons ($n < 40$), et intégrée automatiquement dans certains logiciels comme MATLAB [26].

La p-value, dérivée de A_m , permet de statuer sur l'hypothèse nulle H_0 selon laquelle les données suivent la loi testée [25]. Elle est calculée à l'aide de l'équation suivante :

Le calcul de la *p-value* n'est pas direct, mais dépend de la valeur de A^2 . En effet, différentes expressions mathématiques sont utilisées en fonction des intervalles de cette statistique. Les équations ci-dessous permettent de déterminer la *p-value* [17] :

- Si $A^2 \geq 0,6$:

$$p = \exp(1,2937 - 5,709 \cdot A^2 + 0,0186 \cdot A^{22})$$
- Si $0,34 < A^2 < 0,6$:

$$p = \exp(0,9177 - 4,279 \cdot A^2 - 1,38 \cdot A^{22})$$
- Si $0,2 < A^2 < 0,34$:

$$p = 1 - \exp(-8,318 + 42,796 \cdot A^2 - 59,938 \cdot A^{22})$$
- Si $A^2 \leq 0,2$:

$$p = 1 - \exp(-13,436 + 101,14 \cdot A^2 - 223,73 \cdot A^{22})$$

La statistique d'Anderson-Darling est donc essentielle pour le calcul de la *p-value* dans le cadre du test d'adéquation, et permet d'évaluer la compatibilité des données avec la distribution théorique testée.

- Si $p \geq 0,05$: on accepte $H_0 \rightarrow$ loi acceptable ;
- Si $p < 0,05$: on rejette $H_0 \rightarrow$ loi inadaptée.

3.1.4.2 Le critère d'information d'Akaike (AIC)

Le critère d'information d'Akaike (AIC) est un outil statistique permettant de comparer plusieurs modèles en évaluant à la fois leur qualité d'ajustement aux données et leur complexité. Contrairement aux tests d'ajustement comme Anderson–Darling, il ne teste pas la validité absolue d'un modèle mais sélectionne celui qui minimise la perte d'information. Il est particulièrement utile lorsque plusieurs modèles sont jugés acceptables, car il aide à choisir celui qui offre le meilleur compromis entre performance et simplicité [27].

La formule du AIC est la suivante :

$$AIC = -2 \cdot \ln(\mathcal{L}) + 2k \quad (3.24)$$

Où :

- $\mathcal{L}$ est la valeur maximale de la fonction de vraisemblance du modèle ajusté aux données,
- k est le nombre de paramètres estimés dans le modèle.

Le premier terme reflète l'ajustement du modèle, tandis que le second pénalise les modèles trop complexes. L'objectif est de minimiser la valeur du AIC [27].

A. Le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc)

Lorsque la taille de l'échantillon est petite, le AIC peut favoriser des modèles surajustés. Pour corriger ce biais, le AICc introduit une pénalisation supplémentaire :

Voici la formule utilisée pour le calculer :

$$AIC_c = AIC + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} \quad (3.25)$$

Où :

- k est le nombre de paramètres estimés dans le modèle,
- n est la taille de l'échantillon.

Cette correction devient négligeable lorsque l'échantillon est grand. Elle rend le AICc plus fiable que le AIC pour des échantillons de taille réduite [27]

B. Interpretation

Le AIC (ou AICc) ne fournit pas un test de validité, mais un classement relatif entre modèles. Une valeur AIC faible indique un bon compromis entre ajustement et complexité, tandis qu'une valeur élevée suggère un surajustement ou un mauvais ajustement. Le meilleur modèle est celui avec le plus petit AIC parmi ceux comparés [28].

3.1.4.3 Le critère d'information bayésien (BIC)

Le critère BIC, introduit par Schwarz en 1978, permet de comparer plusieurs modèles statistiques afin de sélectionner celui qui offre le meilleur compromis entre qualité d'ajustement et simplicité. Comme le AIC, il repose sur la maximisation de la vraisemblance, mais il pénalise davantage la complexité du modèle, surtout lorsque la taille de l'échantillon est grande [29].

La formule du BIC est :

$$BIC = -2 \cdot \log(\mathcal{L}) + k \cdot \log(n) \quad (3.26)$$

avec :

- $\mathcal{L}$: la valeur maximale de la fonction de vraisemblance du modèle,

- k : le nombre de paramètres estimés,
- n : la taille de l'échantillon.

Le premier terme mesure la qualité d'ajustement du modèle, tandis que le second pénalise la complexité. Le modèle retenu est celui qui minimise la valeur du BIC. [18]

A. Interprétation du BIC:

Le BIC ne teste pas la "vérité" d'un modèle, mais cherche à identifier le plus crédible parmi les modèles comparés. Il repose sur une approche bayésienne simplifiée, mais reste facile à appliquer. Contrairement au AIC, il favorise les modèles les plus simples, surtout pour de grands échantillons, réduisant ainsi le risque de surajustement.

Le modèle ayant la plus faible valeur de BIC est considéré comme le modèle quasi-vrai, c'est-à-dire le plus proche de la réalité parmi ceux évalués [29].

❖ Exemple d'application des tests sur les données

Afin d'illustrer concrètement la mise en œuvre des tests d'adéquation, nous présentons ci-dessous un exemple de script MATLAB appliqué aux données de TTF. Ce script permet de comparer plusieurs distributions candidates (Exponentielle, Weibull, Normale, Log-normale) en utilisant différents critères de performance.

Voici un exemple du script des tests d'ajustement présenté dans la figure 3.3 :

```
% Test d'Anderson-Darling
[h_exp, p_exp] = adtest(T_column, 'Distribution', exp_pd);
[h_wbl, p_wbl] = adtest(T_column, 'Distribution', wbl_pd);
% AIC (utilisation de log-likelihood simulé si besoin)
aic_exp = 2*1 - 2*sum(log(pdf(exp_pd, T_column))); % 1 paramètre
aic_wbl = 2*2 - 2*sum(log(pdf(wbl_pd, T_column))); % 2 paramètres
```

Figure 3.3 : Exemple script des tests d'ajustements

3.2 Simulation Monte Carlo

La méthode de Monte Carlo est une technique de simulation numérique utilisée pour résoudre des problèmes probabilistes complexes à l'aide de l'expérimentation aléatoire. Elle permet d'estimer

des quantités statistiques (espérance, variance, quantiles, etc.) en simulant un grand nombre de scénarios aléatoires, construits à partir d'un modèle de probabilité donné. [19]

3.2.1 La méthode Monte Carlo

Elle est particulièrement puissante dans les domaines où les solutions analytiques sont soit inexistantes, soit trop coûteuses à obtenir. En fiabilité industrielle, elle s'avère utile pour modéliser l'incertitude autour des temps avant défaillance (TTF), optimiser les politiques de maintenance, et évaluer les risques de défaillance précoce. [19] [20]

Le terme « Monte Carlo » provient du célèbre casino de Monaco, en référence à l'aspect aléatoire des jeux de hasard. La méthode a été formalisée dans les années 1940 par Stanislaw Ulam et John von Neumann pour résoudre des équations physiques complexes lors du projet Manhattan. [19]

Selon Raychaudhuri (2008), la méthode repose sur trois éléments clés :

- a) Un modèle probabiliste représentant le comportement incertain du système,
- b) Un générateur de nombres pseudo-aléatoires pour simuler des variables aléatoires,
- c) Une répétition massive de simulations (souvent des milliers ou millions), pour assurer la convergence statistique.

La loi des grands nombres garantit que la moyenne des résultats simulés converge vers la valeur attendue réelle lorsque le nombre d'itérations tend vers l'infini. [20] [19]

3.2.1.1 Étapes générales d'une simulation Monte Carlo

Une simulation Monte Carlo suit une démarche structurée permettant de capturer le comportement aléatoire d'un système complexe. On peut distinguer les étapes clés suivantes :

A. Définir la variable d'intérêt à estimer

Il s'agit dans un premier temps d'identifier précisément ce que l'on cherche à estimer : une espérance, un quantile, une probabilité d'occurrence, un temps moyen avant défaillance, etc. Par exemple, dans un contexte de fiabilité, la variable d'intérêt pourrait être le temps avant la première défaillance d'un composant.

B. Construire un modèle probabiliste du système

Le système ou processus est représenté par un modèle mathématique comportant des paramètres incertains, modélisés par des variables aléatoires. Ces variables suivent des lois de probabilité identifiées à partir de données historiques, d'hypothèses physiques ou d'expertise.

C. Générer des échantillons aléatoires

À l'aide d'un générateur pseudo-aléatoire fiable, on tire un grand nombre de valeurs (souvent plusieurs milliers) pour chaque variable aléatoire. Ces valeurs représentent différentes réalisations possibles du système.

D. Calculer la valeur cible pour chaque simulation

Chaque jeu de valeurs aléatoires (un "scénario") est inséré dans le modèle mathématique. Cela permet de calculer la sortie associée (par exemple, le temps simulé avant défaillance), qu'on stocke pour analyse ultérieure.

E. Analyser les résultats statistiques

Les valeurs simulées sont ensuite analysées statistiquement : moyenne, écart-type, histogramme, intervalle de confiance, quantiles, etc. L'objectif est de déduire des conclusions robustes sur le comportement global du système. [20] [19]

3.2.1.2 Génération de variables aléatoires

La génération de variables aléatoires constitue l'un des éléments les plus fondamentaux de la simulation Monte Carlo. En effet, la qualité des résultats simulés dépend directement de la capacité à reproduire fidèlement des tirages aléatoires conformes à des lois de probabilité bien définies. Comme le rappellent Joulin et Raychaudhuri, l'objectif est de transformer une variable uniforme $U \sim U[0,1]$ en une variable aléatoire X suivant une distribution cible F . [20] [19]

Afin de générer des variables aléatoires conformes à des lois de probabilité données, plusieurs techniques peuvent être employées. Parmi les plus couramment utilisées, on distingue notamment :

A. Méthode d'inversion de la fonction de répartition

La méthode d'inversion est l'une des techniques les plus simples et les plus efficaces pour générer des variables aléatoires continues lorsque la fonction de répartition FFF de la loi est inversible analytiquement.

Le principe est le suivant : $X=F^{-1}(U)$ (3.27)

Où U est un nombre aléatoire tiré de manière uniforme sur l'intervalle $[0,1]$.

Par exemple la fonction de répartition de la loi exponentielle est donnée par :

$$F(t)=1-e^{-\lambda t} \quad (3.28)$$

Son inverse est :

$$X = -\frac{1}{\lambda} \ln (1 - U) \quad (3.29)$$

Cette méthode est rapide, stable numériquement et adaptée aux lois bien connues comme l'exponentielle, la loi de Pareto, etc. [20]

3.2.2 Conception du modèle

Dans cette section, nous présentons la conception du modèle de simulation Monte Carlo appliqué à l'évaluation de la fiabilité du circuit Cofely. L'objectif principal de ce modèle est de reproduire la variabilité des temps avant défaillance (TTF) à partir d'une distribution statistique ajustée, afin de calculer les indicateurs de fiabilité et estimer la durée de vie restante (RUL) des équipements.

La simulation a été développée et implémentée dans l'environnement MATLAB. Le modèle repose sur un enchaînement logique d'étapes, allant du choix de la loi de probabilité optimale (déjà traité dans la section précédente) jusqu'à l'analyse des résultats simulés. Cette structure est représentée dans la figure 3.4.

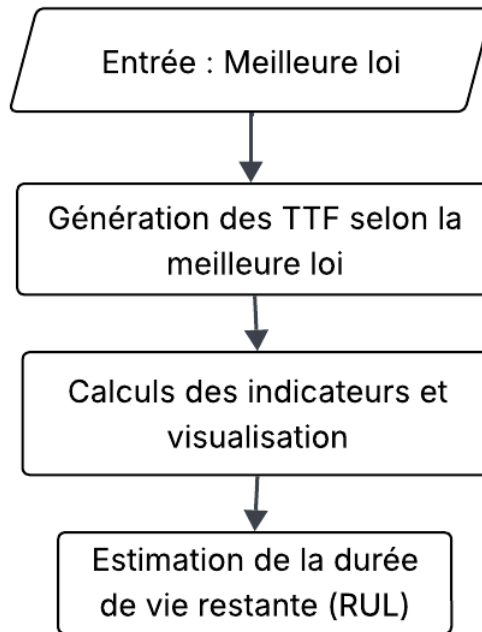


Figure 3.4 : Organigramme des étapes suivies pour la conception du modèle

A. Étape 1 : Génération des TTF simulés

Dans cette étape, on utilise la distribution jugée optimale à l'étape précédente pour générer un grand nombre de temps avant défaillance (TTF). Le nombre de simulations est fixé à $N = 100\,000$.

La fonction "*random*" de MATLAB permet de tirer ces valeurs aléatoirement à partir des paramètres estimés ; Par exemple si c'est Weibull, on utilise `random(wbl_pd, N, 1)`. Dans les cas normal et log-normal, les TTF négatifs sont corrigés (remplacés par zéro). [15]

Un extrait du script MATLAB correspondant à notre étude est présenté sur la figure 3.5 :

```

% Exemple : Simulation Monte Carlo avec la loi de Weibull
N = 1e5; % Nombre de simulations
simulated_TTF = random(wbl_pd, N, 1); % Tirage aléatoire
  
```

Figure 3.5 : Script du tirage aléatoire Monte Carlo

B. Étape 2 : Calcul des indicateurs statistiques simulés

Une fois les TTF simulés obtenus, cette étape consiste à calculer les indicateurs statistiques principaux nécessaires à l'interprétation de la fiabilité du système. Ces résultats synthétisent la tendance centrale, la variabilité, et les bornes de confiance associées aux défaillances simulées.

Les trois indicateurs calculés sont :

- La moyenne simulée des TTF (MTTF) : durée de vie moyenne estimée,
- L'écart-type des TTF : mesure de la dispersion,
- Les quantiles 5 % et 95 % : pour construire un intervalle de confiance à 90 %.

Un extrait du script MATLAB correspondant à notre étude est présenté sur la figure 3.6 :

```
% Calculs statistiques basés sur la simulation Monte Carlo
MTTF_sim = mean(simulated_TTF);      % Moyenne des TTF simulés
std_sim = std(simulated_TTF);        % Écart-type
q05 = quantile(simulated_TTF, 0.05); % Quantile 5%
q95 = quantile(simulated_TTF, 0.95); % Quantile 95%
```

Figure 3.6 : Script des calculs de la méthode Monte Carlo

C. Étape 3 : Visualisation des résultats de la simulation

Cette étape regroupe les représentations graphiques issues de la simulation Monte Carlo, afin d'analyser le comportement du système de manière visuelle. Trois éléments sont affichés :

- La fonction de fiabilité $v(t)$, qui montre la probabilité de survie en fonction du temps,
- Le taux de défaillance instantané $\lambda(t)$, qui reflète le risque de panne à chaque instant,
- Un histogramme des TTF simulés comparé à la densité théorique (PDF), permettant de vérifier la cohérence du modèle.

Un extrait du script MATLAB correspondant à notre étude est présenté sur la figure 3.7 :

```
% Exemple : Histogramme des TTF simulés vs PDF théorique (loi de Weibull)
figure;
histogram(simulated_TTF, 'Normalization', 'pdf', 'FaceColor', [0.6 0.8 1]); hold on;
plot(t, f_t, 'r--', 'LineWidth', 2);
title('Comparaison des TTF simulés avec la densité théorique');
xlabel('Temps de panne simulé');
ylabel('Densité');
legend('Simulés', 'Weibull PDF');
grid on;
```

Figure 3.7 : Script d'affichage de la distribution des TTF simulés

Les résultats de l'exécution du script de la figure 3.7 sont présentés dans la figure 3.8 :

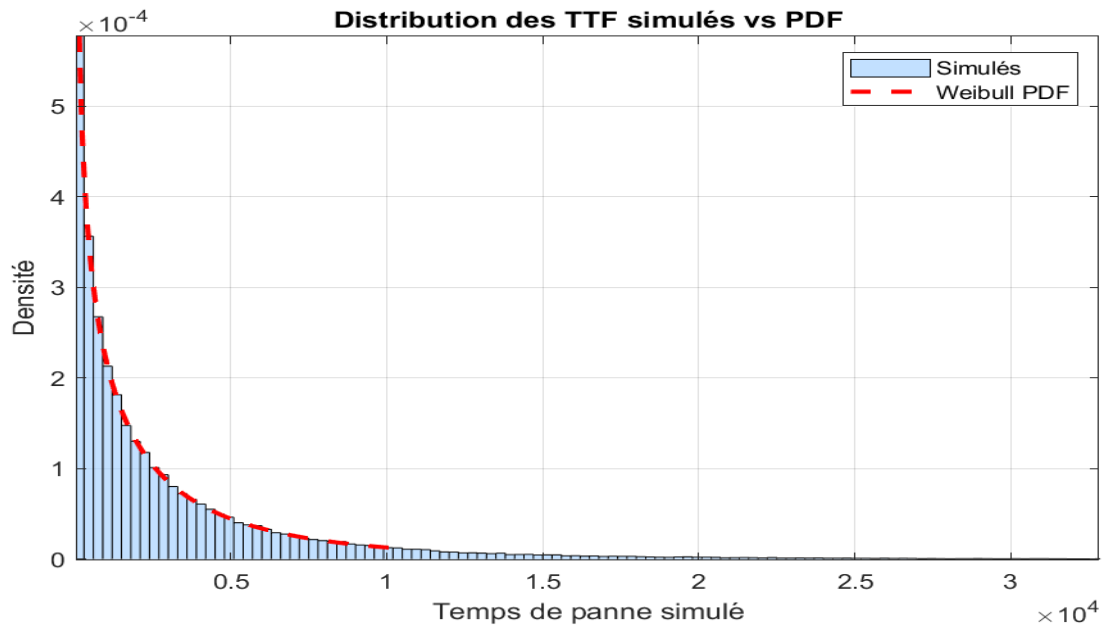


Figure 3.8 : Distribution des TTF simulés

D. Étape 4 : Estimation de la durée de vie restante (RUL)

L'étape finale de cette analyse consiste à estimer la durée de vie résiduelle (RUL) du système à partir des TTF simulés. Cette estimation, réalisée pour $t=0$, permet de prédire la durée restante avant défaillance et d'orienter les actions de maintenance préventive. Chaque RUL est calculée à l'aide de la formule spécifique à la loi de probabilité jugée optimale lors de l'étape d'ajustement (*bestdist*). Par la suite, l'évolution de la RUL est tracée dans le temps afin d'analyser la dégradation progressive du système et de déterminer les fenêtres critiques d'intervention.

Un extrait du script MATLAB correspondant à notre étude est présenté sur la figure 3.9 :

```
for i = 1:length(time_points)
    t0 = time_points(i);
    % Utilisation de la fonction de calcul de la RUL pour chaque distribution
    switch best_dist % Meilleur distribution
        case 'Exponential'
            % RUL pour distribution exponentielle
            rul_values(i) = (1 / pd.mu) * (1 - exp(- exp_pd.mu * t0));
            ...
    end
```

Figure 3.9 : Script de calcul du RUL pour la loi exponentielle

3.2.3 Test de véracité du modèle

Afin d'assurer la fidélité du modèle développé pour l'ajustement de lois statistiques aux données de fiabilité (temps avant défaillance, ou TTF), une phase de validation par simulation a été réalisée. Cette procédure permet de vérifier si le modèle est capable d'estimer correctement les paramètres et de retrouver la distribution sous-jacente à partir de données simulées.

3.2.3.1 Démarche suivie

Pour chaque loi de distribution, un vecteur de 100 valeurs de TTF a été simulé avec des paramètres fixés et bien définis. Ces vecteurs ont ensuite été traités par notre modèle MATLAB pour l'estimation des paramètres et la détermination de la distribution sous-jacente. Deux niveaux de comparaison sont effectués :

- Paramètres simulés : ceux définis pour générer les données.
- Paramètres retrouvés : valeurs finales fournies par le modèle.

3.2.3.2 Résultats obtenus

Les résultats des tests d'ajustement sont présentés dans le tableau 3.2 :

Tableau 3.2 : Résultats obtenue des tests d'ajustements

Distribution	Paramètres simulés	Paramètres retrouvés (modèle)	Ecart (%)
Weibull	$\beta = 2.35$; $\eta = 121$	β retrouvé = 2.137 ; η retrouvé = 121.26	- 9.04% - 0.21%
Exponentielle	MTTF = 121 ; $\lambda = 0.00826$	MTTF retrouvé = 116.8 ; λ retrouvé = 0.008457	- 3.47% - 2.38%
Log-normale	$\mu = \ln(100) \approx 4.61$; $\sigma = 0.4$	μ retrouvé = 4.6724 ; σ retrouvé = 0.4085	- 1.36% - 2.13%
Normale	$\mu = 121$; $\sigma = 20$	μ retrouvé = 119.013 ; σ retrouvé = 20.4747	- 1.64% - 2.37%

3.2.3.4 Interprétation des résultats

Les écarts constatés entre les paramètres simulés et retrouvés sont très faibles, ce qui témoigne de la capacité du modèle à fournir des estimations robustes. D'après la littérature statistique, l'efficacité des estimateurs par maximum de vraisemblance (MLE) s'améliore avec la taille de l'échantillon. Ainsi, plus le vecteur de données simulées est important, plus les paramètres estimés tendent à se rapprocher des valeurs réelles, rendant le modèle plus précis. [21]

Par ailleurs, la reconnaissance correcte de la distribution dominante pour chaque vecteur simulé, validée par des indicateurs objectifs tels que l'AIC minimal ou les valeurs de tests d'ajustement (comme Anderson-Darling), confirme la cohérence méthodologique et la rigueur statistique du modèle conçu.

3.3 Analyse de fiabilité de la tuyauterie du circuit Cofely

Afin d'analyser en profondeur le comportement d'étanchéité de la tuyauterie du circuit Cofely, cette section exploite les données historiques de fonctionnement et de défaillance disponibles. En modélisant les temps de fonctionnement avant panne à l'aide d'outils statistiques adaptés, puis en simulant le comportement du système via l'approche Monte Carlo, l'objectif est de caractériser la distribution des défaillances, d'identifier les tendances de vieillissement, d'estimer la durée de vie résiduelle (RUL) et d'orienter la mise en place de politiques de maintenance plus efficaces et anticipatives.

3.3.1 Analyse préliminaire des TTF

Les données de TTF de la tuyauterie (fourni dans l'annexe X) ont été analysées à l'aide de plusieurs lois de fiabilité : **Weibull, Exponentielle, Normale, Log normale**. L'objectif était d'identifier la loi la plus représentative du comportement réel du système.

L'ajustement a été réalisé par la méthode MLE, et la qualité des ajustements a été comparée selon plusieurs critères statistiques (AD Test, AIC, BIC, AICc) présentés dans le tableau 3.3 :

Tableau 3.3 : Résultats des tests d'ajustements

Distribution	p-value	A ²	Décision	AIC	BIC	AICc
Exponentielle	0.0075	2.0275	Rejeté	239.33	239.89	239.69
Weibull	0.1030	0.6121	Accepté	236.51	237.64	237.71
Normale	0.0044	1.0917	Rejeté	257.75	258.88	258.95
Lognormale	0.0205	0.8458	Rejeté	238.82	239.95	240.02

Parmi les distributions testées, **la loi de Weibull** s'est révélée la plus adéquate pour modéliser les données avec les paramètres suivant : $\alpha = 2543.1089$ et $\beta = 0.6339$

Elle présente la p-value la plus élevée (0.1030) et supérieur au seuil de 5 %, contrairement aux autres lois. Elle affiche également la plus petite statistique A² (0.6121), indiquant un excellent ajustement. Enfin, ses valeurs AIC (236.51), BIC (237.64) et AICc (237.71) sont les plus faibles parmi toutes les distributions testées, ce qui confirme que Weibull est le modèle le plus performant pour représenter les données.

Le paramètre de forme $\beta < 1$ indique un taux de défaillance décroissant, caractéristique d'un comportement de défaillances précoces. Cela signifie que les pannes sont plus probables en début de vie, puis deviennent moins fréquentes avec le temps avec un RUL croissant dans le temps, un comportement qui ne correspond pas au vieillissement mécanique attendu d'une tuyauterie.

La figure 3.10 suivante présente les résultats de l'analyse préliminaire de fiabilité.

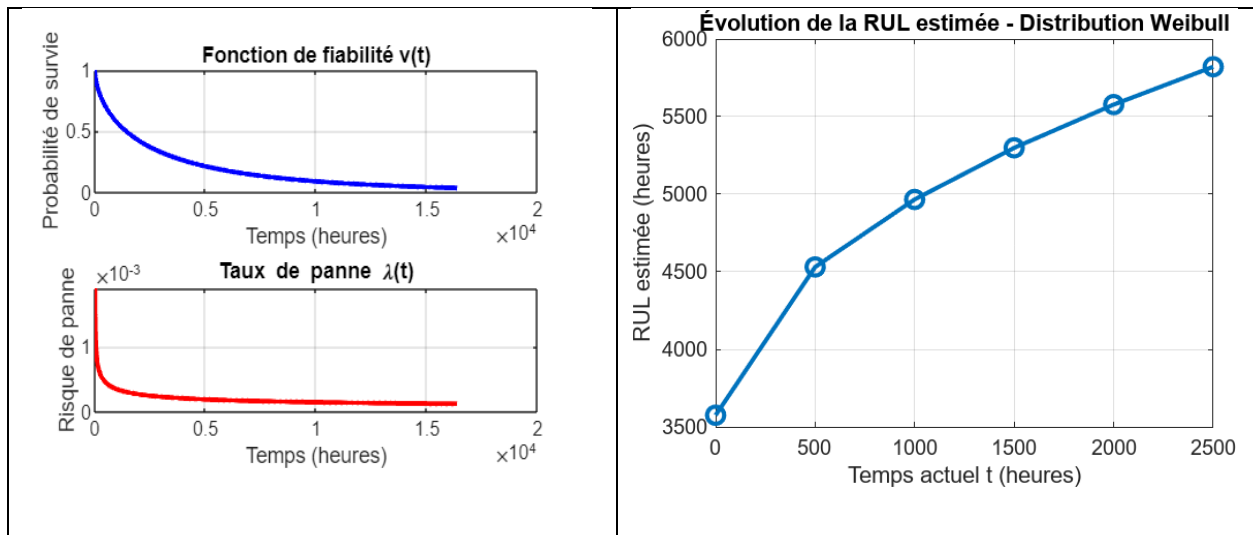


Figure 3.10 : Résultats de l'analyse préliminaire de fiabilité

3.3.1.1 Interprétation des résultats

Ce comportement statistique, marqué par un paramètre de forme $\beta < 1$, peut s'expliquer par le mode de fonctionnement cyclique du circuit Cofely. À chaque début de saison estivale, le système subit un stress thermique important dû à l'élévation de température ambiante et à une sollicitation accrue liée aux besoins de production.

Cette phase critique favorise **l'apparition de fuites précoces**, en particulier sur les segments les plus fragiles de la tuyauterie. En pratique, **aucune inspection approfondie ni réparation structurelle** n'est réalisée : le circuit est simplement **rechargé en fluide frigorigène (R134a)** et remis en service. Ce mode de gestion entraîne **un biais** dans l'analyse statistique : seules les sections momentanément étanches restent en fonctionnement, ce qui crée une illusion de fiabilité croissante, traduite par une RUL en augmentation après chaque phase de stress. Pourtant, le système continue de se dégrader de manière latente, sans traitement des causes sous-jacentes.

Il est donc essentiel d'interpréter les résultats de fiabilité en tenant compte de ce contexte opérationnel particulier, afin de ne pas surestimer la durée de vie réelle du circuit. Pour cela, dans la 2^{ème} partie de l'analyse du Circuit Cofely nous introduisant l'effet des conditions thermique par saison.

3.3.2 Analyse saisonnière des TTF

L'analyse initiale de la fiabilité, basée sur l'ensemble des TTF collectés, a révélé une grande dispersion et une hétérogénéité dans le comportement du système Cofely. En examinant les dates des pannes, une régularité saisonnière a été identifiée : la majorité des défaillances surviennent

durant la période estivale, ce qui suggère une influence significative de la température ambiante sur le fonctionnement du système.

Afin d'approfondir cette analyse, nous avons suivi les étapes suivantes :

3.3.2.1 Segmentation saisonnière des TTF

Les données de temps de fonctionnement avant panne (TTF), présentées en annexe X, ont été segmentées en deux sous-populations selon les dates de survenue des pannes, comme illustré dans la figure 3.11 ci-dessous :

```
% Temps de fonctionnement avant panne (en heures)
TTF_Linde = [2616, 72, 24, 48, 6360, 2088, 1176, 1200, 648, 5760, 10056, 72, 6360,
3720, 3792];
% Données D'Été enregistrés durant les mois chauds (mai à septembre)
TTF_ete = [72, 24, 48, 1176, 1200, 648, 72];
% Données D'Hiver durant les mois froids (octobre à avril)
TTF_hiver = [2616, 6360, 2088, 5760, 10056, 6360, 3720];
```

Figure 3.11 : Script Matlab de la segmentation des TTF

3.3.2.2 Analyse des TTF en saison d'été

L'ajustement par maximum de vraisemblance (MLE) a révélé que la **distribution exponentielle** est celle qui offre la meilleure représentation des données estivales selon les critères AIC, AICc et BIC. La figure 3.12 ci-dessous illustre les résultats obtenus :

```

===== Analyse saison : Été =====
🚩 Résultats du test AD pour Été :
Exponential:  p = 0.0274 | A² = 1.4527 | cv = 1.2400 | Rejected
Weibull:      p = 0.0731 | A² = 0.6559 | cv = 0.7135 | Accepted
Normal:       p = 0.0199 | A² = 0.7834 | cv = 0.6526 | Rejected
Lognormal:    p = 0.1220 | A² = 0.5242 | cv = 0.6526 | Accepted

🚩 Valeurs des critères AIC, AICc, et BIC pour Été :
Distribution  AIC      AICc      BIC
Exponential   101.92    102.72    101.87
Weibull       102.72    105.72    102.61
Normal        110.97    113.97    110.87
Lognormal     102.31    105.31    102.20

Best model by AIC: Exponential
Best model by AICc: Exponential
Best model by BIC: Exponential
✅ Meilleure loi utilisée pour la saison Été selon AICc est : Exponential
🚩 Paramètres du modèle : lamda = 0.0022

```

Figure 3.12 : Résultats de l'ajustement des TTF_été

La loi exponentielle suppose un taux de défaillance constant, ce qui signifie que le système ne présente aucune mémoire des événements passés : la probabilité de panne reste la même, quel que soit le temps de fonctionnement écoulé. Ce comportement reflète la nature aléatoire des défaillances estivales, souvent déclenchées par des surcharges thermiques ou une usure accélérée liée aux températures élevées. Dans ce contexte, les composants peuvent subir des ruptures soudaines, indépendamment de leur âge ou de leur historique d'utilisation.

La figure 3.13 ci-dessous illustre l'évolution du taux de défaillance, de la fonction de fiabilité et pour une loi d'exponentielle caractérisée par un paramètre de forme $\lambda = 0,0022$:

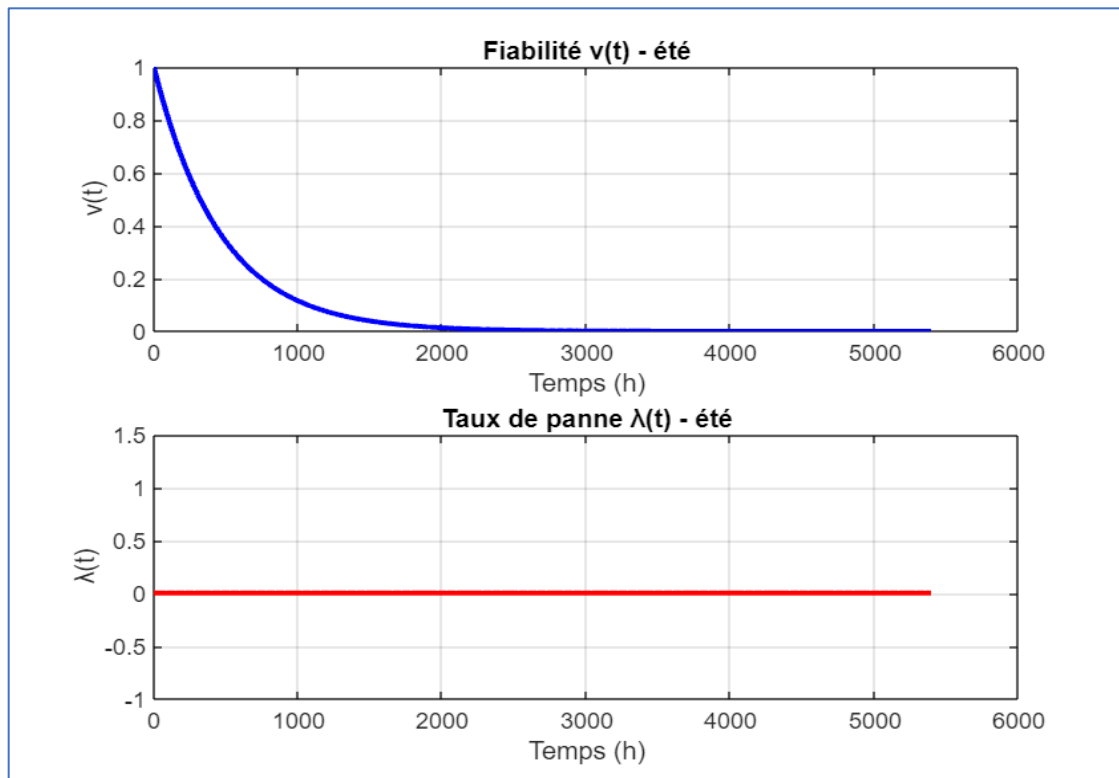


Figure 3.13 : Courbes d'évolution de la fiabilité et du taux de défaillance des TTF_été

Dans le cas spécifique du circuit Cofely, il est probable que les fuites de fluide frigorigène constituent un mode de défaillance majeur durant l'été, en raison de la dilatation thermique des matériaux, de la fragilisation des joints ou de la pression interne accrue. Ces fuites peuvent survenir brusquement, sans évolution progressive détectable, ce qui correspond bien au modèle de la loi exponentielle

3.3.2.3 Analyse des TTF en saison d'hiver

Pour la saison hivernale, les ajustements indiquent que la **loi de Weibull** est la plus représentative des données. La figure 3.14 ci-dessous illustre les résultats obtenus.

```

===== Analyse saison : Hiver =====
📌 Résultats du test AD pour Hiver :
Exponential:  p = 0.1232 | A² = 0.9352 | cv = 1.2400 | Accepted
Weibull:       p = 0.6847 | A² = 0.2814 | cv = 0.7135 | Accepted
Normal:       p = 0.5445 | A² = 0.2930 | cv = 0.6526 | Accepted
Lognormal:    p = 0.5985 | A² = 0.2761 | cv = 0.6526 | Accepted
📌 Valeurs des critères AIC, AICc, et BIC pour Hiver :
Distribution   AIC      AICc     BIC
Exponential   136.00   136.80   135.95
Weibull       132.82   135.82   132.71
Normal        133.69   136.69   133.58
Lognormal     132.91   135.91   132.80
Best model by AIC:  Weibull
Best model by AICc: Weibull
Best model by BIC:  Weibull
✅ Meilleure loi utilisée pour la saison Hiver selon AICc est : Weibull
📌 Paramètres du modèle : A (scale) = 5986.3196, B (shape) = 2.2405

```

Figure 3.14 : Résultats de l'ajustement des TTF_hiver

Dans ce cas, un paramètre $\beta > 1$ indique un taux de défaillance croissant, caractéristique d'un vieillissement progressif du système. Ce comportement reflète des mécanismes de dégradation naturelle tels que : la corrosion lente, la fatigue des matériaux ou encore la détérioration progressive des joints et des soudures.

La Figure 3.15 ci-dessous illustre l'évolution du taux de défaillance, de la fonction de fiabilité et pour une loi de Weibull caractérisée par un paramètre de forme $\beta = 2.2405$:

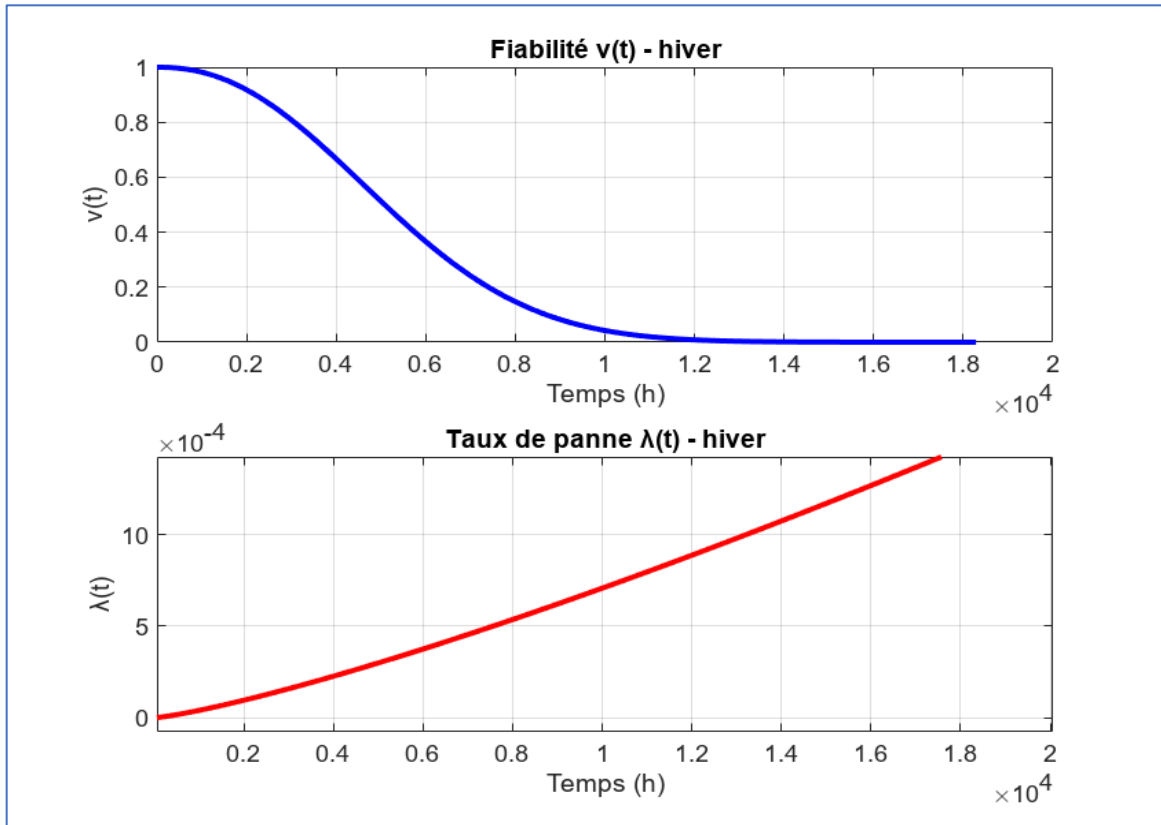


Figure 3.15 : Courbes d'évolution de la fiabilité et du taux de défaillance des TTF_hiver

Dans le cas spécifique du circuit Cofely chez Linde, ce comportement est d'autant plus cohérent avec la réalité du site : le circuit fonctionne en continu durant l'hiver, sans intervention majeure ni cycle de mise en marche/arrêt. L'absence de surcharges thermiques typiques de l'été permet une usure plus régulière, rendant les pannes hivernales à la fois plus prévisibles et représentatives d'une dégradation naturelle liée à l'âge du système.

3.3.2.4 Combinaison du TTF total

Afin de représenter fidèlement le comportement réel du circuit Cofely en conditions d'exploitation, une simulation Monte Carlo a été réalisée en combinant l'ensemble des TTF issus des deux sous-populations saisonnières hiver et été.

Le script MATLAB utilisé génère un grand nombre de TTF aléatoires selon les distributions ajustées à chaque sous-ensemble, puis les fusionne dans un unique vecteur de *simulated_TTF_combined*. Ce vecteur est ensuite analysé pour :

- Estimer la densité de probabilité (PDF),
- Calculer la fonction de fiabilité $R(t)$,

- Dériver le taux de panne instantané $\lambda(t)$,
- Modéliser l'évolution de la RUL en fonction du temps.

Les figure 3.16 et figure 3.17, ci-dessous, illustrent l'ensemble des résultats de la simulation Monte Carlo des TTF combinés :

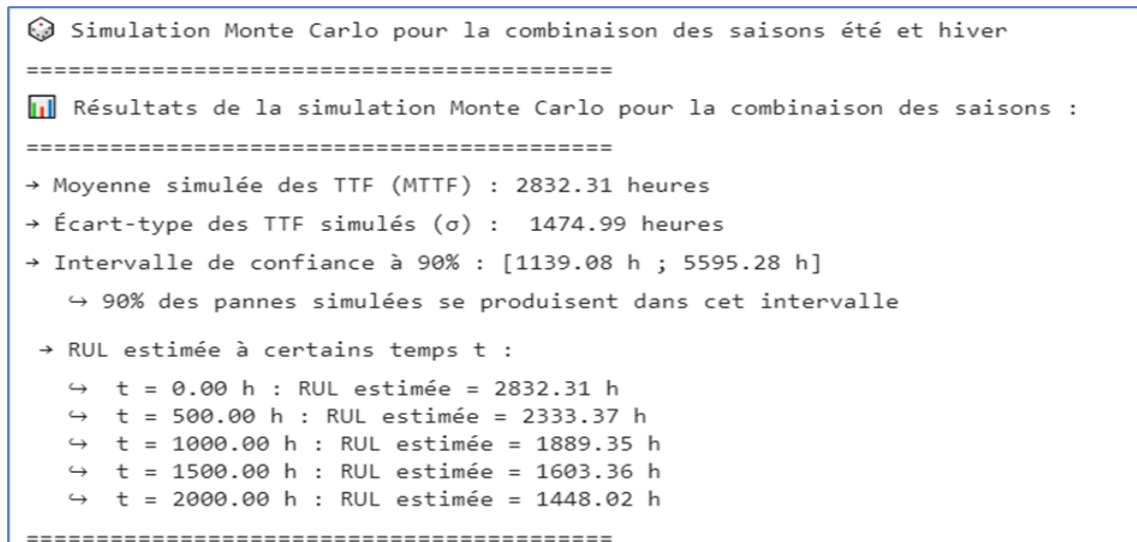


Figure 3.16 : Résultats d'indicateurs de fiabilité des TTF simulés combinés

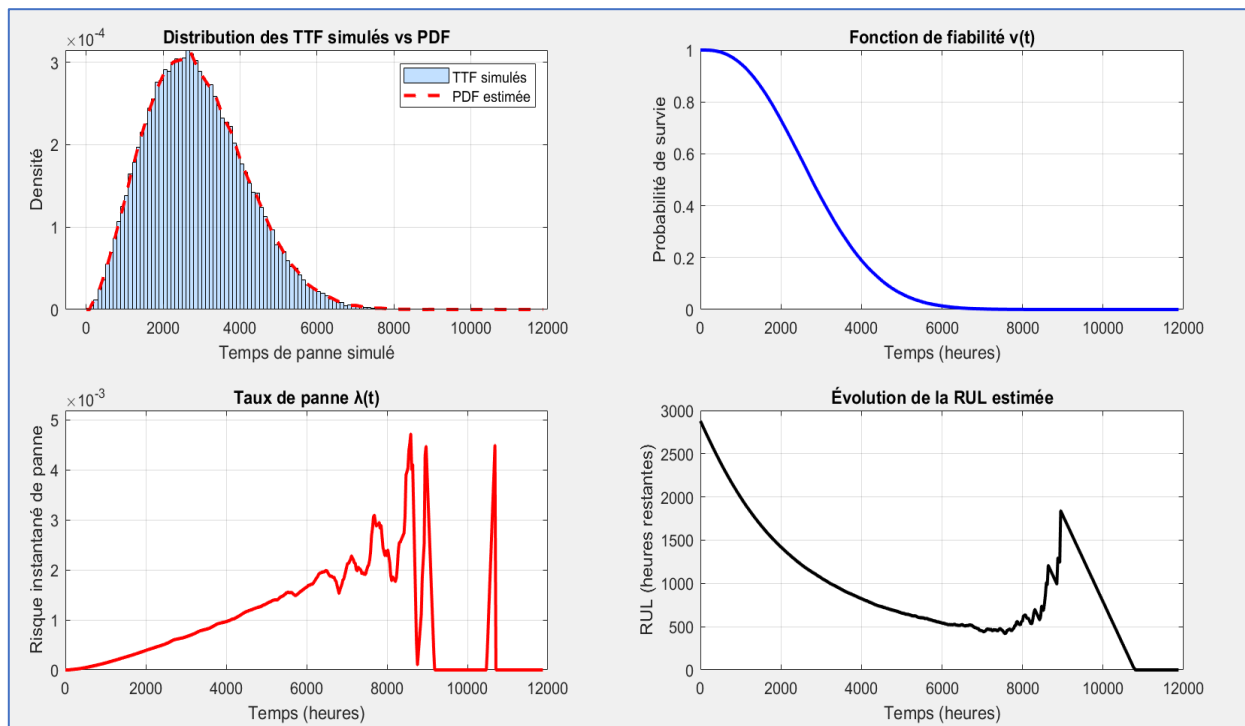


Figure 3.17 : Résultats de l'analyse saisonnière des TTF combinés simulés

Cette approche, combinant les TTF simulés pour les périodes été et hiver, permet d'obtenir une vision réaliste et globale du comportement du système, notamment pour :

- **Distribution des TTF simulés :**

La bonne superposition de la PDF théorique combinée sur l'histogramme des TTF simulés valide la cohérence du modèle statistique retenu pour estimer la fiabilité et la RUL.

- **La Fiabilité réelle du circuit :**

La courbe de fiabilité décroissante traduit un système dont la probabilité de bon fonctionnement diminue continuellement avec le temps, ce qui est typique d'un **vieillessement structurel**.

- **Le taux de défaillance :**

La courbe du taux de défaillance issue des TTF combinés est jugée inexploitable car elle superpose deux régimes de fonctionnement distincts (été et hiver), chacun étant soumis à des contraintes thermiques différentes. Cette hétérogénéité fausse la forme globale de la courbe, qui devient irrégulière, instable et non représentative d'un mode de défaillance cohérent. De plus, les longues durées de fonctionnement dans certaines conditions peuvent accentuer artificiellement la tendance, ce qui empêche toute lecture fiable de l'évolution du risque dans le temps.

- **Variabilité saisonnière :**

La large dispersion des TTF simulés (écart-type de 1274,56 h, IC 90 % très étendu) montre que le système est fortement **sensible à son environnement**, notamment aux conditions d'été. Car, en saison estivale, les pressions et températures de fonctionnement varient davantage, ce qui génère des pannes précoces aléatoires qui tirent vers le bas la fiabilité globale du système.

- **La durée de vie restant « RUL » :**

- L'évolution de la RUL estimée montre une décroissance relativement régulière, mais de plus en plus incertaine avec le temps. Cela reflète la variabilité structurelle du système ainsi que la sensibilité aux conditions d'exploitation, en particulier l'influence des périodes d'été, et que cette incertitude pourrait être aggravée par l'absence de maintenance préventive structurée, typique d'une stratégie de maintenance essentiellement réactive, comme c'est actuellement le cas sur le site.

- Pour évaluer la capacité prédictive du modèle, la dernière valeur de TTF observée (3792 h en février 2025) n'a pas été incluse dans la modélisation. Malgré cela, la RUL simulée à $t = 0$ ressort à 2882 h, soit environ 910 h (≈ 38 jours) de moins que la valeur pratique de 3792 h. Cette différence s'explique principalement par la combinaison des saisons (été/hiver) dans le modèle simulé, qui introduit une variabilité plus représentative du terrain. L'effet des pannes précoces en période estivale, couplé à la dispersion importante des TTF ($\sigma \approx 1275$ h), contribue à cette baisse de la RUL moyenne. Néanmoins, la valeur théorique reste incluse dans l'intervalle de confiance à 90 %, ce qui confirme la cohérence du modèle.

3.3.3 Anticipation du RUL et recommandations

Cette analyse a pour objectif d'estimer la prochaine date probable de défaillance, en prenant comme point de départ (càd $t = 0$) la dernière panne enregistrée, survenue le 25 février 2025. Les résultats de l'exécutions Matlab sont synthétisé dans le tableau 3.4 suivant :

Tableau 3.4 : Résultats d'analyse du RUL anticipée

Saison	Meilleure loi	MTTF simulé	Écart-type	IC à 90 %
Été	Exponentielle	460 h	457 h	[24 h ; 1375 h]
Hiver	Lognormale	5197 h	2889 h	[1931 h ; 10650 h]
Hiver/été	Combinée	2832 h	1475 h	[1139 h ; 5595 h]

D'après les résultats, la simulation Monte Carlo sur la base des lois ajustées aux données estivales et hivernales a permis d'estimer un RUL initial moyen de 2832 h, avec une forte dispersion temporelle ($\sigma \approx 1475$ h). Cette variabilité traduit la coexistence de deux comportements saisonniers opposés : d'un côté, l'été génère des pannes précoces dues à la pression thermique, de l'autre, l'hiver offre une meilleure stabilité et des durées de vie plus longues.

La date estimée de défaillance, située au 23 juin 2025, est entourée d'une marge d'erreur naturelle de ± 61 jours. Ainsi, la panne est susceptible de survenir entre le 23 avril et le 23 août 2025, sous l'effet de la variabilité naturelle des temps de fonctionnement simulés.

Ces résultats suggèrent que la période à risque s'étend sur environ 4 mois, avec une concentration probable autour de l'été. Ainsi, il est recommandé de planifier une intervention préventive entre

mai et août 2025, afin d’anticiper les défaillances critiques tout en optimisant la disponibilité du système Cofely.

La figure 3.18 illustre l’ensemble des courbes de résultats de la simulation Monte Carlo des TTF combinés :

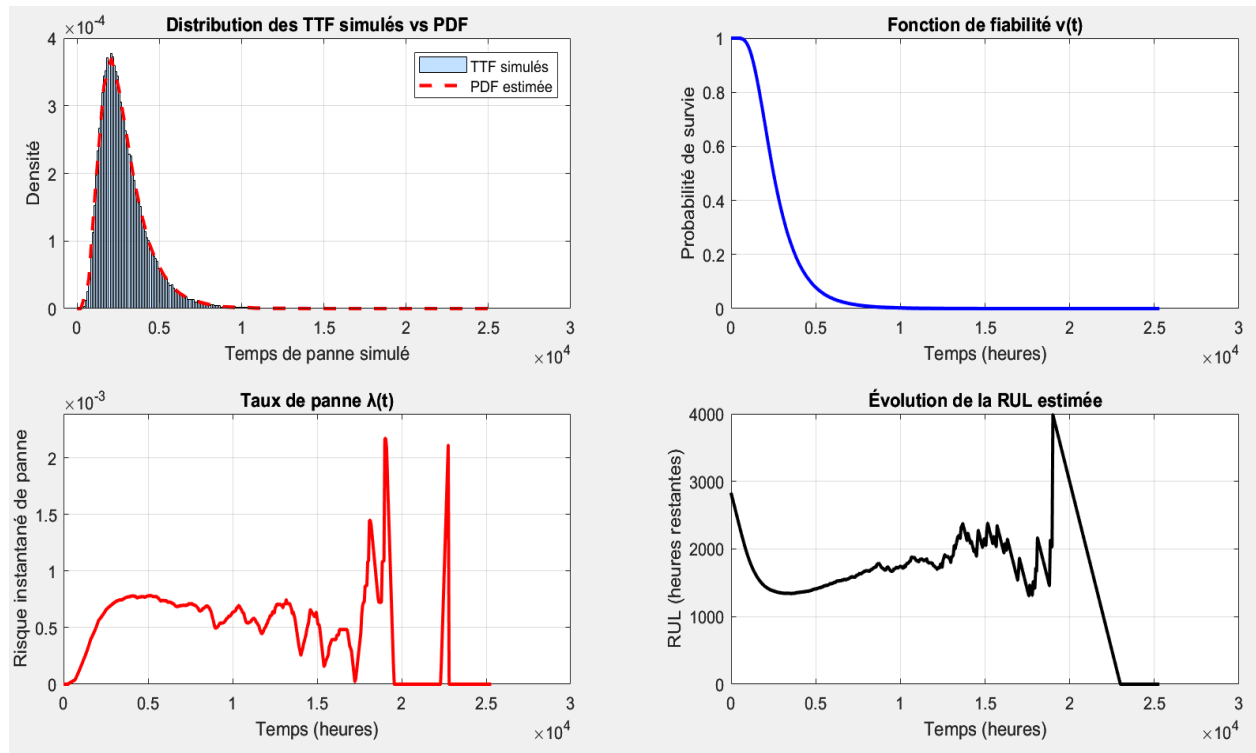


Figure 3.18 : Résultats de l'analyse des TTF pour une RUL anticipée

La superposition de la PDF ajustée à l’histogramme des TTF simulés confirme la cohérence entre le modèle statistique retenu et les données générées par la simulation Monte Carlo. Cette correspondance visuelle renforce la fiabilité du modèle, notamment pour l’estimation de la fiabilité et de la RUL du système.

L’évolution de la RUL simulée met en évidence une diminution rapide durant les premières centaines d’heures, suivie d’une phase de stabilité relative, avant un effondrement marqué en fin de cycle. Ce comportement suggère que le système devient particulièrement vulnérable à partir d’un seuil critique estimé autour de $t \approx 5500$ h, où la fiabilité semble temporairement se stabiliser aux alentours de 0 %.

Par ailleurs, le taux de défaillance n'est pas exploitable dans le cas du TTF combiné, en raison de la superposition de deux régimes statistiques incompatibles, rendant son interprétation non représentative du comportement réel du système.

Ces résultats soulignent la nécessité d'une maintenance anticipative, déclenchée par la RUL estimée, ce qui permettrait de cibler les moments de risque critique avant leur occurrence, afin de minimiser les coûts de réparation et les conséquences des pannes. Cela ouvre la voie à une gestion plus dynamique du circuit Cofely, fondée sur l'observation continue de son comportement probabiliste.

Le travail réalisé dans ce chapitre a abouti à la mise en place d'un modèle méthodologique combinant ajustement statistique, simulation Monte Carlo et estimation de la RUL, afin de caractériser le comportement de composants techniques à partir des données de TTF. Appliqué au cas du circuit Cofely, ce modèle a montré l'intérêt d'une segmentation saisonnière, révélant l'impact des conditions thermiques sur l'évolution des défaillances. Cette approche permet d'affiner les diagnostics de fiabilité et de proposer une maintenance conditionnelle déclenchée par la RUL estimée, afin d'anticiper les défaillances critiques et réduire les coûts associés. Le modèle reste généralisable à d'autres systèmes similaires.

Le chapitre suivant portera sur deux prolongements : le développement d'une interface de diagnostic accessible aux techniciens, et la simulation de différentes stratégies de maintenance afin d'en évaluer les performances.

Chapitre 04

Modélisation Stochastique et Simulations des Maintenances

Chapitre 04 : Modélisation Stochastique et Simulations des Maintenances

L'analyse terrain du circuit frigorifique Cofely, ainsi que les résultats de l'étude fiabiliste, ont mis en évidence une pratique de maintenance exclusivement réactive. Les interventions se limitent généralement à des recharges de fluide frigorigène R134a sans traitement en profondeur du problème ni stratégie préventive structurée. Cette approche entraîne une répétition des incidents, des interruptions non planifiées, des coûts cumulatifs importants, ainsi qu'une détérioration progressive du système.

Dans ce contexte, ce chapitre a pour objectif de proposer une modélisation du comportement du circuit par chaîne de Markov, permettant de simuler plusieurs politiques de maintenance et d'en évaluer les impacts en termes de coût, fréquence d'intervention et disponibilité.

L'ensemble de cette étude vise à structurer une réflexion plus quantitative autour de la maintenance du circuit Cofely, et à ouvrir la voie à une gestion plus anticipative.

4.1 Modélisation stochastique pour l'aide à la décision en maintenance

Dans le fonctionnement quotidien des installations industrielles, la maintenance est devenue un levier stratégique incontournable pour garantir la disponibilité, la sécurité et l'efficacité des systèmes de productions. Elle représente aujourd'hui entre 15 % et 70 % des coûts totaux de production, selon le secteur et le degré de complexité des équipements [22].

Les stratégies de maintenance sont généralement classées en deux grandes familles : La maintenance corrective (réactive), qui intervient après défaillance, et la maintenance préventive, qui vise à anticiper les pannes. Celle-ci se subdivise elle-même en deux approches : la maintenance conditionnelle, déclenchée lorsque des indicateurs de performance franchissent un seuil critique, et la maintenance prédictive, basée sur des modèles de dégradation intégrant des mesures environnementales pour prédire la défaillance future et agir au moment optimal. [23]

Chez LINDE Gas Algérie, le circuit frigorifique Cofely, utilisé pour la production et le maintien de conditions cryogéniques, ne fait actuellement l'objet que d'une maintenance réactive. Lorsque le système subit une perte d'étanchéité importante, notamment en période estivale, cela entraîne des arrêts non planifiés dus au trip des compresseurs. L'intervention se limite à une recharge de

fluide frigorigène R134a, sans diagnostic ni localisation des fuites, ce qui induit une répétition des pannes à moyen terme et une dégradation silencieuse des performances.

Cette section de notre travail a été en partie inspirée par une étude récente portant sur la dégradation continue des systèmes industriels, dans laquelle les auteurs ont développé un modèle combinant une logique de maintenance imparfaite (chaque réparation devient de moins en moins efficace) et un agent d'apprentissage par renforcement pour optimiser les décisions de maintenance sur le long terme [23]. Bien que notre étude n'intègre pas de modèle d'intelligence artificielle, nous avons repris la logique centrale de cette publication : « *A reinforcement learning agent for maintenance of deteriorating systems with increasingly imperfect repairs* » [35]

Et nous avons proposé notre propre modèle stochastique de la détérioration du système de refroidissement Cofely de LGA, via une chaîne de Markov, et comparer différentes politiques de maintenance en simulant leur impact économique et opérationnel sur l'entreprise.

Afin de clarifier la démarche méthodologique adoptée, la figure suivante présente le diagramme de flux que nous avons élaboré pour présenter le processus de prise de décision, l'évolution des états du système et les conditions déclenchant les interventions selon la politique considérée :

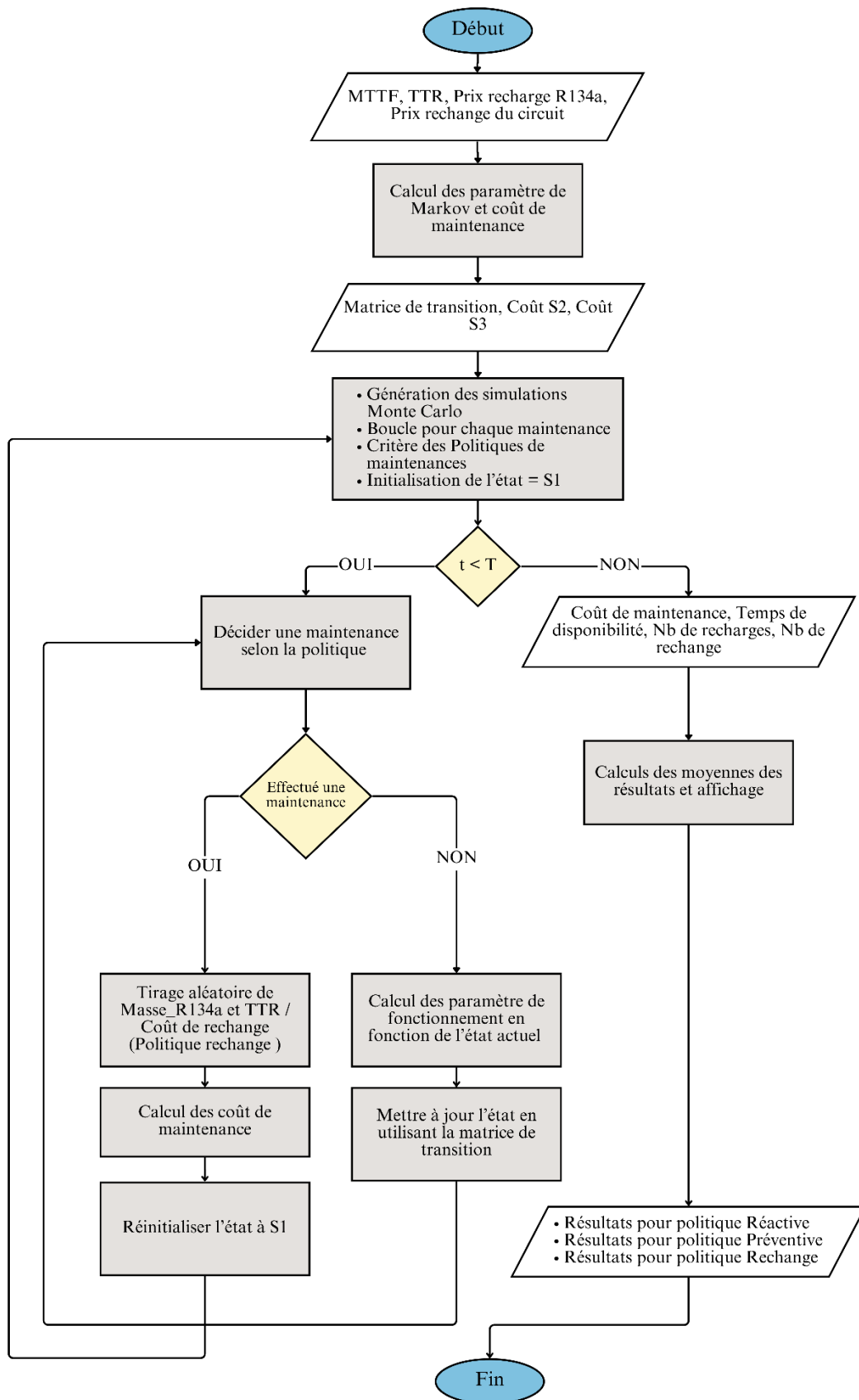


Figure 4.1 : Diagramme de flux de la démarche de simulation proposée

4.1.1 Modélisation Markovienne du circuit frigorifique

La modélisation markovienne est une méthode mathématique utilisée pour représenter des systèmes qui évoluent de manière aléatoire dans le temps, en s'appuyant sur la théorie des processus de Markov, qui repose sur une propriété fondamentale : l'état futur du système ne dépend que de son état actuel, et non de la suite des états précédents, ce qui est appelé la propriété de Markov. [24]

Les principaux concepts de la modélisation markovienne sont l'espace d'états, la matrice de transition et la distribution initiale. L'espace d'états correspond à l'ensemble des situations possibles dans lesquelles le système peut se trouver, tandis que la matrice de transition indique les probabilités de passer d'un état à un autre en un seul pas de temps. Enfin, la distribution initiale représente la probabilité que le système se trouve dans chaque état au départ, permettant ainsi de modéliser et de prévoir l'évolution du système de manière probabiliste. [25]

4.1.2 Hypothèses de la modélisation

Le circuit frigorifique Cofely est modélisé comme un système à dégradation progressive, évoluant selon une chaîne de Markov à temps discret et états finis. Cette approche repose sur les hypothèses suivantes :

❖ Hypothèse 1 : Définition des états

Le système est modélisé à l'aide de trois états distincts représentant les niveaux de dégradation du circuit :

- S1 : état sain (étanchéité normale),
- S2 : état dégradé (fuite lente, fonctionnement possible mais risqué),
- S3 : état critique (fuite importante, arrêt de refroidissement).

Le modèle prend en compte un seul mode de défaillance qui est la perte d'étanchéité du fluide frigorigène R134a au niveau de la tuyauterie, analysée en détail dans le chapitre 2.

❖ Hypothèse 2 : Transitions et réparations

- Les transitions sont irréversibles, sauf après intervention (maintenance).
- Toute intervention (recharge ou rechange) ramène le système en état S1 (remise à neuf).
- Les probabilités de transition entre états sont estimées à partir des TTF observés en été et en hiver et combiné, modélisés par des lois statistiques (voir section 3.3 du rapport).

❖ **Hypothèse 3 :** Le temps est discrétisé en jours, avec un pas de simulation $\Delta t = 1$ jr, et la simulation est effectuée sur une période de 6 ans, correspondant à l'intervalle recommandé pour réaliser des tests de tarage et des vérifications périodiques d'étanchéité de tout le site, ce qui peut représenter un cycle de fonctionnement, conformément aux bonnes pratiques que Linde Gas devrait appliquer.

❖ **Hypothèse 4 :** Estimations des coûts et temps de maintenances :

- **Le coût de recharge en R134a** a été estimé à partir d'un vecteur de données réelles de maintenance collectées au sein de l'unité Cofely de LGA Reghaïa. Ces données comprennent les masses rechargées (en kg) pour différentes pannes survenues au cours des quatre dernières années, ainsi que le prix du fluide, fixé à 1 250 DA/kg pour l'année 2025, tel que communiqué par les ingénieurs de maintenance du site.

Lors de la simulation, une valeur aléatoire est tirée de ce vecteur de masses pour calculer le coût de recharge selon la formule :

$$\text{Coût recharge} = \text{masse_R134a} \times 1\,250 \text{ DA} \quad (4.4.1)$$

Les temps de réparation (TTR) associés aux recharges sont modélisés à partir d'un vecteur de données réelles (tirage aléatoire).

- **Le coût de remplacement** de la tuyauterie a été estimé à 2,270,000 DA. Cette estimation a été établie sur la base des retours d'expérience des ingénieurs de maintenance et de process de LGA (Voir section 4.2.3.1).
- **Les coûts horaires** associés aux états de dégradation (S2) et de panne (S3) ont été estimés à partir du coût moyen d'une recharge de fluide frigorigène R134a, réparti sur la durée moyenne de fonctionnement avant panne de chaque saison. Ainsi :

$$\text{Coût}_{S2} = \frac{\text{coût moyen de recharge}}{MTTF_{\text{hiver}}} \quad (4.2)$$

$$\text{et } \text{Coût}_{S3} = \frac{\text{coût moyen de recharge}}{MTTF_{\text{été}}} \quad (4.3)$$

Cette approche permet d'intégrer dans la simulation un coût horaire représentant la dégradation progressive du système, les pertes d'efficacité et l'inévitabilité d'une future intervention. Ce n'est pas un coût réel engagé à chaque heure, mais une approximation

économique du risque latent de défaillance. Ce choix a été retenu afin de modéliser de façon continue l'impact économique du fonctionnement en mode dégradé, sans se limiter aux seuls événements de maintenance explicite (interventions de recharge ou de rechange).

Il est important de noter que tous les coûts présentés dans cette étude sont des estimations approximatives. L'objectif n'est pas d'obtenir un chiffrage exact des opérations de maintenance, mais plutôt de définir des plages de prix représentatives, permettant de comparer les différentes stratégies de maintenance et de guider le choix de vers la politique la plus pertinente pour le système et l'entreprise.

4.1.3 La Matrice de transition

La dynamique du système est modélisée à l'aide d'une matrice de transition à trois états : S1 (état sain), S2 (état dégradé) et S3 (état critique). Cette matrice est représentée par la chaîne de Markov illustrée dans la figure ci-dessous, sous forme de schéma :

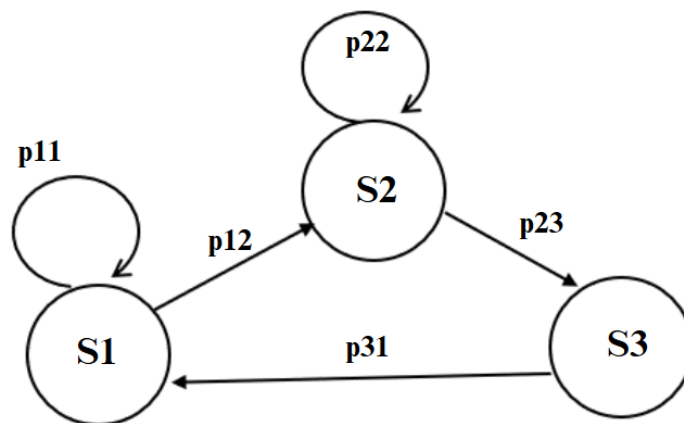


Figure 4.2 : Chaîne de Markov du circuit frigorifique

Les probabilités de transition p_{12} et p_{23} représentent la probabilité que le système passe d'un état donné à un autre état au pas de temps suivant [25]. Ces probabilités sont calculées à partir d'une combinaison pondérée de deux matrices de transition, construites à partir des TTF saisonniers analysés au chapitre 3.

Les matrices saisonnières ont été construites à l'aide d'une loi de Weibull (avec un paramètre de forme $\beta = 2,24$ et d'échelle $\eta = 212,25$ jr) pour les données hivernales et d'une loi exponentielle (avec un taux de défaillance $\lambda = 0,0519$ jr⁻¹) pour les données estivales. Les probabilités de transition ont ensuite été déduites à partir des fonctions de survie associées à ces lois (voir équations 3.3 et 3.7).

La matrice globale permet de capturer la variabilité saisonnière tout en conservant une simulation fluide et continue sur l'ensemble de l'année. Elle est calculée par l'équation suivante :

$$P_{globale} = \alpha_{été} \times P_{été} + \alpha_{hiver} \times P_{hiver} \quad (4.4)$$

Où $P_{globale}$, $P_{été}$ et P_{hiver} sont des matrices 3x3 et α représente la pondération de la saison été et hiver sur le système. Elle est estimée à 50% d'après l'analyse de fiabilité (voir chapitre 3).

Les résultats de la matrice pondérée sont présentés ci-dessous :

$$P_{globale} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9747 & 0,0253 & 0 \\ 0 & 0,9747 & 0,0253 \\ 1,0000 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.1.4 Simulation du comportement du circuit

La simulation reproduit le comportement dynamique et la détérioration progressive du circuit frigorifique Cofely sur une période de 6 ans, à l'aide d'un modèle de Markov à trois états représentant les niveaux d'étanchéité (sain, dégradé, critique). Le système évolue pas à pas selon les probabilités de transition estimées, traduisant un passage progressif vers la défaillance. À chaque heure simulée, l'état courant détermine les coûts de fonctionnement et les risques de panne, ainsi que la possibilité de déclencher une intervention selon la politique de maintenance choisie (réactive, préventive ou remplacement complet). Lorsqu'une intervention est déclenchée, un temps de réparation et un coût de recharge sont calculés à partir de données historiques. La simulation est répétée par la méthode de Monte Carlo afin d'évaluer l'impact économique et opérationnel de chaque stratégie, tout en tenant compte de l'incertitude liée à la dégradation du système.

4.2 Politiques de maintenance simulées

Dans le but de comparer différents modes de gestion du circuit Cofely, trois politiques de maintenance ont été modélisées et testées par simulation. Chaque politique définit des règles spécifiques de déclenchement des interventions, influençant le comportement du système en termes de coûts, de disponibilité et de fréquence des pannes. Ces politiques sont :

4.2.1 Politique réactive

Dans cette approche, aucune maintenance n'est effectuée tant que le système n'est pas en panne critique (état S3). L'intervention consiste alors en une recharge de fluide frigorigène R134a, sans localisation ni réparation des fuites. Le système redémarre ensuite dans un état « sain » supposé,

mais reste exposé à une nouvelle dégradation progressive. Cette politique reflète la pratique réelle actuellement en vigueur au sein de l'unité Cofely.

4.2.2 Politique préventive

Dans cette stratégie, une intervention de maintenance est déclenchée dès que le système entre en état dégradé (S2), avant même qu'une panne critique ne survienne. L'objectif est de prévenir l'aggravation de la défaillance en effectuant une recharge du fluide frigorigène dès les premiers signes de fuite lente. Après intervention, le système est réinitialisé en état sain (S1).

4.2.3 Politique de rechange

Cette stratégie consiste à effectuer un rechange complet de la tuyauterie du circuit frigorifique après un certain temps de fonctionnement et à la première panne critique (état S3), selon une condition planifiée unique. L'hypothèse retenue dans cette étude est que le rechange est effectué une seule fois, à la première apparition de l'état S3, et que le système devient totalement fiable par la suite (c'est-à-dire, il ne se détériore plus). Cette intervention inclut une estimation d'un coût fixe élevé ainsi qu'un temps d'indisponibilité prolongé, mais vise à éliminer définitivement le problème de fuite.

4.2.3.1 Estimation technique et économique du circuit de tuyauterie

Dans le cadre de la simulation de la politique de rechange, il est nécessaire d'estimer la longueur approximative du réseau de tuyauterie frigorifique à remplacer, ainsi que le coût global associé. Cette estimation vise à appuyer les hypothèses économiques du modèle stochastique, en quantifiant l'impact financier d'un remplacement total du circuit.

Ce choix s'appuie sur le mode de défaillance principal modélisé dans cette étude : **une fuite généralisée et non localisable**, entraînant une perte progressive mais significative de fluide frigorigène, typiquement constatée en période estivale. Bien que le système reste fonctionnel, les pertes se répètent d'année en année. Plutôt que d'accumuler des interventions ponctuelles, coûteuses et incertaines, la stratégie retenue est celle d'un rechange complet, visant à éliminer durablement la cause de défaillance.

En l'absence de documents techniques précis (schémas isométriques, plans d'installation ou mètres), les estimations ont été réalisées en collaboration avec les ingénieurs de l'entreprise LGA,

en s'appuyant sur leur retour d'expérience terrain, leur connaissance du circuit Cofely, et les données empiriques issues des maintenances précédentes.

A. Description technique du système :

Le système étudié est un chiller industriel au R134a, avec une charge frigorifique totale de 500 kg. Il est composé de trois compresseurs, d'un évaporateur, d'un réservoir liquide, d'un détendeur, et d'un condenseur à air situé sur le toit de l'entrepôt. Les compresseurs, l'évaporateur, le réservoir et le détendeur sont physiquement regroupés, tandis que le condenseur est distant, ce qui implique un tracé de tuyauterie vertical et horizontal important.

Les températures de fonctionnement typiques sont de -10 °C pour l'évaporation et de +70 °C côté condensation, générant une forte contrainte thermique sur les conduites haute pression.

B. Estimation de la longueur linéaire de tuyauterie

L'estimation repose sur une analyse fonctionnelle et spatiale du circuit :

- **Lignes principales** : 50 mètres linéaires, incluant l'aller-retour jusqu'au condenseur en toiture (hauteur estimée de 15 m et distance horizontale de 10 m).
- **Collecteurs et raccordements internes** : estimés à 5 mètres, pour relier les trois compresseurs à l'évaporateur et au réservoir.
- **Petites conduites secondaires** : 2 mètres (capteurs, purges)

Total estimé : environs 57 mètres linéaires de tuyauterie frigorifique.

C. Estimation des coûts d'interventions

L'estimation présentée dans le tableau a été établie sur la base des retours d'expérience des ingénieurs de maintenance et de process, en l'absence de documents techniques détaillés dans l'entreprise.

Tableau 4.1 : Coûts d'intervention de rechange estimée

Catégorie de coût	Détail	Estimation (DA)
Main-d'œuvre	Remplacement de 57 m (12–20 h) + Mise sous vide et recharge (8–15 h) Coût horaire : 80 €/h $\approx$ 12 000DA	240 000 DA – 420 000 DA
Fluide frigorigène (R134a)	Recharge complète (500 kg $\times$ 1250 DA/kg)	625 000 DA
Pièces de rechange	Tuyauterie (57 m $\times$ $\approx$ 21 500 DA/m) + raccords + accessoires éventuels	800 000 DA – 1 225 500 DA
Coût total par intervention		$\approx$ 1 665 000 DA – 2 270 000 DA

Afin de garantir une marge de sécurité dans l'évaluation économique, la valeur maximale de 2,270,000 DA, sera retenue dans le modèle. Cette approche permet de prendre en compte les pires conditions techniques et économiques, tout en évitant une sous-estimation des impacts financiers liés à ce type de défaillance.

4.3 Analyse comparative des politiques de maintenance

Le circuit Cofely de LGA, chargé en 500kg de réfrigérant R134a, est particulièrement exposé à un risque de fuite progressive du fluide frigorigène, pouvant entraîner un arrêt brutal du système de refroidissement en cas de perte excessive. Ce phénomène constitue le mode de défaillance principal identifié dans cette étude. Les trois politiques de maintenance ont donc été simulées afin d'évaluer leur efficacité à maîtriser ce risque tout en optimisant les performances économiques et la disponibilité du système.

Nous avons effectué 100 000 simulations Monte Carlo pour une période de 6 ans et les résultats sont présentés dans le tableau 4.1 et sur la figure 4.3.

Tableau 4.2 : Résultats des simulations de politiques de maintenance sur 6 ans

Politique	Coût total cumulé (DA)	Nombre moyen d'interventions	Disponibilité réelle moyenne (%)
Réactive	3645421,69	26.97	99,6 %
Préventive	5883785.00	53.91	97,2 %
Rechange	2289713.81	1,00	99,8 %

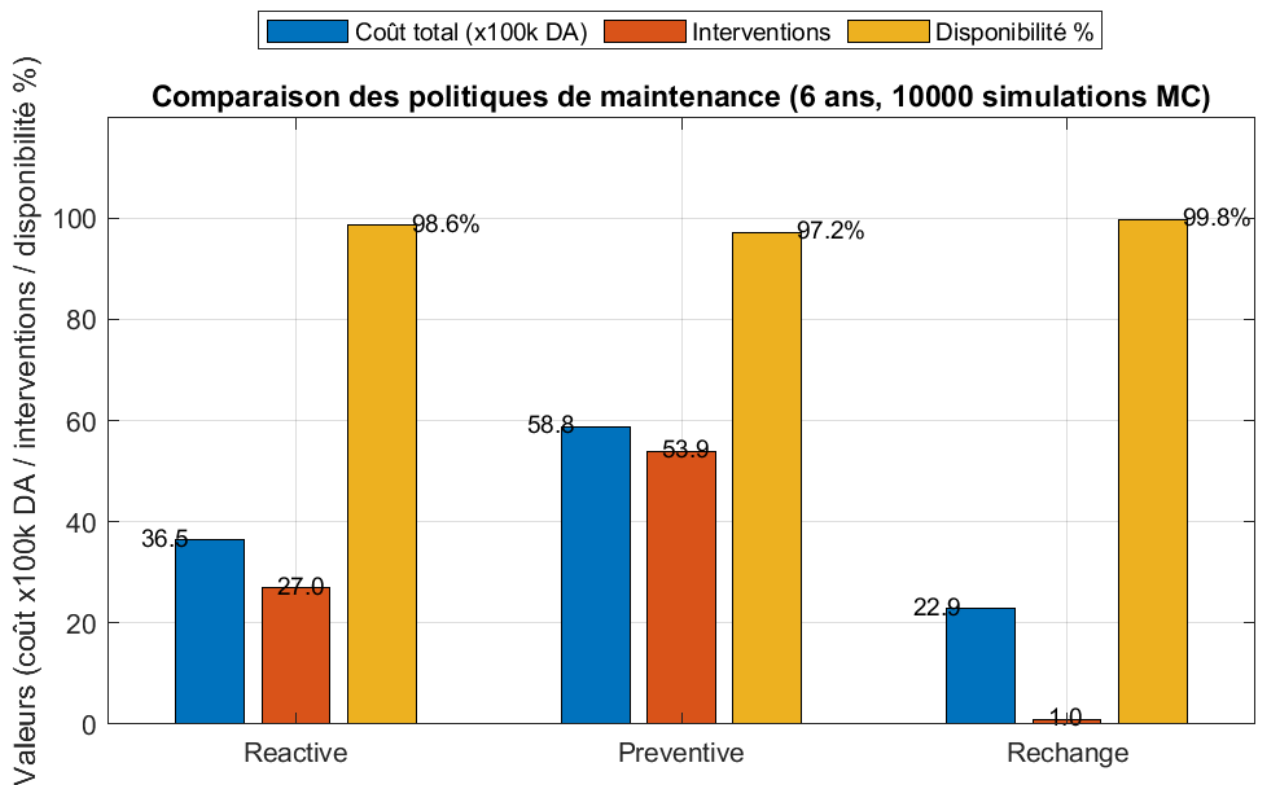


Figure 4.3 : Histogramme comparatifs des politiques de maintenance

Les résultats de la simulation mettent en évidence les compromis entre coût global, disponibilité du système et fréquence des interventions :

- **La politique réactive** demeure économiquement avantageuse tout en maintenant une très bonne disponibilité ($\approx 98,6\%$) avec un nombre d'intervention de 27. Toutefois, elle présente un inconvénient majeur de laisser le système atteindre des états critiques avant toute intervention, ce qui augmente le risque de pertes importantes de R134a, un gaz à fort potentiel de réchauffement climatique et de risque d'asphyxie en absence d'oxygène.
- **La politique préventive**, bien qu'anticipative, génère un nombre élevé d'interventions (53), avec des coûts cumulés relativement importants, sans pour autant offrir un gain significatif en disponibilité par rapport à la stratégie réactive ($\approx 97,2\%$). Néanmoins, elle contribue à limiter la fréquence des fuites graves et respecte mieux les bonnes pratiques environnementales.

Ces performances restent toutefois perfectibles : l'introduction d'un seuil RUL dynamique permettrait d'optimiser le moment des interventions, de réduire les maintenances inutiles, et d'améliorer la rentabilité globale de cette politique.

- **La politique de rechange**, s'impose comme la stratégie la plus performante en termes de fiabilité et de réduction des interventions. Le remplacement complet du circuit à la première panne critique permet de réinitialiser la dégradation, assurant ainsi une disponibilité quasi parfaite ($\approx 99,8 \%$) avec un minimum d'interventions (une seule intervention de rechange sans prendre en considération des maintenances préventives durant les 6 années). Son coût est inférieur à celui de la stratégie réactive tout en offrant des performances supérieures. Cela en fait une option rentable, durable et respectueuse de l'environnement.

4.3.1.1 Recommandations stratégiques

Au regard des analyses de fiabilité, des résultats de simulation et des contraintes opérationnelles du site Cofely, une stratégie hybride s'impose comme la solution la plus pertinente pour assurer la durabilité et la performance du circuit frigorifique. Cette approche repose sur trois axes complémentaires :

- D'abord, un rechange planifié de la tuyauterie à moyen terme, permettant de corriger durablement les pertes d'étanchéité et de réinitialiser l'état de dégradation du système.
- Un contrôle périodique de l'étanchéité, conforme aux recommandations du manuel d'exploitation COFELY et aux exigences réglementaires (notamment le règlement européen FGAS n° 842/2006), intégré dans une politique préventive cohérente.
- Une maintenance préventive conditionnelle, pilotée par l'estimation dynamique de la durée de vie restante (RUL), afin de déclencher les interventions au moment opportun et d'éviter à la fois les pannes critiques et les maintenances inutiles.

Cette stratégie permettrait à Linde Gas Reghaïa de passer d'une logique réactive tolérante à une gestion proactive et maîtrisée, en réduisant les coûts sur le long terme, en sécurisant la continuité de production et en renforçant la conformité environnementale de l'installation. Dans un contexte industriel où la fiabilité des équipements est un levier stratégique, ce changement de paradigme représente un investissement structurant pour la pérennité du site.

En conclusion de ce chapitre, le raisonnement développé vise à structurer une réflexion anticipative de la maintenance, dans l'objectif de choisir la meilleure stratégie de maintenance pour le circuit Cofely, équipement en détérioration continue.

La modélisation par chaîne de Markov a permis de simuler plusieurs politiques de maintenance et d'en évaluer les impacts sur le coût, la disponibilité et la fréquence des interventions. Les résultats obtenus montrent que la stratégie de rechange constitue la solution la plus efficace pour réparer durablement la fuite et optimiser les coûts d'intervention. Toutefois, pour préserver la durée de vie du système remplacé, il serait judicieux d'y associer une maintenance préventive ciblée.

Ces résultats offrent ainsi une base méthodologique solide pour faire évoluer la logique actuelle de maintenance vers une approche plus structurée, préventive et pilotée par les données, en rupture avec les pratiques exclusivement réactives actuellement en vigueur.

Chapitre 05

Conception D'Une Interface D'Analyse De Fiabilité

Chapitre 05 : Conception d'une interface d'analyse de fiabilité

Dans un contexte de transformation numérique accélérée dans le secteur industriel, la performance des entreprises repose de plus en plus sur leur capacité à anticiper les défaillances, à prolonger la durée de vie des équipements et à intégrer des outils de maintenance intelligents. Face à ces enjeux, le développement d'une solution logicielle orientée fiabilité devient une démarche stratégique.

Ce chapitre s'attache à étudier la pertinence de cette initiative, en identifiant les besoins, en analysant les principales caractéristiques du marché cible, et en présentant les grands axes du modèle économique retenu. Une section complémentaire sera également dédiée à l'interface développée, détaillant son architecture, ses fonctionnalités, ainsi que les choix techniques et ergonomiques qui ont guidé sa conception.

5.1 Etude de marché

Le marché cible est constitué des secteurs industriels à forte intensité d'actifs, où la continuité opérationnelle est critique. Cela inclut notamment :

- L'agroalimentaire
- La chimie et la pharmaceutique
- L'industrie manufacturière (textile, métallurgie, électronique...)
- L'énergie et les services publics
- Le transport et la logistique

Ces secteurs sont caractérisés par une présence significative d'équipements mécaniques, thermiques ou électriques nécessitant une surveillance continue. L'approche de maintenance prédictive y est de plus en plus adoptée, dans une logique de transition vers l'Industrie 4.0.

5.2 Modèle économique et Business Model Canvas

Le modèle économique retenu repose sur une stratégie SaaS (Software as a Service), avec une structure modulaire offrant plusieurs niveaux de services. Il est pensé pour des cycles de vente courts, une facilité de déploiement, et une montée en puissance progressive. Le Business Model Canvas présenté dans la figure 5.1 ci-dessous synthétise les neuf blocs-clés de la proposition de valeur :

BUSINESS MODEL CANVAS



Figure 5.1 : Business Model Canvas

5.3 Feuille de route

Afin d'atteindre les objectifs de développement et de mise en marché de la solution, une feuille de route structurée a été élaborée. Celle-ci, présentée dans le tableau 5.2 suivant, organise les étapes clés du projet dans une logique progressive et cohérente.

Tableau 5.1: Feuille de route de développement du produit

Période	Objectifs clés	Détails techniques et fonctionnels
Mois 0 – 3	Lancement du MVP (Produit Minimum Viable)	- Déploiement d'une première version fonctionnelle (diagnostic de fiabilité simple, visualisation de base)
		- Collecte de retours utilisateurs pour valider l'ergonomie et les choix fonctionnels
Mois 4 – 6	Modules avancés & interopérabilité	- Ajout d'un tableau de bord multi-utilisateur
		- Intégration d'API pour la synchronisation avec les systèmes d'information industriels (GMAO, ERP, etc.)
Mois 7 – 9	Internationalisation	- Développement d'une interface multilingue (français / anglais / arabe)
		- Adaptation de l'expérience utilisateur à différents contextes culturels et industriels
Mois 10 – 18	Intelligence artificielle & maintenance prédictive	- Implémentation de modèles d'IA pour la prédiction des défaillances et estimation du RUL en temps réel
		- Amélioration des capacités de diagnostic automatisé et de visualisation prédictive

5.4 Interface d'analyse de fiabilité

Afin de rendre l'analyse de fiabilité plus accessible aux utilisateurs non experts et de faciliter l'estimation du RUL des équipements, une interface interactive, nommée *Reliability Analyzer Tool*, a été développée, visant à simplifier l'exploitation des résultats issus du modèle développé.

5.4.1 Cadrage et préparation du développement

Dans le cadre de l'optimisation de la maintenance préventive des équipements industriels, il est essentiel de pouvoir s'appuyer sur une analyse de fiabilité claire et facilement exploitable. Toutefois, les outils de traitement statistique comme MATLAB, bien que puissants, restent peu accessibles aux utilisateurs non experts, car ils nécessitent une certaine expertise technique et ne proposent pas une visualisation intuitive des résultats.

Afin de rendre notre modèle de fiabilité plus accessible, réutilisable et compréhensible, il est nécessaire de concevoir une interface intuitive et accessible. Elle permet de simplifier l'utilisation du programme en facilitant le chargement des données (TTF), l'exécution des analyses et la consultation des résultats de manière claire et interactive.

5.4.1.1 Identification des utilisateurs finaux

Les utilisateurs finaux ciblés par cette interface sont principalement :

- Des techniciens de maintenance,
- Des ingénieurs en fiabilité,
- Des responsables QHSE ou de production.

L'outil est conçu pour répondre aux besoins :

- D'analyse rapide des données de fiabilité,
- D'aide à la décision basée sur des résultats quantitatifs,
- De visualisation claire et synthétique des résultats,
- Sans nécessité d'une maîtrise approfondie des outils de programmation.

5.4.1.2 Choix technologiques pour l'interface

Le langage Python a été retenu pour son accessibilité, sa syntaxe claire et la richesse de ses bibliothèques scientifiques, telles que :

- *NumPy* : pour le calcul numérique et la gestion des tableaux multidimensionnels,
- *SciPy* : pour les traitements scientifiques avancés (intégration, optimisation, etc.),

- ***Pandas*** : pour la manipulation, l'analyse et la structuration des données,
- ***Matplotlib*** : pour la création de graphiques et la visualisation des données.

L'ensemble de ces outils facilite grandement l'analyse statistique, l'exploration des données et la production de rapports visuels.

Python est une open source gratuit et largement adopté dans le domaine de la data science. Il constitue un alternatif souple, moderne et durable face aux logiciels propriétaires comme MATLAB, dont l'accès est restreint par des licences payantes.

Pour l'interface graphique, le ***framework Streamlit*** a été choisi pour sa capacité à transformer rapidement un script Python en une application web interactive, esthétique et intuitive. Il permet un déploiement simple, sans infrastructure lourde, tout en garantissant une expérience utilisateur fluide et professionnelle, même pour des profils non techniques.

5.4.2 Conception et réalisation de l'interface

L'interface est conçue selon une architecture modulaire centralisée sur une page unique, où les différentes sections apparaissent de manière dynamique en fonction des actions de l'utilisateur. Cette approche rend l'expérience plus fluide et intuitive, tout en simplifiant la navigation.

Le fonctionnement de l'interface suit une logique séquentielle claire, représentée dans la figure 4.4 ci-dessous :

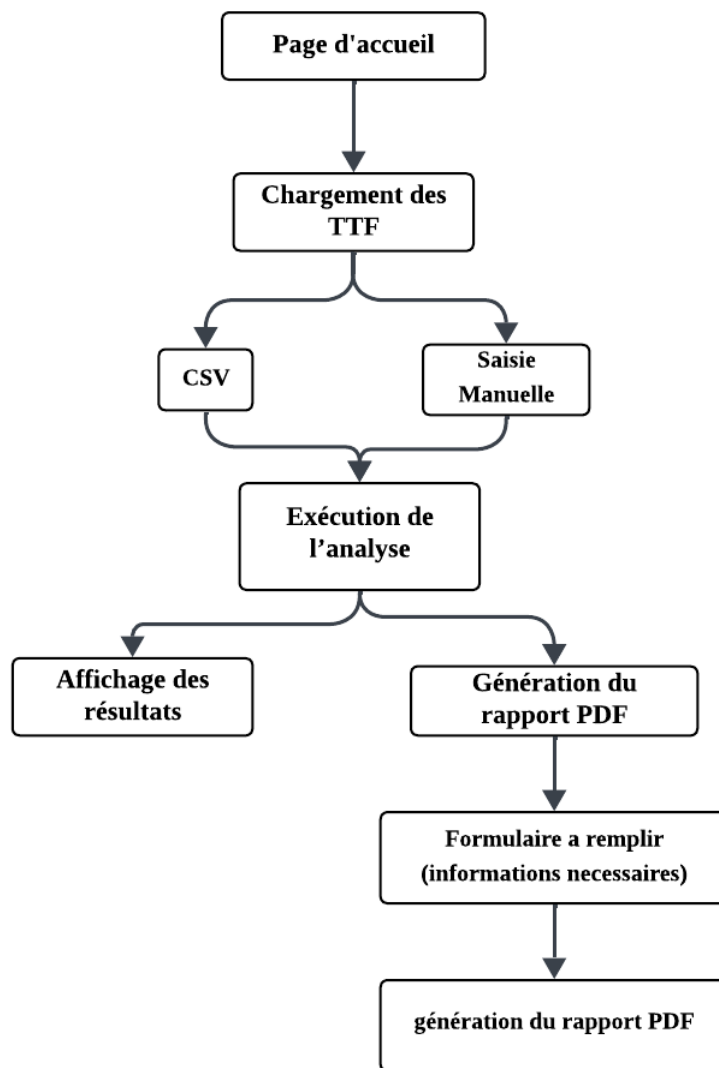


Figure 5.2 : Diagramme descriptive de la navigation de l'interface

L'utilisateur commence par choisir un mode de saisie des données : soit l'importation d'un fichier CSV, soit la saisie manuelle. Une fois les données validées, le bouton « **Commencer l'analyse** » déclenche automatiquement les traitements statistiques. Les résultats s'affichent ensuite sous forme de graphiques et d'indicateurs, permettant une lecture visuelle des tendances.

L'utilisateur peut ensuite accéder à un résumé synthétique via le bouton « **Voir le résumé** », avant de passer à la génération du rapport PDF, un exemple est fourni en Annexe D, rendue possible après avoir rempli un formulaire contenant les informations nécessaires à la personnalisation du rapport.

Afin d’illustrer concrètement le résultat du développement, la figure 4.2 ci-dessous présente une vue de l’interface graphique finale.

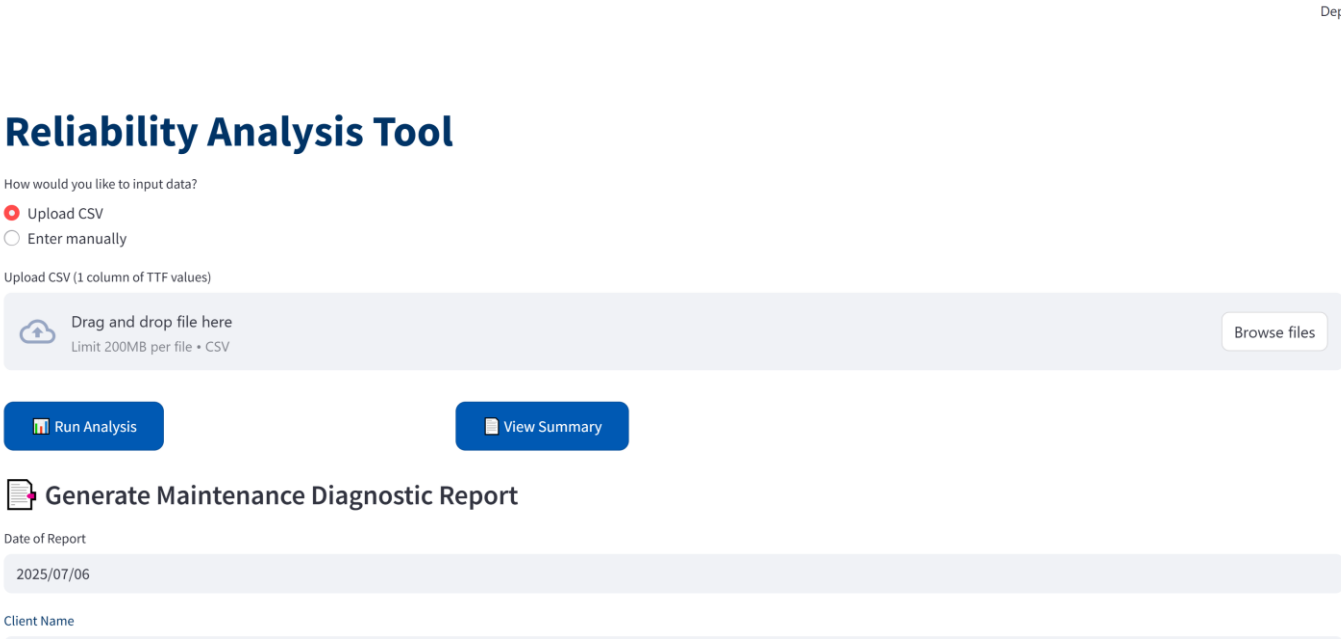


Figure 5.3 : Page d'accueil de l'interface

Voici un aperçu de la manière dont l’interface affiche les résultats de l’analyse de fiabilité, tels que présentés dans les figures 5.4 et 5.5.

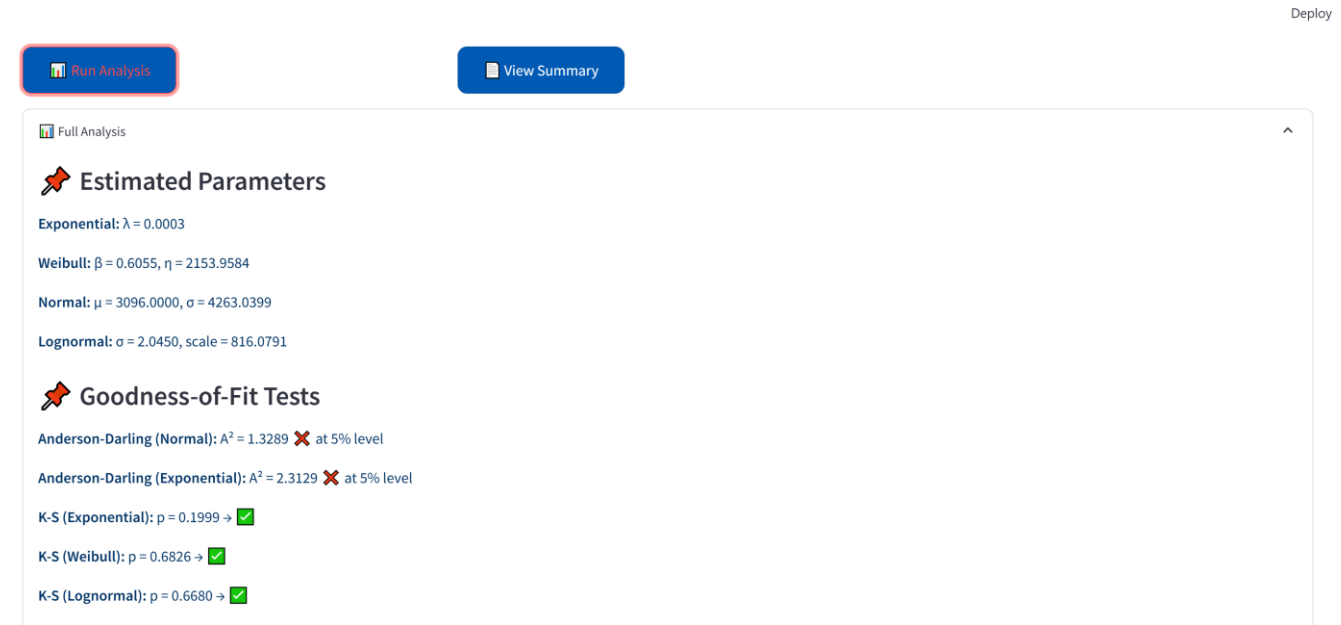


Figure 5.4 : Exemple 1 des résultats de l'interface

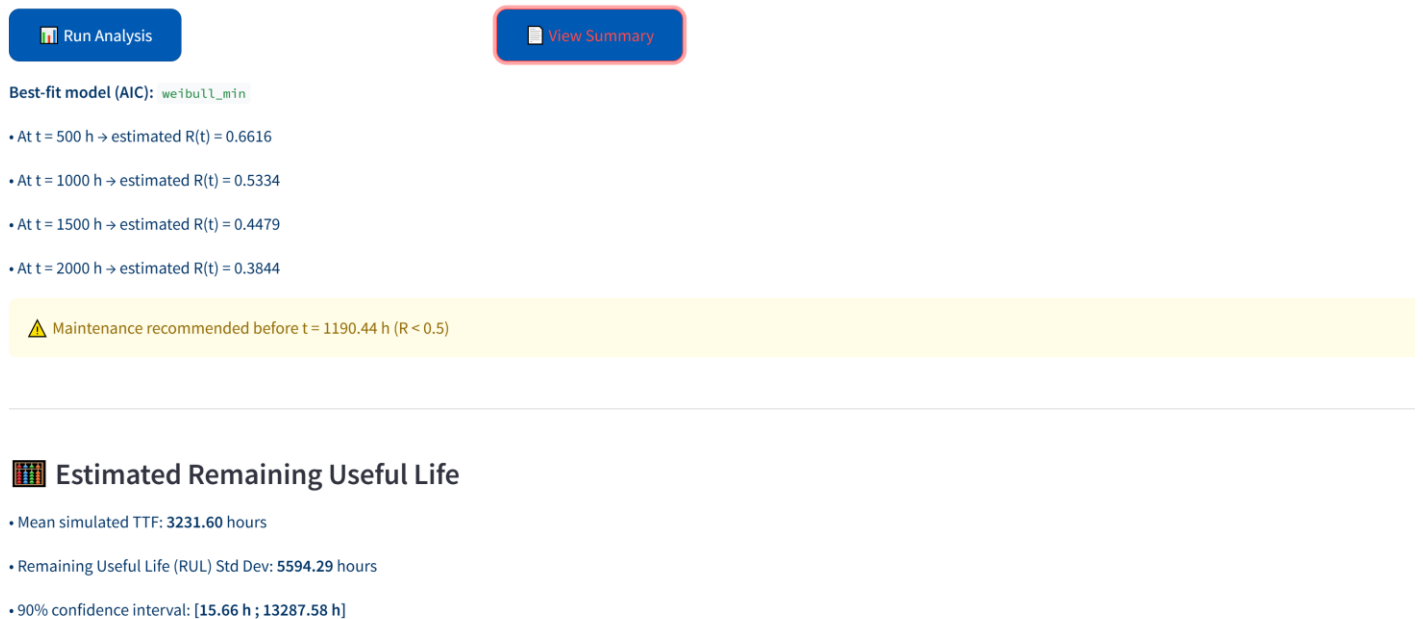


Figure 5.5 : Exemple 2 des résultats de l'interface

5.4.3 Perspectives d'évolution

Plusieurs améliorations pourraient être envisagées pour renforcer l'utilisabilité et la portée de l'outil :

- **Déploiement sur le web via une plateforme dédiée** : cela permettrait aux utilisateurs d'accéder à l'interface depuis n'importe quel appareil connecté à Internet, sans avoir besoin d'installer quoi que ce soit localement. Ce type de déploiement facilite le partage de l'outil au sein d'une équipe ou entre différents sites industriels, et garantit une utilisation plus flexible et centralisée.
- **Intégration d'une API** : Permettrait de connecter l'outil à des systèmes de gestion existants (par exemple : ERP, bases de données internes, outils métier), facilitant ainsi l'automatisation des échanges de données sans passer par des fichiers manuels.
- **Mise en place d'un système de sauvegarde et de rechargement des projets** : L'utilisateur pourrait enregistrer l'état de son analyse (fichiers, paramètres, résultats) et y revenir plus tard sans tout recommencer. Cela améliore grandement l'expérience utilisateur, notamment pour les projets longs ou complexes.
- **Amélioration de la gestion des erreurs** : L'ajout de messages d'erreur plus clairs et d'un système de validation renforcé (ex. : contrôle du format des fichiers, des valeurs manquantes, etc.) rendrait l'outil plus robuste et accessible même à des utilisateurs non techniques.

- **Traduction multilingue de l'interface** : Offrir une interface disponible en plusieurs langues (français, anglais, arabe, etc.) permettrait de démocratiser l'outil auprès d'un public plus large et de favoriser son adoption en milieu international ou multiculturel.
- **Ajout de fonctionnalités avancées** : Intégrer un mode expert, des paramètres de personnalisation plus poussés ou encore des rapports comparatifs entre différentes analyses enrichirait l'outil, répondant ainsi à des besoins plus techniques ou spécifiques.

En conclusion de ce chapitre, l'ensemble des outils développés et présentés vise à structurer une réflexion anticipative de la maintenance, dans l'optique d'optimiser la fiabilité des équipements.

D'une part, l'interface d'analyse de fiabilité qui permet un accès facile aux calculs statistiques établis au chapitre précédent. D'autre part, la modélisation par chaîne de Markov qui a montré qu'une stratégie hybride, combinant une maintenance préventive conditionnelle basée sur la RUL et un remplacement planifié réparant la fuite, apparaît comme la solution la plus adaptée pour anticiper les pannes, réduire les risques et améliorer la fiabilité du circuit Cofely.

Ces outils constituent ainsi une base solide pour faire évoluer la logique de maintenance actuelle vers une approche plus structurée, préventive et pilotée par les données, en rupture avec les pratiques purement réactives observées sur le terrain.

En conclusion, ce chapitre a permis de poser les bases d'une solution logicielle orientée fiabilité, construite autour d'un besoin clairement identifié, d'un modèle économique SaaS adapté, et d'une feuille de route structurée. L'interface développée vient concrétiser cette démarche, en rendant l'analyse de fiabilité accessible et exploitable, dans une logique de maintenance prédictive et d'amélioration continue

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail s'inscrit dans un contexte industriel où les exigences de production continue limitent souvent la réalisation des opérations de maintenance préventive. L'entreprise Linde Gas Algérie fait face à des difficultés importantes, notamment le non-respect des cycles de tarage et de maintenance préventive des équipements de l'unité de séparation d'air.

Dans ce cadre, notre projet a eu pour objectif de proposer une démarche probabiliste visant à anticiper les défaillances du circuit de refroidissement et à orienter la prise de décision en matière de maintenance, tout en réduisant les risques d'arrêts imprévus et leurs conséquences sur la performance du système.

Pour répondre aux objectifs fixés, notre démarche a débuté par une étude HAZID, qui a mis en évidence le circuit frigorifique comme l'élément le plus critique de l'unité de séparation d'air. L'analyse a ensuite été approfondie à l'aide des méthodes d'analyses AMDEC et SERP. Celles-ci ont confirmé la criticité de l'étanchéité de la tuyauterie, classée comme seul cas hautement critique, avec la fuite identifiée comme mode de défaillance le plus récurrent. L'indice de priorisation de la maintenance obtenu avec la méthode SERP a atteint 51,85, renforçant cette priorisation.

La suite du travail a été reposé sur une modélisation statistique et prédictive ; La première phase, d'ordre statistique, a permis d'identifier les lois probabilistes les plus représentatives des temps d'avant-défaillance et d'en estimer les paramètres. Bien que la loi de Weibull ait montré un bon ajustement statistique, son application initiale a révélé des écarts par rapport au comportement observé du système. La seconde phase, fondée sur la méthode de simulation Monte Carlo, a permis d'évaluer de manière plus réaliste la durée de vie résiduelle utile (RUL) du système.

Afin de renforcer la fiabilité du modèle, des ajustements méthodologiques ont été apportés. L'un des axes majeurs d'amélioration a consisté à intégrer l'effet des variations saisonnières en segmentant les données selon les conditions thermiques, ce qui a permis de mieux représenter le comportement réel du système. Cet ajustement a conduit à une estimation anticipative d'une durée de vie résiduelle de 2832 heures à partir de la dernière panne. Par ailleurs, une modélisation stochastique markovienne a été développée afin d'évaluer différentes politiques de maintenance et d'orienter les décisions vers des stratégies optimales. La stratégie de rechange constitue la solution la plus efficace pour réparer durablement la fuite et optimiser les coûts d'intervention et obtenir une disponibilité quasi-totale (99,8 %). Toutefois, pour préserver la durée de vie du système

remplacé nous recommandant d'y associer une maintenance préventive ciblée, adéquate aux recommandations de l'exploitants et aux calculs du RUL.

Enfin, une interface en cours de développement a été conçue dans une version locale, avec pour objectif de faciliter l'exploitation des résultats par les utilisateurs cibles, et d'ouvrir la voie à une éventuelle intégration industrielle future.

En définitive, ce travail de fin d'études a permis de poser les bases d'une démarche de fiabilité appliquée à un environnement industriel complexe, malgré certaines contraintes notables. Les principales difficultés rencontrées ont concerné la disponibilité et la qualité des données. Bien qu'accessibles, celles-ci se sont avérées à la fois peu nombreuses et parfois incomplètes, ce qui a limité la portée des analyses statistiques et induit des écarts non négligeables dans les résultats de modélisation.

De plus, la politique de maintenance actuellement adoptée par l'entreprise, essentiellement réactive, a complexifié la tâche. Cette approche, fondée sur une intervention post-panne, favorise une dégradation lente mais continue des équipements, rendant ainsi plus difficile la mise en place de modèles prédictifs fiables basés sur les historiques.

Malgré ces défis, l'étude menée présente une réelle valeur ajoutée. Elle a permis d'explorer, de manière structurée, une méthodologie de simulation et de prévision, notamment via la méthode de Monte Carlo, ouvrant la voie à une évolution vers une maintenance plus proactive.

Par ailleurs, la méthodologie développée ne se limite pas au cas de Linde Gas Algérie. Elle peut être transposée à d'autres systèmes industriels confrontés à des enjeux similaires, contribuant ainsi à améliorer la disponibilité des équipements, à réduire les coûts liés aux arrêts imprévus, et à renforcer la sécurité des installations.

En somme, ce travail constitue une première étape prometteuse vers une stratégie de maintenance prédictive, plus intelligente et adaptée aux réalités du terrain.

Références

Références

- [1] Linde Gas Algérie, «Documents Linde».
- [2] The group Linde, Air separation plants - History and technological progress in the course of time, 2019.
- [3] The Group Linde, «Manuel d'exploitation de Réghaia – Chapitre 1 : Description de processus, spécifications générales et principales théoriques,» 2011.
- [4] OTV Veolia, «Étude HAZID – Conception – Réalisation pour la décantation primaire dans le cadre des travaux de la refonte de l'usine Seine Aval,» 2018.
- [5] Vista Oil & Gas, «Hazard Identification (HAZID) Studies,» 2019.
- [6] COFELY, Documentation technique Quantum : Manuel de l'exploitant, 2012.
- [7] J. a. R. M. G. a. M. C. S. Balaraju, «Fuzzy FMEA risk evaluation approach for LHD machine – A case study,» Journal of Sustainable Mining, vol. 18, n° 14, pp. 257--268, 2019.
- [8] M. J. Hansen, «StatStuff,» January 2011. [En ligne]. Available: <https://statstuff.com/>. [Accès le 20 June 2025].
- [9] Electric Power Research Institute, «Guideline for Establishing Criticality Rankings for Fossil Power Plant Systems and Components,» EPRI, Palo Alto, CA, 2012.
- [10] E. Hartini, S. Dibyo et S. Pujiarta, «Determination of Maintenance Priority Index (MPI) for Components on RSG-GAS Safety System,» Journal of Nuclear Reactor Technolog, 2018.
- [11] A. B. S. Beleumi, «Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité,» Université Constantine 1 , Constantine, Algeria, 2013-2014.
- [12] C.-D. L. M. Xie, Weibull Distributions and Their Applications, Springer, 2006.
- [13] E. Kreyszig, Advanced Engineering Mathematics, Wiley, 2011.
- [14] N. H. A. Sahib, «Review of Maximum Likelihood Estimation Method,» International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS), vol. 7, n° 18, pp. 20-23, August 2023.
- [15] R. B. Millar, Maximum Likelihood Estimation and Inference: With Examples in R, SAS and ADMB, Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [16] É. L. a. T. Mary-Huard, «Une introduction au critère BIC: fondements théoriques et interprétation,» Journal de la Société française de statistique, vol. 147, n° 11, pp. 39-57, 2006.
- [17] S. Raychaudhuri, «Introduction to Monte Carlo Simulation,» Miami, 2008.
- [18] A. Joulin, «Méthodes de Monte Carlo,» Département Génie Mathématique et Modélisation (GMM), INSA Toulouse, Toulouse, 2019-2020.
- [19] W. Q. Meeker et L. A. Escobar, Statistical Methods for Reliability Data, New York, 1998.
- [20] H. Cramér, Mathematical Methods of Statistics, Princeton University Press, 1946.

- [21] D. Thomas, «The Costs and Benefits of Advanced Maintenance in Manufacturing,» NIST Pubs, 25 Avril 2018.
- [22] A. P. Marugán, J. Pinar-Pérez et F. P. G. Márquez, «A reinforcement learning agent for maintenance of deteriorating systems with increasingly imperfect repairs,» Reliability Engineering and System Safety, n° 1110466, 2024.
- [23] Wikipédia, «Processus de Markov,» 17 Novembre 2024. [En ligne]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Processus_de_Markov. [Accès le 13 Juin 2025].
- [24] J.-F. Delmas, «Modèles stochastiques – Processus de Markov,» s.d.
- [25] Air Liquide, «Gas Encyclopedia,» 2025. [En ligne]. Available: <https://encyclopedia.airliquide.com/fr>. [Accès le 25 Avril 2025].
- [26] Wikipédia, «Azote,» [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Azote>. [Accès le 25 Avril 2025].
- [27] Wikipédia, «Oxygène,» [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Oxyg%C3%A8ne>. [Accès le 25 Avril 2025].
- [28] Wikipédia, «Argon,» [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Argon>. [Accès le 25 Avril 2025].
- [29] G. Landy, AMDEC – Guide pratique, Paris: AFNOR Éditions, 2018.
- [30] R. S. A. A. K. S. S. Diwakar, «Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Implementation: A Literature Review,» Benchmarking: An International Journal, vol. 30, n° 16, pp. 1870-1898, 2023.
- [31] «Mode de défaillance,» Wikipédia Foundation, 14 Juillet 2023. [En ligne]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Mode_de_d%C3%A9faillance. [Accès le 8 Juin 2025].
- [32] C. d. wikipedia, «AMDEC,» Wikipédia, 6 Juin 2024. [En ligne]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_des_modes_de_d%C3%A9faillance%2C_de_leurs_effets_et_de_leur_criticit%C3%A9. [Accès le 8 Juin 2025].
- [33] «AMDEC,» Jackadit, 31 Juillet 2024. [En ligne]. Available: <https://jackadit.com/index.php?p=indus1>. [Accès le 8 Juin 2025].
- [34] «Fiche pratique – La méthode AMDEC,» Quaséen, [En ligne]. Available: <https://www.quaseen.com/fiche-pratique-la-methode-amdec-qse/>.
- [35] D. D. e. A. Malek, «Simulation des propriétés thermodynamiques du fluide R134a,» Revue des Energies Renouvelables, vol. 10, n° 11, pp. 101-108, 2007.
- [36] E. W. Frisco, «Anderson Darling and Cramer von Mises Based Goodness of Fit Tests for the Weibull Distribution With Known Shape Using Normalized Spacings,» United States Air Force Institute of Technology, Department of Mathematics and Statistics, Wright Patterson AFB OH, March 1998.

- [37] R. Rakotomalala, «Tests de normalité : Techniques empiriques et tests statistiques,,» Université Lumière Lyon 2, 2011.
- [38] M. J. B. a. R. L. O'Hara, «The relative performance of AIC, AICC and BIC in the présence of unobserved heterogeneity,,» *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 7, n° %16, p. 679–692, 2016.
- [39] J. C. a. A. A. Neath, «The Akaike information criterion: Background, derivation, properties, application, interpretation, and refinements,,» *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, vol. 11, n° %13, 2019.
- [40] «Guideline for Establishing Criticality Rankings for Fossil Power Plant Systems and Components,,» Electric Power Research Institute, Palo Alto, 2012.
- [41] Werktuigen, «ENGIE EQUANS – Quantum X035-E1C-HH,,» 27 novembre 2024. [En ligne]. Available: <https://www.werktuigen.fr/engie%2Fequans-quantum+x035-e1c-hh/wt-178-19296>. [Accès le 19 juin 2025].

Annexes

ANNEXE A – Tableau HAZID de l'unité de séparation d'air

Cette annexe présente l'analyse HAZID réalisée sur l'unité de séparation des gaz de l'air de Linde Gas Reghaïa. L'objectif de cette étude est d'identifier les dangers potentiels associés aux équipements et procédés, ainsi que leurs conséquences.

Tableau A.1 – HAZID de l'ASU

HAZID PROCESS – IDENTIFICATION DE DANGERS				
Système : Unité de séparation d'air (ASU)			Linde Gas Algérie - Reghaïa	
N°	Opération / équipement	Mot Guide	Cause	Scénarios Potentiels Conséquences
1	Compression d'air à 5 bar / Compresseur (C1161)	Surpression	Défaillance des dispositifs de sécurité (soupapes de décharge, capteurs de température/pression)	- Rupture de l'équipement. - Libération incontrôlée d'air comprimé.
			Vibrations & Défaillance mécanique (positionneur, arbre)	
			Obstruction des conduites et filtres	
		Perte de confinement de l'air	Surpression	- Perturbation du procédé. - Risque d'asphyxie. - Bruit intense. - Surpression d'équipement voisins.
			Défaillance mécaniques (fissuration des joints ou soudures, corrosion)	

HAZID PROCESS – IDENTIFICATION DE DANGERS				
Système : Unité de séparation d'air (ASU)			Linde Gas Algérie - Reghaïa	
N°	Opération / équipement	Mot Guide	Cause	Scénarios Potentiels Conséquences
		Surchauffe	Défaillance des dispositifs de sécurité (soupapes de décharge, capteurs de température/pression)	- Usure prématurée et vibrations anormales.
			Défaillance mécaniques interne	
			Défaillance du circuit frigorifique	
			Lubrification défectueuse	
2	Élimination d'humidité / Séparateur d'eau (D2431)	Fuite d'eau/gaz	Corrosion interne	- Endommagement de l'équipement.
			Surpression	- Risque de glissement.
		Blocage / Colmatage	Accumulation de particules.	- Surpression. - Corrosion.
3	Purification d'air / Tamis moléculaires (A2626A/B)	Contamination	Dégradation du média adsorbant (Alumines)	- Colmatage du tamis => Mauvaise purification. => Contamination du réseau aval. => Produit Hors spécification.
			Régénération incorrecte du tamis.	

HAZID PROCESS – IDENTIFICATION DE DANGERS				
Système : Unité de séparation d'air (ASU)			Linde Gas Algérie - Reghaïa	
N°	Opération / équipement	Mot Guide	Cause	Scénarios Potentiels Conséquences
				- Surpression.
		Surchauffe	Dégradation du média adsorbant (Alumines)	- Détérioration des tamis moléculaires - Risque d'incendie ou d'explosion.
			Défaut de régénération des tamis.	
			Défaillance du système de refroidissement en amont.	
		Surpression	Défaillance des vannes d'entrée et sorties.	- Endommagement du lit d'adsorption => Détérioration des tamis moléculaires. - Perte de confinement.
			Obstruction des conduites.	
		Perte de confinement de l'air	Surpression	- Perturbation du procédé. - Bruit intense. - Surpression d'équipement voisins.
			Défaillance mécaniques (fissuration au niveau des joints ou soudures, corrosion)	

HAZID PROCESS – IDENTIFICATION DE DANGERS				
Système : Unité de séparation d'air (ASU)			Linde Gas Algérie - Reghaïa	
N°	Opération / équipement	Mot Guide	Cause	Scénarios Potentiels Conséquences
4	Compression d'air à 33 bar / Compresseur (C1461)	Surpression	Défaillance du pressostat.	- Rupture de l'équipement. - Libération incontrôlée d'air comprimé.
			Vibrations & Défaillance mécanique (positionneur, arbre)	
			Obstruction des conduites et filtres	
		Perte de confinement de l'air	Surpression	- Perturbation du procédé. - Risque d'asphyxie.
			Défaillance mécaniques (fissuration des joints ou soudures, corrosion)	
		Surchauffe	Défaillance des dispositifs de sécurité (soupapes de décharge, capteurs de température/pression)	- Usure prématurée et vibrations anormales. - Influence sur l'efficacité de production. - Risque d'incendie (en présence de combustible).
			Défaillance mécaniques interne	
			Défaillance du circuit frigorifique	

HAZID PROCESS – IDENTIFICATION DE DANGERS				
Système : Unité de séparation d'air (ASU)			Linde Gas Algérie - Reghaïa	
N°	Opération / équipement	Mot Guide	Cause	Scénarios Potentiels Conséquences
			Lubrification défectueuse	
5	Compression d'air à 49,6 bar / Turbo-Compresseur (C3420)	Surpression	Défaillance des dispositifs de sécurité (soupapes de décharge, capteurs de température/pression)	- Rupture de l'équipement. - Libération incontrôlée d'air comprimé.
			Blocage des conduites.	
		Perte de confinement de l'air	Surpression	- Perturbation du procédé. - Risque d'asphyxie. - Bruit intense. - Surpression d'équipement voisins (Projection).
			Vibrations & Défaillances mécaniques (joints ou soudures)	
		Surchauffe	Défaillance des dispositifs de sécurité (soupapes de décharge, capteurs de température/pression)	- Usure prématurée et vibrations anormales. - Influence sur l'efficacité de production.
			Défaillance mécaniques interne	

HAZID PROCESS – IDENTIFICATION DE DANGERS				
Système : Unité de séparation d'air (ASU)			Linde Gas Algérie - Reghaïa	
N°	Opération / équipement	Mot Guide	Cause	Scénarios Potentiels Conséquences
			Défaillance du circuit frigorifique Lubrification défectueuse	- Risque d'incendie (en présence de combustible).
6	Détente et liquéfaction / Turbine	Surpression	Blocage ou obstruction des conduites de la turbine.	- Endommagement d'équipement. - Explosion -> Projection de débris - Libération incontrôlée d'air comprimé.
			Défaillance des dispositifs de sécurité (soupapes de décharge, capteurs de température/pression)	
			Charge de production excessive.	
		Perte de confinement de l'air.	Surpression	- Risque d'asphyxie (espace confiné). - Risque d'incendie ou d'explosion (O2 enrichi + présence de combustible) - Formation de glace.
			Vibrations & Défaillances mécaniques (joints ou soudures)	

HAZID PROCESS – IDENTIFICATION DE DANGERS				
Système : Unité de séparation d'air (ASU)			Linde Gas Algérie - Reghaïa	
N°	Opération / équipement	Mot Guide	Cause	Scénarios Potentiels Conséquences
		Surchauffe	Défaillance des dispositifs de sécurité (soupapes de décharge, capteurs de température/pression)	- Mauvaise détente d'air.
			Défaillance du circuit frigorifique	
			Lubrification défectueuse	
7	Séparation cryogénique / Colonne basse pression (T3211), Colonne haute pression (T3212), Colonnes d'argon (T4110, T4111, T4112)	Givrage / blocage interne dans la colonne	Accumulation d'humidité, de CO2 ou d'hydrocarbures. (Mauvaise purification de l'air)	- Surpression localisé dans les colonnes de distillation. - Risque d'explosion (La présence d'hydrocarbures et d'oxygène forme un mélange inflammable).
			Défaillance d'un joint, fissure de paroi.	- Jet cryogénique (La présence d'hydrocarbures et d'oxygène forme un mélange inflammable).
		Perte de confinement du gaz cryogénique	Corrosion.	

HAZID PROCESS – IDENTIFICATION DE DANGERS				
Système : Unité de séparation d'air (ASU)			Linde Gas Algérie - Reghaïa	
N°	Opération / équipement	Mot Guide	Cause	Scénarios Potentiels Conséquences
		Explosion	Accumulation de gaz inflammables	- Rupture ou déformation importante de la colonne, entraînant des fuites massives de gaz ou liquides cryogéniques. - Onde de choc et projection de fragments, risques pour la sécurité du personnel et des installations environnantes. - Arrêt brutal de la production, dommages matériels importants. - Risques d'incendie secondaire en cas de présence de gaz inflammables.
			Surpression et rupture de confinement	
			Mélange gazeux dangereux (oxygène liquide avec des hydrocarbures)	
			Défaillance des dispositifs de sécurité (soupapes de décharge, systèmes de détection et de ventilation)	

HAZID PROCESS – IDENTIFICATION DE DANGERS				
Système : Unité de séparation d'air (ASU)			Linde Gas Algérie - Reghaïa	
N°	Opération / équipement	Mot Guide	Cause	Scénarios Potentiels Conséquences
		Surchauffe la colonne	Défaut de régulation de turbine de détente.	- Risque d'explosion en présence de mélange gazeux dangereux. - Détérioration de l'équipement. - Produits hors spécification.
			Défaillance des circuits de refroidissement => Refroidissement insuffisant.	
		Surpression de la colonne	Retour de gaz ou de liquide depuis une autre section (effet de <i>backflow</i>).	- Rupture mécanique -> Fuite de gaz cryogénique. - Endommagement de l'équipement. - Explosion dans la colonne.
			Blocage de ligne de sortie. (Vanne fermé, Colmatage et givrage)	
8	Stockage d'oxygène liquide / Réservoir de stockage (LOX D7110)	Augmentation de la pression interne	Surchauffe du produit.	- Vaporisation rapide de LOX. - Rupture du réservoir => Explosion du réservoir.
			Défaillance des dispositifs de sécurité (soupapes de décharge, capteurs de pression)	
			Sur-remplissage du réservoir	

HAZID PROCESS – IDENTIFICATION DE DANGERS				
Système : Unité de séparation d'air (ASU)			Linde Gas Algérie - Reghaïa	
N°	Opération / équipement	Mot Guide	Cause	Scénarios Potentiels Conséquences
		Fuite	Défaillance structurelle	- Dispersion O2 dans l'atmosphère. - Risque d'explosion (Atmosphère enrichie en O2).
			Surpression.	
			Corrosion.	
		Surchauffe du réservoir	Défaut d'isolation thermique. => Apport de chaleur externe	- Surpression interne. - Vaporisation rapide de LOX.
			Défaut de refroidissement en amont	
9	Stockage de l'azote liquide / Réservoir de stockage (LIN D7310)	Augmentation de la pression interne	Surchauffe du produit.	- Rupture du réservoir -> Explosion du réservoir.
			Défaillance des dispositifs de sécurité (soupapes de décharge, capteurs de pression)	
			Sur-remplissage du réservoir	

HAZID PROCESS – IDENTIFICATION DE DANGERS				
Système : Unité de séparation d'air (ASU)			Linde Gas Algérie - Reghaïa	
N°	Opération / équipement	Mot Guide	Cause	Scénarios Potentiels Conséquences
		Fuite	Défaillance structurelle	- Dispersion N2 dans l'atmosphère.
			Surpression	
			Corrosion	
		Surchauffe du réservoir.	Défaut d'isolation thermique. => Apport de chaleur externe	- Surpression interne. - Vaporisation rapide de LIN.
			Défaut de refroidissement en amont	
10	Stockage de l'argon liquide / Réservoir de stockage (Argon)	Augmentation de la pression interne	Surchauffe du produit.	- Vaporisation rapide de LOX. - Rupture du réservoir => Explosion du réservoir.
			Défaillance des dispositifs de sécurité (soupapes de décharge, capteurs de pression)	
			Sur-remplissage du réservoir	
		Fuite	Défaillance structurelle.	- Dispersion d'Argon dans l'atmosphère.
			Surpression.	
			Corrosion.	

HAZID PROCESS – IDENTIFICATION DE DANGERS				
Système : Unité de séparation d'air (ASU)			Linde Gas Algérie - Reghaïa	
N°	Opération / équipement	Mot Guide	Cause	Scénarios Potentiels Conséquences
		Surchauffe du réservoir	Défaut d'isolation thermique. => Apport de chaleur externe	- Surpression interne. - Vaporisation rapide de l'argon.
			Défaut de refroidissement en amont	
11	Refroidissement à 25°C / Circuit tour de refroidissement	Surchauffe	Conditions climatiques extrêmes	- Elévation de température du process. - Risque de surchauffe des équipements. - Arrêt ou ralentissement de la production.
			Défaillance du 2ème circuit de refroidissement	
			Contamination de l'eau => réduisant l'efficacité thermique	
		Surpression	Augmentation de température	- Dégradation prématurée des équipements.
			Défaillance des dispositifs de sécurité (soupapes de décharge, capteurs de pression)	
			Obstruction des conduites	

HAZID PROCESS – IDENTIFICATION DE DANGERS				
Système : Unité de séparation d'air (ASU)			Linde Gas Algérie - Reghaïa	
N°	Opération / équipement	Mot Guide	Cause	Scénarios Potentiels Conséquences
		Fuite	Surpression	- Pollution environnementale.
			Corrosion	- Elévation de température du process.
			Défaillance mécanique (usure, joint défectueux)	- Arrêt ou ralentissement de la production.
12	Refroidissement à 10°C / Circuit frigorifique (COFELY)	Surchauffe	Conditions climatiques extrêmes	- Elévation de température du process.
			Défaillance du 1er circuit de refroidissement.	- Risque de surchauffe des équipements.
			Contamination de l'eau => réduisant l'efficacité thermique	- Arrêt ou ralentissement de la production.
		Surpression	Augmentation de température	- Dégradation prématurée des équipements.
			Défaillance des dispositifs de sécurité (soupapes de décharge, capteurs de pression)	
			Obstruction des conduites	

HAZID PROCESS – IDENTIFICATION DE DANGERS				
Système : Unité de séparation d'air (ASU)			Linde Gas Algérie - Reghaïa	
N°	Opération / équipement	Mot Guide	Cause	Scénarios Potentiels Conséquences
		Fuite	Surpression	- Pollution environnementale.
			Corrosion	- Elévation de température du process.
			Défaillance mécanique (usure, joint défectueux)	- Arrêt ou ralentissement de la production.

ANNEXE B – Modes de défaillance identifiés

Cette annexe regroupe les différents modes de défaillance susceptibles d’être rencontrés dans le cadre de l’analyse AMDEC selon le guide AFNOR

Tableau B.1 – Liste des modes de défaillance recensés

Modes de défaillance identifiés	
Défaillance structurelle	Écoulement réduit
Blocage physique ou coincement	Mise en marche erronée
Vibration	Ne s’arrête pas
Ne reste pas en position	Ne démarre pas
Ne s’ouvre pas	Ne commute pas
Ne se ferme pas	Fonctionnement prématuré
Défaillance en position ouverte	Fonctionnement après le délai prévu
Défaillance en position fermée	Entrée erronée (augmentation)
Fuite interne	Entrée erronée (diminution)
Fuite externe	Sortie erronée (augmentation)
Dépasse la limite supérieure tolérée	Sortie erronée (diminution)
Est au-dessous de la limite inférieure tolérée	Perte de l’entrée
Fonctionnement intempestif	Perte de la sortie
Fonctionnement intermittent	Court-circuit (électrique)
Fonctionnement irrégulier	Circuit ouvert (électrique)
Indication erronée	Fuite (électrique)

ANNEXE C – Tableau AMDEC du circuit frigorifique Cofely

Cette annexe présente l'analyse appliquée au circuit frigorifique Cofely. Elle permet d'identifier les principaux modes de défaillance, leurs effets, leurs causes, et d'évaluer leur criticité selon une échelle normalisée (Gravité, Occurrence, Détection).

Tableau C.1 – Etude AMDEC du circuit Cofely

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
Turbocompresseur	Comprimer le réfrigérant	Fonctionnement dégradée	Charge thermique trop importante, Fuite du gaz	- Baisse de productivité de refroidissement. - Interruption du processus en aval. - Surchauffe de l'équipement. - Perte de confinement du réfrigérant.	Interface opérateur, Interface COFELY	7	6	2	84

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
		Arrêt Intempestif	Arrêt du moteur électrique, Défaut du pressostat, Défaut d'alimentation électrique, Usure de l'équipent.	- Interruption du processus en aval. - Absence de refroidissement cryogénique.	Interface opérateur, Interface COFELY	8	8	2	128
	Arrêter	Refus de s'arrêter	Défaut du pressostat ou/et thermostat, Défaut automate	- Production de froid non sollicité. - Surpression du circuit frigorifique en aval. - Fatigue prématurée de l'équipement.	Interface opérateur, Interface COFELY	1	10	2	20

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
		Démarrage intempestif	Défaut du pressostat ou/et thermostat, Défaut automate	- Production de froid non sollicité. - Supression du circuit frigorifique en aval. - Fatigue prématurée de l'équipement.	Interface opérateur, Interface COFELY	1	10	2	20
	Démarrer	Refus de démarrage	Panne du moteur électrique, Défaut automate, Défaut d'alimentation électrique, Usure de l'équipent.	- Interruption du processus en aval. - Absence de refroidissement cryogénique.	Interface opérateur, Interface COFELY	3	6	2	36

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
Evaporateur	Vaporisation complète du fluide frigorigène	Transfert thermique insuffisant	Mauvaise régulation en amont Température de réfrigérant trop basse/ élevée Débit trop faible	- Température de sortie du fluide trop élevée => Refroidissement inefficace - Perturbation du circuit frigorifique. - Usure prématuré des équipements en aval.	Interface de l'opérateur, Interface COFELY, Thermostat	2	4	4	32
		Vaporisation incomplète	Température de réfrigérant trop basse, Mauvaise régulation en amont, Débit trop faible	- Température de sortie du fluide trop élevée => Refroidissement inefficace - Perturbation du circuit frigorifique.	Interface COFELY, Transmetteur de pression	2	4	7	56

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
				- Usure prématuré des équipements en aval.					
	Assurer le passage du fluide frigorigène	Fuite de fluide frigorigène	Usure des joints ou des soudures Corrosion Exposition à des conditions environnementales extrême	- Perturbation de la circulation => Réduction de la capacité de refroidissement - Surchauffe/sur-utilisation du compresseur	Opérateur (visuelle)	2	8	6	96
		Passage réduit du fluide frigorigène	Réduction du diamètre interne de passage (obstruction, encrassement, corrosion, dépôt) Ecrasement de tuyauterie (mauvais montage)	- Diminution de pression en aval. - Perturbation du circuit frigorifique.	Opérateur, Interface COFELY	2	7	5	70

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
	Assurer le passage de l'eau refroidit	Fuite d'eau	Usure des joints ou des soudures, Corrosion, Exposition à des conditions environnementales extrême	- Perturbation de la circulation => Réduction de la capacité de refroidissement - Surchauffe/sur-utilisation du compresseur	Opérateur (visuelle), Interface opérateur, Détecteur de débit	2	8	2	32
		Passage réduit d'eau	Réduction du diamètre interne de passage (obstruction, encrassement, corrosion, dépôt), Ecrasement de tuyauterie (mauvais montage)	- Mauvais échange thermique => Réduction de la capacité de refroidissement. - Perturbation du circuit frigorifique.	Opérateur, Interface Quantum	2	7	5	70

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
Condenseur à air	Condensation du réfrigérant gazeux en phase liquide	Condensation incomplète	Température d'air élevée / d'eau Température du réfrigérant trop élevée, Pression trop basse du réfrigérant, Déformation mécanique de la virole (enveloppe extérieure du condenseur)	- Réfrigérant partiellement gazeux. - Perturbation du circuit frigorifique. - Usure prématuré des équipements en aval.	/	2	6	10	120
	Assurer le passage du débit d'air	Absence de débit d'air	Ventilateur hors service, défaillance électrique du câblage, Obstruction par poussière, insectes, feuilles, filtres encrassés	- Absence de refroidissement du réfrigérant. - Perturbation du circuit frigorifique.	Interface opérateur	3	7	2	42
		Débit d'air instable	Régulation de vitesse défaillante Problème de commande électronique Ventilateurs vieillissants	- Refroidissement faible du réfrigérant. - Perturbation du circuit frigorifique.	Interface opérateur, Thermostats.	3	4	4	48

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
	Assurer le passage du fluide frigorigène	Fuite du réfrigérant	Corrosion ou vieillissement des conduites tubulaires, Surpression, Desserrage ou rupture de support / plaques tubulaires	- Diminution de pression en aval. - Perturbation du circuit frigorifique. - Contamination de l'environnement (Effet de serre)	Opérateur (Visuelle)	2	9	10	180
		Restriction partielle ou totale du passage du fluide frigorigène	Réduction du diamètre interne de passage (obstruction, encrassement, corrosion, dépôt), Ecrasement de tuyauterie (mauvais montage)	- Diminution de pression en aval. - Perturbation du circuit frigorifique.	Interface COFELY	2	3	6	36

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
Collecteur	Recueillir la totalité du fluide frigorigène	Blocage / Colmatage	Accumulation de résidus solides	- Surchauffe ou surpression locale. - Endommagement potentiel des équipements	Interface COFELY	2	6	5	60
		Fuite externe	Dégradation de l’étanchéité (joints, soudures) Mauvais montage ou vieillissement des composants Corrosion ou choc mécanique	- Mauvais fonctionnement des équipements aval - Perte de fluide frigorigène. - Contamination de l'environnement (Effet de serre)	Opérateur (visuelle), Interface Quantum	2	9	4	72
		Collecte partielle	Obstruction partielle d’un tuyau en amont Fuite sur l’un des raccords d’entrée	- Refroidissement inefficace / irrégulier	Opérateur (visuelle), Interface Quantum	2	6	5	60

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
Détendeur (Vanne de détente)	Détendre le fluide à la pression d’évaporation	Blocage en position fermé	Défaut d'alimentation électrique Obstruction de la vanne, Commande défaillante	- Aucun passage de fluide => Arrêt du refroidissement. - Surpression du circuit en amont.	Interface COFELY	2	7	3	42
		Blocage en position ouverte	Défaut d'alimentation électrique Obstruction de la vanne, Commande défaillante	- Alimentation excessif de l'évaporateur. - Perturbation du circuit de refroidissement. - Surpression du circuit en aval.	Interface COFELY	2	7	3	42
		Régulation de pression incorrecte	Capteurs défaillant Défaut de commande réglage manuel inadéquat (Erreur humaine)	- Mauvaise conditions d'évaporation. - Perturbation du circuit de refroidissement.	Interface COFELY	2	7	5	70

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
				- Usure prématurée des équipements en aval.					
	Réguler le débit de fluide entrant dans l'évaporateur	Blocage en position fermé	Défaut d'alimentation électrique Obstruction de la vanne, Commande défaillante	- Aucun passage de fluide => Arrêt du refroidissement. - Surpression du circuit en amont.	Interface COFELY	2	7	3	42
		Blocage en position ouverte	Défaut d'alimentation électrique Obstruction de la vanne, Commande défaillante	- Alimentation excessif de l'évaporateur. - Perturbation du circuit de refroidissement. - Surpression du circuit en aval.	Interface COFELY	2	7	3	42

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
		Régulation instable	Défauts de capteurs Obstruction de la vanne Commande défaillante	- Mauvaise conditions d'évaporation. - Perturbation du circuit de refroidissement. - Usure prématurée des équipements en aval.	Interface COFELY	2	7	3	42
	Assurer le passage du fluide frigorifique	Ecoulement réduit permanent (Sous-débit)	Encrassement/Obstruction des conduites Vanne de détente défaillante Régulation en amont inadéquate	- Mauvaise conditions d'évaporation. - Perturbation du circuit de refroidissement. - Usure prématurée des équipements en aval.	Interface COFELY	2	7	4	56

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
		Fuite externe	Surpression Corrosion	- Perte de débit. - Contamination de l'environnement (Effet de serre) - Mauvaise conditions d'évaporation. - Perturbation du circuit de refroidissement. - Usure prématurée des équipements en aval.	Opérateur (visuelle)	2	9	4	72
Armoire électrique	Assurer la puissance	Surtension	Surcharge sur le réseau, Problème d'alimentation de l'armoire.	- Endommagement des équipements sensibles. - Arrêt process.	Les relais électriques.	1	9	2	18

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
		Pas d'alimentation électrique	Défaillance interrupteur principal, Défaut d'alimentation externe, Court-circuit Surcharge	- Arrêt total du système frigorifique - Perte de production	Interface opérateur	2	7	2	28
		Court-circuit interne	Câble défectueux, Isolation détériorée, Humidité Mauvais serrage	- Echauffement localisé - Risque d’incendie. - Dysfonctionnements électriques des équipements.	Les relais électriques.	1	9	2	18
	Assurer la Commande et la régulation	Absence de commande automatique	Panne de l’automate programmable (API), Capteurs défectueux	- Le circuit ne réagit plus automatiquement => arrêt du process. - Impact sur les équipements en aval.	Interface opérateur, Interface COFELY	3	8	2	48

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
		Non-réception des ordres de commande	Câblage défectueux / perte de communication entre les modules.	- Les actionneurs (vannes, compresseur) ne fonctionnent pas. - Le système reste figé malgré les consignes.	Interface COFELY	3	7	4	84
		Erreur de régulation (valeurs incorrectes)	- Défaillance des capteurs, Mauvaise calibration des capteurs erreur dans le calcul de la régulation.	- Dégradation des performances du système. - Fatigue prématurée des équipements.	Interface COFELY	3	4	4	48
Vanne de contrôle de pression	Ouverture de la vanne	Ouverture partielle	Encrassement (Accumulation de dépôts)	- Mauvaise conditions d'évaporation. - Perturbation du circuit de refroidissement.	Interface COFELY	2	4	5	40

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
				- Usure prématurée des équipements en aval.					
		Fermeture intempestif	Perte de commande, problèmes de signalisation	- Aucun passage de fluide => Arrêt du refroidissement. - Surpression du circuit en amont.	Interface COFELY	2	7	4	56
		Fuite externe	Dégradation des joints, Vibrations excessives, Corrosion	- Perte de confinement du réfrigérant. - Contamination de l'environnement (Effet de serre) - Perturbation du circuit de refroidissement.	Opérateur (visuelle)	2	9	4	72

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
				- Usure prématurée des équipements en aval.					
		Blocage en position fermé	Accumulation d'impuretés Perte de commande, problèmes de signalisation	- Aucun passage de fluide => Arrêt du refroidissement. - Supression du circuit en amont.	Interface COFELY	2	7	4	56
	Fermeture de la vanne	Blocage en position ouverte	Accumulation d'impuretés Perte de commande, problèmes de signalisation	- Alimentation excessif de l'évaporateur. - Perturbation du circuit de refroidissement. - Supression du circuit en aval.	Interface COFELY	2	7	4	56
		Ouverture intempestif	Supression du circuit Perte de commande	- Perturbation du circuit de refroidissement.	Interface COFELY	2	7	4	56

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
				- Usure prématurée des équipements en aval.					
		Fuite externe	Dégradation des joints Vibrations excessives Corrosion	- Perte de confinement du réfrigérant. - Contamination de l'environnement (Effet de serre) - Perturbation du circuit de refroidissement. - Usure prématurée des équipements en aval.	Opérateur (visuelle)	2	9	4	72

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)			Fonctionnement normale			
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
		Fermeture partielle	Accumulation d'impuretés Perte de commande, problèmes de signalisation	- Mauvaise conditions d'évaporation. - Perturbation du circuit de refroidissement. - Usure prématurée des équipements en aval.	Interface COFELY	2	7	4	56
Tuyauterie Circuit	Assurer le / transport et la rétention du fluide	Fuite de fluide frigorigène	Corrosion interne/externe, Mauvais raccordement, Microfissures, Vieillissement des joints	- Perte de confinement - Réduction de performance du système - Pollution atmosphérique	Inspection visuelle	8	10	10	800
		Obstruction partielle	Dépôt interne	- Mauvaise circulation du fluide - Baisse d’efficacité - Surchauffe du compresseur	Capteurs de pressions / températures.	2	8	8	128

AMDEC PROCESS – ANALYSE MODE DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									
Système : Unité de séparation d’air			Sous-système : Circuit frigorifique (Cofely - Quantum)				Fonctionnement normale		
Composant	Fonction Requise	Mode de défaillance	Causes de la défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
						O	G	D	C
		Rupture brutale de la tuyauterie	Choc mécanique, Fatigue des conduite, Corrosion	- Arrêt total de l’installation - Risque pour le personnel et équipements adjoints - Perte de fluide importante - Pollution atmosphérique	Capteurs de pressions / températures.	1	10	10	100

ANNEXE D – Rapport de diagnostic de fiabilité

Cette annexe présente le rapport complet de diagnostic de la fiabilité, généré à l'aide de l'interface développée.

Figure D.1 – Exemple de rapport de diagnostic de fiabilité

